

К.А. Конев, Е.А. Чабанов, Е.В. Чабанова

Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Российская Федерация

РАСЧЕТ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА АРМАТУРНОЙ ЗАДВИЖКИ

Перед изготовлением любого агрегата или механизма необходимо выполнить его расчет, проектирование с получением выходных характеристик. Далее изготавливают опытный образец и сравнивают расчетные характеристики с фактическими. Аналогичным образом разрабатывается арматурные задвижки (запорные механизмы) с приводом от вращательного электродвигателя и механической передачей, преобразующей вращательное движение двигателя в линейное – поступательное или возвратно-поступательное. Данный способ является неэффективным, так как происходит преобразование из одного вида движения в другое. С целью упрощения механической передачи целесообразно спроектировать и рассчитать линейный электродвигатель в качестве привода арматурной задвижки. В ранних работах на примере других устройств был выполнен теоретический сравнительный анализ использования электродвигателя вращательного и поступательного движения. В данной статье представлены результаты исследований с применением формул расчета силовых свойств проектируемой арматурной задвижки с однофазным линейным электродвигателем. **Цель исследований:** расчет и проектирование однофазного цилиндрического линейного электродвигателя, предлагаемого для использования в качестве электропривода арматурной задвижки, широко применяемой в различных сферах деятельности, связанных с необходимостью регулирования потока жидкости. **Методы:** для проведения сравнительного анализа различных видов арматурных задвижек с характеристиками устройств с приводом от линейного двигателя были выполнены расчеты силовой характеристики в программном обеспечении Mathcad, которые позволили определить оптимальные значения выходных параметров арматурной задвижки. **Результаты:** представлены формулы расчета основных силовых параметров арматурной задвижки. Определена зависимость силовых параметров от силы тока, протекающего по обмоткам статора однофазного линейного двигателя. **Практическая значимость:** предложенная система электропривода исключает механический преобразователь энергии, тем самым ликвидируя ее потери при преобразовании вращательного движения в поступательное. Линейный электродвигатель непосредственно создает возвратно-поступательное движение, что необходимо для движения арматурной задвижки.

Ключевые слова: однофазный линейный электродвигатель, арматурная задвижка, расчетные характеристики.

K.A. Konev, E.A. Chabanov, E.V. Chabanova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

CALCULATION OF A LINEAR ELECTRIC DRIVE FOR A VALVE GATE VALVE

Before manufacturing any unit or mechanism, it is necessary to calculate and design its output characteristics. A prototype is then manufactured, and the calculated characteristics are compared with the actual ones. Similarly, valves (shut-off mechanisms) are developed with a rotary electric motor drive and a mechanical transmission converting the motor's rotary motion into linear motion—either reciprocating or reciprocating. This method is ineffective, as it converts one type of motion into another. To simplify the mechanical transmission, it is advisable to design and calculate a linear electric motor as the valve drive. Previous studies, using other devices as examples, provided a theoretical comparative analysis of the use of rotary and reciprocating electric motors. This article presents the results of research using formulas for calculating the force properties of the designed valve with a single-phase linear electric motor. **The purpose of the research:** calculation and design of a single-phase cylindrical linear electric motor proposed for use as an electric drive for a valve valve, widely used in various fields of activity associated with the need to regulate the flow of liquid. **Methods:** To conduct a comparative analysis of various types of valves with the characteristics of linear motor-driven devices, power characteristic calculations were performed in Mathcad software. These calculations enabled the determination of optimal values for the valve output parameters. **Results:** Formulas for calculating the main power parameters of a valve are presented. The dependence of the power parameters on the current flowing through the stator windings of a single-phase linear motor is determined. **Practical significance:** The proposed electric drive system eliminates the need for a mechanical energy converter, thereby eliminating energy losses during the conversion of rotary motion to linear motion. The linear motor directly generates the reciprocating motion necessary for the valve movement.

Keywords: single-phase linear motor, valve, calculated characteristics.

Введение

При разработке арматурной задвижки (например, для регулирования потока жидкости) используются методы проектирования и расчета с применением различных программных продуктов. Подобные устройства проектируются для применения в конкретных условиях для конкретного оборудования, для чего разрабатываются технические условия, в которых описываются условия использования проектируемого механизма. Порядок проектирования следующий: условия эксплуатации, необходимые выходные параметры оборудования, расчет, проектирование, создание прототипа и сборка опытного образца. При проектировании в обязательном порядке необходимо учитывать все варианты оборудования, которые уже используются на данный момент в подобных устройствах. В данной статье рассматривается арматурная задвижка

с целью определения ее силовых параметров [1]. Эти параметры рассчитываются теоретически или определяются практически по результатам испытаний арматурной задвижки. Подобные устройства используются в различных сферах деятельности, например, в водоснабжении и канализации – арматурные задвижки из чугуна или стали с обрезиненным клином обеспечивают надёжное перекрытие потока жидкости и устойчивы к коррозии. Силовая характеристика – один из основных параметров арматурной задвижки, которая напрямую зависит от тягового усилия, создаваемого приводным механизмом. Чем больше мощность такого привода, тем меньше время срабатывания (закрытия или открытия) арматурной задвижки. Силовая характеристика арматурной задвижки зависит от особенностей ее конструкции [2].

