УДК 621.313

В.И.ОМЕЛЬЯНЕНКО, д-р.техн.наук, ***В.И.МИЛЫХ,*** д-р.техн.наук,
Г.В.ОМЕЛЬЯНЕНКО, канд.техн.наук

ВЫБОР ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА

Наведено результати порівняння по тяговій характеристиці лінійних електродвигунів постійного струму електродинамічного та електромагнітного типів різноманітних конфігурацій під час роботи у складі електропривода дозуючого плунжерного насосу.

The paper gives the results of comparing propulsion characteristics DC linear electric motors of both electrodynamic and electromagnetic types, which have different configuration, at their operution as plunger pump drives.

1. Введение. В технологических процессах теплоэнергетической, химической, нефтяной, пищевой и других отраслей народного хозяйства для объемного напорного дозирования нейтральных и агрессивных жидкостей, эмульсий, суспензий широко применяются электронасосные одноплунжерные дозировочные агрегаты типа НД. Плунжер такого агрегата перемещается в гидроцилиндре в пределах 0,016 – 0,06 м со скоростью ~ 0,18 м/с при силе тяги от 1100 до 7700 Н. Привод в движение плунжера осуществляется трехфазным асинхронным двигателем через червячный редуктор. Последний преобразует вращательное движение вала электродвигателя в возвратно-поступательное движение ползуна посредством кривошипно-шатунного механизма. Регулирование объема подачи рабочего тела при определенном его давлении обеспечивается длиной хода плунжера. При изменении давления возникает необходимость использовать другой тип агрегата с иным диаметром плунжера. Столь узкая возможность по регулируемости объясняется использованием в них в качестве электропривода серийных асинхронных двигателей с определенной мощностью и скоростью вращения, что не дает возможности варьировать силой тяги, прикладываемой к плунжеру, и скоростью его перемещения. Низка также эффективность такого электропривода – КПД установки в целом составляет 28–45 %.

Повышать эффективность работы такого рода агрегатов, а также уменьшить их номенклатуру можно путем использования для электропривода линейного двигателя. Этот вид электродвигателей обеспечивает привод исполнительных устройств возвратно-поступательного движения без кинематического механизма, преобразующего вращение обычного ротативного двигателя в поступательное. Это дает возможность упростить конструкцию приводного механизма, уменьшить потери в передачах и повысить надежность механизма в целом. Кроме того, естественно имеющий место процесс слияния линейного двигателя с исполнительным механизмом

порождает многофункциональность отдельных конструктивных элементов, делая их общими для двигателя и исполнительного механизма. При этом электропривод становится неотъемлемой частью всего устройства. А такой его важнейший узел как электродвигатель должен создаваться узконаправленно – именно для этого конкретного устройства. Неприемлемость в этом случае серийных унифицированных двигателей и необходимость создания в каждом конкретном случае индивидуальной машины с максимально адаптированными к исполнительному механизму параметрами является резервом существенного повышения производительности такого рода устройств.

В данной работе была поставлена задача определения возможности использования в электроприводе конкретного плунжерного насоса линейного двигателя, реализация которой позволила бы приблизительно на 80% улучшить массогабаритные показатели агрегата.

2. Механическая характеристика плунжерного насоса. Выбор линейного двигателя для плунжерного насоса будем проводить, сравнивая тяговые характеристики двигателей различного типа $f_e(x)$ при работе их в составе электронасосного плунжерного агрегата НД 1.0 63/16 А. Очевидно, что необходимым условием выполнения агрегатом своих функций в пренебрежении диссипативными процессами, должно быть равенство

$$f_e(x) = f_\Sigma(x),$$

где $f_\Sigma(x)$ - статическая механическая характеристика, представляющая собой зависимость внешних сил сопротивления от перемещения якоря. Внешними силами для плунжерного насоса будем считать: силы трения $f_{mp}(x)$, силы инерции движущегося плунжера $f_m(x)$, а также силы, обусловленные давлением рабочего тела на плунжер при всасывании $f_{pвс}(x)$ и нагнетании $f_{pнг}(x)$.