Конструкции арматурных задвижек бывают:

1. Клиновые – затвор в форме клина, который в закрытом состоянии упирается в седло корпуса.
2. Параллельные – состоят из двух параллельно расположенных дисков с уплотнением между ними.
3. Шиберные – оснащены плоской задвижкой, перемещающейся перпендикулярно потоку. Часто применяются на трубах большого диаметра.

Во всех перечисленных типах арматурных задвижек для перемещения собственно запирающего устройства (клина) используется поступательное или возвратно-поступательное движение [3].

На примере клиновой задвижки рассчитаем усилие, которое необходимо приложить к штоку для закрытия или открытия задвижки. Произведем расчет для запорной арматуры (задвижки ДУ-80), представленной на рис. 1.

Наибольшие усилия на шпинделе, которые необходимо будет прикладывать к нему для смещения, будут различными в начальный момент открывания Q'_0 и в конечный момент закрывания Q_σ .

$$Q'_0 = Q'_1 - Q_{\text{шп}} + F_{\text{тр.с}}, \quad (1)$$

$$Q_\sigma = Q_1 + Q_{\text{шп}} + F_{\text{тр.с}}, \quad (2)$$

где Q'_1 – наибольшее усилие в начальный момент открывания обусловленное давлением рабочей среды, Н; Q_1 – наибольшее усилие в конечный

момент закрывания обусловленное давлением рабочей среды, Н; $Q_{шп}$ – усилие, с которым рабочая среда «выдавливает» шпиндель из задвижки, Н; $F_{тр.c}$ – сила трения шпинделя в сальниковом уплотнении, Н.

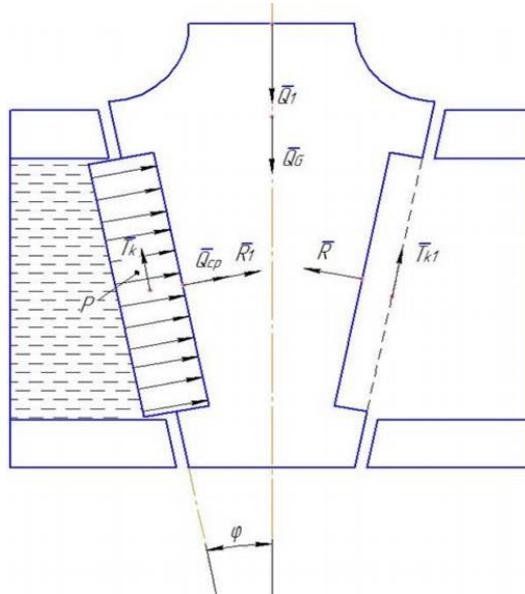


Рис. 1. Система сил, действующая на клин задвижки

Сила трения шпинделя в сальниковом уплотнении $F_{тр.c}$, приводящая к увеличению усилия, которое необходимо прикладывать к шпинделю, рассчитывается по формуле

$$F_{тр.c} = \phi \cdot d_{шп} \cdot S_c \cdot P_{раб}, \quad (3)$$

где $\phi = 1,61$ – коэффициент, зависящий от коэффициента трения и геометрических размеров сальника, о.е.; $d_{шп} = 24$ мм – диаметр шпинделя арматурной задвижки ДУ-80; S_c – толщина сальникового уплотнения, мм; $P_{раб} = 1$ МПа – рабочее давление, которое воспринимает клин задвижки от рабочей среды.

Толщина сальникового уплотнения S_c рассчитывается по формуле

$$S_c = (0,7...1,5) \cdot \sqrt{d_{шп}}, \quad (4)$$

где величину коэффициента зададим равной среднему значению 1,1 из указанного диапазона.

Усилие, с которым рабочая среда «выдавливает» шпиндель из запорного устройства, рассчитывается по формуле:

$$Q_{шп} = 0,785 \cdot d_{шп}^2 \cdot P_{раб}. \quad (5)$$

Наибольшее усилие в начальный момент открывания рассчитывается по формуле:

$$Q'_1 = 0,52 \cdot Q_y - 0,17 \cdot Q_{cp} + Q_c, \quad (6)$$

где Q_y – удельное давление на уплотняющих кольцах седла задвижки, необходимое для обеспечения плотности, Н; Q_{cp} – давление среды, оказываемое на поверхность клина задвижки, Н; Q_c – необходимое усилие затяжки сальника, обеспечивающее непроникновение рабочего тела за пределы сальниковой камеры, Н.

Удельное давление на уплотняющих кольцах седла задвижки, необходимое для обеспечения плотности, Q_y рассчитывается по формуле:

$$Q_y = \pi \cdot D_k \cdot b \cdot q_y, \quad (7)$$

где $D_k = 37$ мм – средний диаметр уплотнительной поверхности колец; $b = 9$ мм – ширина уплотняющих колец; q_y – необходимое удельное давление на уплотняющих кольцах, Н/мм².

Давление среды Q_{cp} рассчитывается по формуле

$$Q_{cp} = 0,785 \cdot D_k^2 \cdot P_{раб}. \quad (8)$$

Необходимое усилие затяжки сальника Q_c рассчитывается по формуле

$$Q_c = 0,785 \cdot (D_c^2 - d_{шп}^2) \cdot P_{сал}, \quad (9)$$

где $D_c = 36$ мм – диаметр сальниковой камеры; $d_{шп} = 24$ мм – диаметр шпинделя; $P_{сал}$ – давление, действующее на сальник со стороны рабочего тела, Н/мм².

Давление, действующее на сальник со стороны рабочего тела, $P_{сал}$ рассчитывается по формуле

$$P_{сал} = \phi_c \cdot P_{раб}, \quad (10)$$

где $\phi_c = 2,42$ – коэффициент, зависящий от рабочего давления и размеров сальниковой набивки.

Наибольшее усилие в конечный момент закрывания рассчитывается по формуле

$$Q_l = 0,67 \cdot Q_y - 0,43 \cdot Q_{cp} - Q_c, \quad (11)$$

В расчете были получены результаты, представленные в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты расчета усилий, прикладываемых
к шпинделю арматурной задвижки**

| Обозначения | Ед. изм. | Значение | Название параметра |
|-------------|----------|----------|--|
| S_c | мм | 5,4 | Толщина сальникового уплотнения |
| $F_{tp.c}$ | Н | 208,66 | Сила трения шпинделя в сальниковом уплотнении |
| $Q_{шп}$ | Н | 452,16 | Усилие, с которым рабочая среда «выдавливает» шпиндель из задвижки |
| $P_{сал}$ | МПа | 2,42 | Давление, действующее на сальник со стороны рабочего тела |
| Q_c | Н | 1367,79 | Необходимое усилие затяжки сальника |
| Q_{cp} | Н | 1074,68 | Давление среды |
| Q_y | Н | 5228,11 | Удельное давление на уплотняющих кольцах седла задвижки |
| Q'_l | Н | 3903,71 | Наибольшее усилие в начальный момент открывания |
| Q_l | Н | 1672,93 | Наибольшее усилие в конечный момент закрывания |
| Q'_0 | Н | 3660,21 | Наибольшие усилия на шпинделе в начальный момент открывания |
| Q_σ | Н | 2333,75 | Наибольшие усилия на шпинделе в конечный момент закрывания |

Согласно данным, представленным в табл. 1, для управления рассмотренной арматурной задвижкой достаточно приложить к штоку, управляющему ее клином, усилие не менее 3660,21 Н, а лучше с небольшим запасом, так как такого усилия будет достаточно как для открывания задвижки, так и для ее закрывания. Исследуем возможность использования линейного двигателя для управления штоком арматурной задвижки.

Как уже отмечалось ранее [4–6], использование линейного двигателя в некоторых случаях является вполне обоснованным, так как при этом повышается КПД устройства в целом, его обслуживание становится менее затратным, надежность работы вырастает, а в процессе производства данного агрегата потребность в некоторых материалах уменьшается или полностью исчезает. Там же [4–6] рассмотрены различные типы линейных двигателей, а в [6] подтверждена целесообразность использования именно цилиндрического линейного вентильного двигателя (далее ЦЛВД).

При проектировании ЦЛВД основное внимание необходимо уделить увеличению тягового усилия, под действием которого вторичный элемент выполняет поступательные или возвратно-поступательные движения, поскольку именно этот параметр линейного двигателя является одним из самых важных, по нему оценивают способность двигателя преобразовывать электрическую энергию в механическую, а следовательно, управлять арматурной задвижкой. Для реализации этой задачи проводился поиск рациональной конструкции вторичного элемента и чашки индуктора, при котором может быть создано максимальное тяговое усилие [7–9].

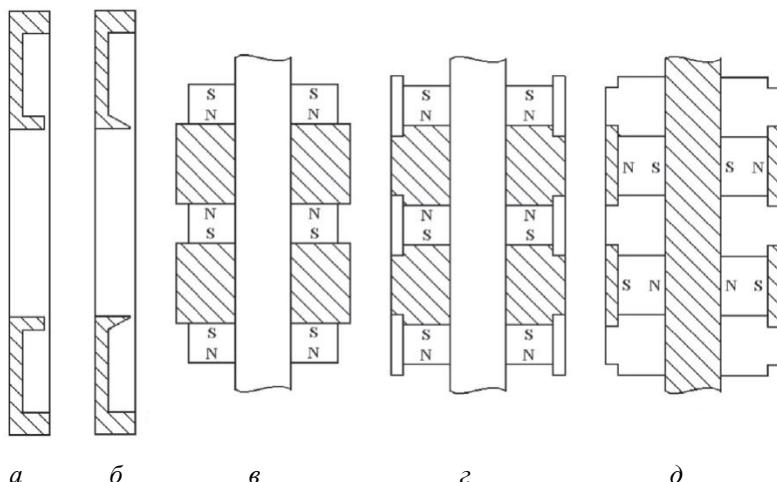


Рис. 2. Варианты конструкций чашки индуктора и вторичного элемента ЦЛВД:
 a – зубцовый элемент чашки без скоса; b – зубцовый элемент чашки со скосом;
 c – аксиальное направление намагничивания магнитов вторичного элемента без немагнитных колец на полюсах; d – аксиальное направление намагничивания магнитов вторичного элемента с немагнитными кольцами на полюсах;
 d – радиальное направление намагничивания магнитов вторичного элемента

В данной работе представлены результаты математических исследований, при которых были проведены многовариантные расчеты тяговых характеристик для различных конструкций ЦЛВД. В результате была выбрана конструкция, дающая наибольшее тяговое усилие. Согласно этим исследованиям, для получения наибольшего тягового усилия на вторичном элементе, к которому крепится шток клина арматурной задвижки, необходимо из возможных рассмотренных конструкций чашки индуктора и вторичного элемента (рис. 2) выбрать вторичный элемент с аксиальным намагничиванием магнитов (рис. 2, г) и чашку индуктора, представленную на рис. 2, б.

В соответствии с выбранной конструкцией ЦЛВД принимается модель его продольного сечения (рис. 3), согласно которой в корпусе, изготавливаемом в виде трубы (1), устанавливается индуктор ЦЛВД, состоящий из ферромагнитных чашек, в которые уложены витки двухфазной обмотки индуктора (2).

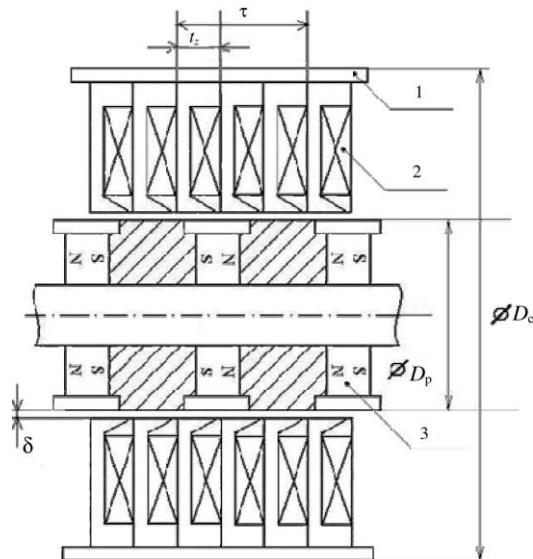


Рис. 3. ЦЛВД в продольном сечении:
1 – корпус; 2 – цилиндрический индуктор;
3 – вторичный элемент

Количество чашек влияет на мощность линейного двигателя и величину хода вторичного элемента, а значит, и на величину перемещения штока клина арматурной задвижки. В центр индуктора помещается вторичный элемент ЦЛВД (3), совершающий возвратно-

поступательное движение и представляющий собой немагнитный шток, на который нанизываются последовательно постоянные магниты и немагнитные прокладки.

Катушки индуктора соединяются последовательно на протяжении длины индуктора и образуют двухфазную обмотку, которая питается от однофазного источника питания. Для создания магнитного поля, бегущего линейно вдоль внутренней поверхности индуктора, необходимо на одну фазу обмотки индуктора подать напряжение напрямую от однофазного источника питания, а на вторую фазу напряжение, сдвинутое с помощью конденсатора (электрической емкости) относительно напряжения источника по фазе на $\pi/2$. Направление линейного перемещения магнитного поля индуктора в однофазном ЦЛВД можно изменить, переподключив одну из обмоток – рабочую или пусковую [10–13].

Одной из основных характеристик ЦЛВД является тяговое усилие $F_{\text{эм}}$, развиваемое вторичным элементом ЦЛВД [14–16] и передаваемое штоку арматурной задвижки, поэтому ее рассчитанное значение следует сравнивать с величиной максимального усилия, которое необходимо прикладывать к штоку задвижки для ее смещения, при условии наличия в трубопроводе рабочей среды (жидкости).

Для нахождения тягового усилия, развиваемого ЦЛВД по данным табл. 2, использовалось программное обеспечение Mathcad, с помощью которого были произведены все необходимые расчеты и построены графики зависимостей характеристик. Тяговое усилие модуля ЦЛВД определяется по закону Ампера [17–20]:

$$F_{\text{эм}} = \alpha \cdot \pi \cdot I_{\text{л}} \cdot B_z \cdot D \cdot l_{\text{мод}}, \quad (12)$$

где D – диаметр ротора с учетом воздушного зазора $D = D_p + \delta$, м;

$l_{\text{мод}}$ – длина активной части модуля индуктора ЦЛВД

$$l_{\text{мод}} = 2 \cdot p \cdot \tau, \text{ м}; \quad \alpha - \text{коэффициент полюсного деления } \alpha = \frac{b}{\tau}, \text{ о.е.};$$

$I_{\text{л}}$ – линейная токовая нагрузка, которую испытывает обмотка индуктора ЦЛВД $I_{\text{л}} = \frac{w_k \cdot I}{t_z}$, А/м.

$$I_{\text{л}} = \frac{w_k \cdot I}{t_z}, \text{ А/м.}$$

Вычисления и построение характеристик производились в программном обеспечении Mathcad.

Таблица 2

Исходные данные для расчета ЦЛВД

| Обозначение | Ед. изм. | Значение | Название параметра |
|-------------|----------|-----------------------|---|
| D_p | м | 0,055 | Диаметр вторичного элемента (ротора) |
| D_c | м | 0,118 | Внешний диаметр статора (диаметр трубы - корпуса двигателя) |
| I | А | 5 | Действующее значение тока, протекающего по обмоткам индуктора |
| H_0 | А/м | 680000 | Напряженность магнитного поля |
| B_z | Тл | 1,1 | Магнитная индукция в воздушном зазоре |
| τ | м | 0,03 | Полюсное деление |
| δ | м | 0,0015 | Ширина немагнитного зазора |
| b | м | 0,015 | Ширина полюса |
| w_k | | 130 | Число витков катушки в пазу |
| t_z | м | 0,01 | Зубцовое деление индуктора |
| p | | 10 | Число пар полюсов |
| D_m | м | 0,047 | Внешний диаметр реального магнита ЦЛВД |
| d_m | м | 0,022 | Внутренний диаметр реального магнита ЦЛВД |
| h_m | м | 0,008 | Ширина реального магнита ЦЛВД |
| μ_0 | Гн/м | $12,56 \cdot 10^{-7}$ | Магнитная проницаемость |
| S | м | 0,04 | Ход пики |
| f | Гц | 50 | Частота напряжения источника питания |

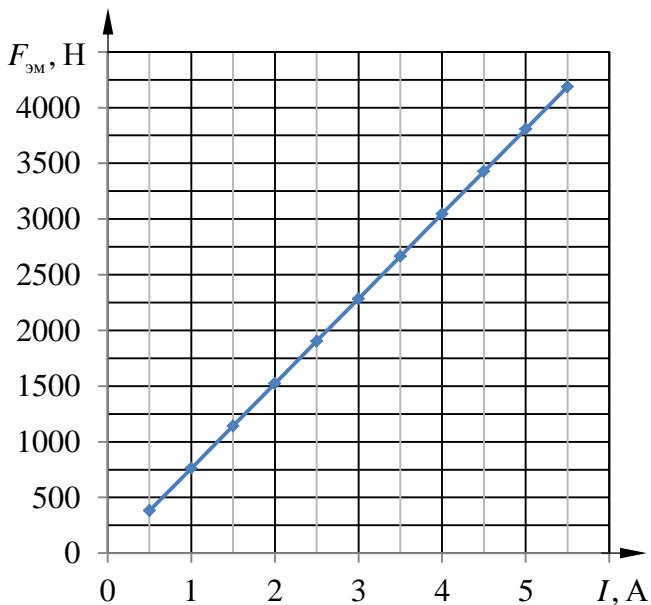
Задавая I в диапазоне от 0,5 до 5 А, определялось тяговое усилие, действующее на вторичный элемент ЦЛВД, которое далее может передаваться на шток клина арматурной задвижки. Результат вычислений представлен в табл. 3.

Рассчитанное значение тягового усилия $F_{\text{эм}}$ от действующего значения тока обмотки индуктора I (табл. 3) представлено в виде графической зависимости на рис. 4.

Таблица 3

Значения характеристик ЦЛВД в зависимости от I

| I , A | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 |
|-----------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $I_{\text{л}}$, А/м | 6500 | 13000 | 19500 | 26000 | 32500 | 39000 | 45500 | 52000 | 58500 | 65000 | 71500 |
| $F_{\text{эм}}$, Н | 380,74 | 761,47 | 1142,21 | 1522,95 | 1903,69 | 2284,42 | 2665,16 | 3045,90 | 3426,64 | 3807,37 | 4188,11 |
| $F_{\text{эм}}$, кгс | 38,82 | 77,65 | 116,47 | 155,30 | 194,12 | 232,95 | 271,77 | 310,60 | 349,42 | 388,24 | 427,07 |

Рис. 4. Зависимости тягового усилия $F_{\text{эм}}$ от действующего значения тока обмотки индуктора I

Выполненный расчет показывает, что при номинальном токе, равном 5 А, тяговое усилие ЦЛВД будет достигать 3807,37 Н больше максимального усилия, которое нужно приложить к штоку клина арматурной задвижки, которое равно 3660,21 Н. Следовательно, указанный ток допустим при использовании источника электрической энергии от однофазной сети, что доказывает возможность использования однофазного линейного электродвигателя при управлении арматурной задвижкой.

Проведенный анализ подтверждает, что использование однофазного линейного электродвигателя в качестве привода рационально и эффективно в том числе для управления арматурной задвижкой.

Заключение

Представленные в статье результаты исследований, подтвержденные расчетами энергетических характеристик однофазного линейного электродвигателя, используемого в качестве привода в арматурной задвижке, показывают высокую эффективность использования такого типа электромеханического преобразователя в рассматриваемом устройстве. Использование линейного электродвигателя в качестве привода арматурной задвижки позволит увеличить ее КПД в связи с исключением потерь в механической передаче. Движение вторичного элемента двигателя будет направлено линейно в соответствии с направлением движения штока клина арматурной задвижки.

Арматурная задвижка с однофазным линейным двигателем будет обладать рядом других преимуществ. Так, его использование при работе, производимой на удалении (в том числе значительном), например, связанной с управлением потоком рабочего тела (жидкости) на удаленных трубопроводах, будет обладать большей эффективностью, так как потребуется наличие лишь однофазного источника энергии, без применения трехфазных преобразователей и систем пневматики и гидравлики.

Библиографический список

1. Трубопроводная арматура: учеб. пособие / Ф.М. Мустафин, А.Г. Гумеров [и др.]. – Уфа: ГУП РБ УПК, УГНТУ, 2007. – 326 с.
2. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры: Расчет трубопроводной арматуры. – 5-е. изд. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 480 с.
3. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением: Справочник / Д.Ф. Гуревич, О.Н. Заринский, С.И. Косых [и др.]; под общ. ред. С.И. Косых. – Л.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
4. Конев, К.А. Проектирование однофазного линейного электродвигателя в устройстве отбойного молотка / К.А. Конев, Е.А. Чабанов // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2024. – Т. II. – 395 с.
5. Конев, К.А. Замена электрического двигателя в отбойном молотке / К.А. Конев, А.О. Фурина, Е.А. Чабанов // InnoTech-2021: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф.; г. Пермь, 15 ноября – 24 декабря 2021 г. – Пермь, 2021.

6. Конев, К.А. Использование линейного привода в отбойном молотке / К.А. Конев, Е.А. Чабанов // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2022. – Т. 1. – С. 243–248.
7. Ключников, А.Т. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя / А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, С.В. Шутемов // Электротехника. – 2013. – № 11. – С. 14–16.
8. Ключников, А.Т. Моделирование цилиндрического линейного асинхронного двигателя / Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. // Электротехника. – 2013. – № 11. – С. 14–17.
9. Цилиндрический линейный вентильный двигатель для добычи нефти бесштанговым методом / К.А. Конев, А.О. Фурина, А.Д. Коротаев, Е.А. Чабанов // Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 39. – С. 150–168.
10. Коротаев, А.Д. Экспериментальные исследования цилиндрического линейного вентильного электродвигателя / А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф.; г. Екатеринбург, 17–20 марта 2014 г. – Екатеринбург, 2014. – С. 198–200.
11. Тимашев, Э.О. Рабочие характеристики цилиндрического линейного вентильного двигателя / Э.О. Тимашев, Д.А. Чирков, А.Д. Коротаев // Электротехника. – 2018. – № 11. – С. 27–31.
12. 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: материалы междунар. науч.-техн. конф.; г. Пермь, 24–25 сентября 2015 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – С. 158–162.
13. Чирков, Д.А. Алгоритм управления цилиндрическим вентильным двигателем возвратно-поступательного движения: дипломная работа инженера по специальности «Электромеханика» / Д.А. Чирков. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 90 с.
14. Чирков, Д.А. Расчет основных параметров цилиндрического линейноговентильного двигателя по схеме замещения / Д.А. Чирков, А.Д. Коротаев, А.Т. Ключников // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы II междунар. науч.-техн. конф.; г. Пермь, 21–22 апреля 2016 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. – 2016. – С. 144–149.

15. Шулаков, Н.В. Применение цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобывающих агрегатов / Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и 109 электротехнике: материалы междунар. науч.-техн. конф.; г. Пермь, 21–22 апреля 2016. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – С. 161–167.
16. Шулаков, Н.В. Перспективы использования цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобычных агрегатов / Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12-4. – С. 795–799.
17. Шулаков, Н.В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе / Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Электротехника. – 2014. – № 11. – С. 18–22.
18. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе / А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2015. – Т. 1. – С. 163–169.
19. Шутемов, С.В. Исследование цилиндрического линейного вентильного электродвигателя для погружного бесштангового насоса / С.В. Шутемов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12. – С. 800–805.
20. Коротаев, А.Д. Экспериментальные исследования цилиндрического линейного вентильного электродвигателя / А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф.; Екатеринбург, 17–20 марта 2014. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2014. – С. 198–200.

Reference

1. Mustafin F.M., Gumerov A.G. et al. Truboprovodnaia armatura [Pipeline Valves]. Ufa: GUP RB UPK, UGNTU, 2007, 326 p.
2. Gurevich D.F. Raschet i konstruirovaniye truboprovodnoi armatury: Raschet truboprovodnoi armatury [Calculation and Design of Pipeline Valves: Calculation of Pipeline Valves]. 5nd ed. Moscow: LKI, 2008, 480 p.
3. Gurevich D.F., Zarinskii O.N., Kosykh S.I. et al. Truboprovodnaia armatura s avtomaticheskim upravleniem [Automatically Controlled Pipeline Valves]. Ed. S.I. Kosykh. Leningrad: Mashinostroenie, 1982, 320 p.

4. Konev K.A., Chabanov E.A. Proektirovanie odnofaznogo lineinogo elektrodvigatelia v ustroistve otboinogo molotka [Design of a Single-Phase Linear Electric Motor in a Jackhammer Device]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. Materialy vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii.* Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2024, vol. II, pp. 230-234.
5. Konev K.A., Furina A.O., Chabanov E.A. Zamena elektricheskogo dvigatelia v otboinom molotke [Replacing the electric motor in a jackhammer]. *InnoTech-2021. Materialy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Perm', 15 November - 24 December 2021.* Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2021.
6. Konev K.A., Chabanov E.A. Ispol'zovanie lineinogo privoda v otboinom molotke [Using a linear drive in a jackhammer]. *Innovatsionnye tekhnologii: teoriia, instrumenty, praktika*, 2022, vol. 1, pp. 243-248.
7. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., S Shutemov.V. Modelirovaniye tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatelia [Modeling of a cylindrical linear valve motor]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 11, pp. 14-16.
8. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Modelirovaniye tsilindricheskogo lineinogo asinkhronnogo dvigatelia [Modeling of a cylindrical linear induction motor]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 11, pp. 14-17.
9. Konev K.A., Furina A.O., Korotaev A.D., Chabanov E.A. Tsilindricheskii lineinyi ventil'nyi dvigatel' dlia dobychi nefti besshtango-vym metodom [Cylindrical linear valve motor for rodless oil production]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, 2021, no. 39, pp. 150-168.
10. Korotaev A.D., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Ekspерimental'nye issledovaniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo elektrodvigatelia [Experimental studies of a cylindrical linear valve electric motor]. *Aktual'nye problemy energosberegaiushchikh elektrotehnologii. Materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii*, Ekaterinburg, 17-20 March 2014. Ekaterinburg, 2014, pp. 198-200.
11. Timashev E.O., Chirkov D.A., Korotaev A.D. Rabochie kharakteristiki tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatelia [Operating characteristics of a cylindrical linear valve motor]. *Elektrotehnika*, 2018, no. 11, pp. 27-31.

12. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Tsilindricheskii lineinyi ventil'nyi elektrodvigatel' dlia pogruzhnogo bes-shtangovogo nasosa [Cylindrical linear valve electric motor for a submersible rodless pump]. *Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotehnike. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii, Perm'*, 24-25 September 2015. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2015, pp. 158-162.
13. Chirkov D.A. Algoritm upravleniya tsilindricheskim ventil'nym dvigatelem vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya: diplomnaia rabota in-zhenera po spetsial'nosti elektromekhanika [Control algorithm for a cylindrical valve reciprocating motor: Diploma thesis of an engineer majoring in electromechanics]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2015, 90 p.
14. Chirkov D.A., Korotaev A.D., Kliuchnikov A.T. Raschet osnovnykh parametrov tsilindricheskogo lineinogoventil'nogo dvigatelia po skheme zameshcheniya [Calculation of the main parameters of a cylindrical linear valve motor using the equivalent circuit]. *Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotehnike. Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii, Perm'*, 21-22 April 2016. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2016, pp. 144-149.
15. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Primenenie tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatelia v kachestve privoda plunzhernykh neftedobyvaiushchikh agregatov [Application of cylindrical linear valve motor as a drive of plunger oil-producing units]. *Avtomatizatsiya v elektroenergetike i 109 elektrotehnike. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii, Perm'* 21-22 April 2016. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2016, pp. 161-167.
16. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Perspektivy ispol'zovaniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatelia v kachestve privoda plunzhernykh neftedobychnykh agregatov [Prospects for using cylindrical linear valve motor as a drive of plunger oil-producing units]. *Fundamental'nye issledovaniia*. Penza: Akademiiia estestvoznaniia, 2016, vol. 4, no. 12, pp. 795-799.
17. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Metod rascheta elektromagnitnykh protsessov v tsilindricheskem lineinom ventil'nom dvigatele [Method of calculating electromagnetic processes in a cylindrical linear valve motor]. *Elektrotehnika*, 2014, no. 11, pp. 18-22.

18. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Metod rascheta elektromagnitnykh protsessov v tsilindricheskem lineinom ventil'nom dvigatele [Method of calculating electromagnetic processes in a cylindrical linear valve motor]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elekrotekhnike*, 2015, vol. 1, pp. 163-169.
19. Shutemov S.V. Issledovanie tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo elektrodvigatelia dlja pogruzhnogo besshtangovogo nasosa [Study of a cylindrical linear valve electric motor for a submersible rodless pump]. *Fundamental'nye issledovaniia*. Penza: Akademija estestvoznanija, 2016, vol. 4, no. 12, pp. 800-805.
20. Korotaev A.D., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Eksperimental'nye issledovaniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo elektrodvigatelia [Experimental studies of a cylindrical linear valve electric motor]. *Aktual'nye problemy energosberegajuushchikh elekrotehnologii APEET-2014. Sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii, Ekaterinburg, 17-20 March 2014*. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet, 2014, pp. 198-200.

Сведения об авторах

Конев Константин Андреевич (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: looking_99@mail.ru).

Чабанов Евгений Александрович (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ceapb@mail.ru).

Чабанова Евгения Владимировна (Пермь, Российская Федерация) – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и мосты» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: chabanovaev@pstu.ru).

About the authors

Konstantin A. Konev (Perm, Russian Federation) – postgraduate student of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: looking_99@mail.ru).

Evgenii A. Chabanov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ceapb@pstu.ru).

Evgeniia V. Chabanova (Perm, Russian Federation) – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways and bridges of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: chabanovaev@pstu.ru).

Поступила: 26.08.2025. Одобрена: 12.09.2025. Принята к публикации: 15.09.2025.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Конев, К.А. Сравнительная оценка энергетических характеристик отбойного электромолотка с пневматическим / К.А. Конев, Е.А. Чабанов, Е.В. Чабанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2025. – № 55. – С. 191–208. DOI: 10.15593/2224-9397/2025.3.09

Please cite this article in English as:

Konev K.A., Chabanov E.A., Chabanova E.V. Comparative assessment of the energy characteristics of an electric jackhammer with a pneumatic one. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2025, no. 55, pp. 191-208. DOI: 10.15593/2224-9397/2025.3.09