Эти силы определяются следующим образом [1].

$$f_{mp}(x) = \pi D_n \cdot l_{упл} \cdot f \cdot p_k,$$

$$f_m(x) = m\frac{d^2x}{dt^2},$$

$$f_{pвс}(x) = p_{вс}(x) \cdot \frac{\pi D_{пл}^2}{4},$$

$$f_{pнг}(x) = p_{нг}(x) \cdot \frac{\pi D_{пл}^2}{4},$$

где D_n – диаметр плунжера, *м*, $l_{упл}$ – длина уплотняемой поверхности, *м*, f – коэффициент трения, p_k – контактное давление, *Па*, m – масса плунжера, *кг*, $p_{вс}(x)$ – давление на плунжер при всасывании, *Па*,

$$\frac{p_{вс}(x)}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} - \left[z_0 + (1+\sigma_1)\frac{V^2}{2g} + \left(\frac{L_{вс}+x}{g} \right) \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{G_{кл}}{f_{кл}\rho g} \right],$$

p_a – давление на поверхности жидкости в резервуаре, *Па*, ρ – плотность перекачиваемой жидкости, *кг/м*^{3}, g – ускорение свободного падения, *м/с*^{2}, z_0 – расстояние от поверхности жидкости в отдающем резервуаре до оси плунжера, *м*, σ_1 – приведенный коэффициент сопротивления всасывающего трубопровода

$$\sigma_1 = \sum_{i=1}^{n} \xi_i \left(\frac{F_{пл}}{f_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \frac{L_i}{d_i} \left(\frac{F_{пл}}{f_i} \right)^2,$$

ξ_i – коэффициент, учитывающий местные сопротивления всасывающего трубопровода, $F_{пл}$ – площадь плунжера, *м*^{2}, f_i – площадь живого сечения участка трубопровода диаметром d_i, *м*^{2}, λ_i – коэффициент, учитывающий потери на трение жидкости о трубу на участке трубопровода с диаметром d_i, L_i – длина участка трубопровода с диаметром d_i, *м*, V – скорость движения плунжера *м/с*, $L_{вс}$ – приведенная длина всасывающего трубопровода, *м*,

$$L_{вс} = \sum_{i=1}^{n} \frac{F_{пл}}{f_i} L_i,$$

$G_{кл}$ – вес тарелки клапана, *Н*, $f_{кл}$ – площадь сечения седла клапана, *м*^{2}, $p_{нг}(x)$ – давление на плунжер при нагнетании, *Па*,

$$\frac{p_{нг}(x)}{\rho g} = \frac{p_k}{\rho g} + z_2 + (\sigma_2 - 1)\frac{V^2}{2g} + \left(\frac{L_{нг} + L_{пл} - x}{g} \right) \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{V_k^2}{2g} + \frac{G_{кл}}{f_{кл}\rho g},$$

p_k – давление на конце нагнетательного трубопровода, *Па*, z_2 – расстояние (по высоте) от оси плунжера до конца нагнетательного трубопровода, *м*, σ_1 – приведенный коэффициент сопротивления нагнетательного трубопровода, $L_{пл}$ – максимальный ход плунжера, *м*, $L_{нг}$ – приведенная длина нагнетательного трубопровода, *м*, V_k – скорость жидкости в конце нагнетательного трубопровода, *м/с*,

$$V_k = 4Q/\pi d_k^2,$$

где Q – номинальная подача, *л/ч*, d_k – диаметр концевого участка трубопровода, *м*.

Таким образом, механическая характеристика, согласующая внешние силы сопротивления с пространственными координатами плунжера, будет определяться следующими выражениями:

при всасывании $f_{\Sigma}(x) = f_{mp}(x) + f_{m}(x) + f_{pвс}(x)$

при нагнетании $f_{\Sigma}(x) = f_{mp}(x) + f_{m}(x) + f_{pнг}(x)$.

Приведенные выше формулы позволяют получить механическую характеристику плунжерного насоса для любых конкретно принятых гидравлических схем и режимов работы. При сравнении же работы электроприводов с линейными электродвигателями различных типов целесообразно рассмотреть так называемую предельную механическую характеристику, то есть механическую характеристику при максимально допустимых давлениях жидкости на плунжер.

При нагнетании это давление $p_{нг}(x)$ берется из основных технических данных для конкретного агрегата. Давление всасывания $p_{вс}(x)$ может быть найдено из выражения для определения допускаемой вакуумметрической высоты всасывания по следующей формуле

$$p_{вс}(x) = p_a - \rho g H_{вс} - \rho V_{вх}^2 / 2,$$

где $H_{вс}$ – допускаемая вакуумметрическая высота всасывания, *м*, $V_{вх}$ – скорость жидкости на входе в насос, *м/с*.

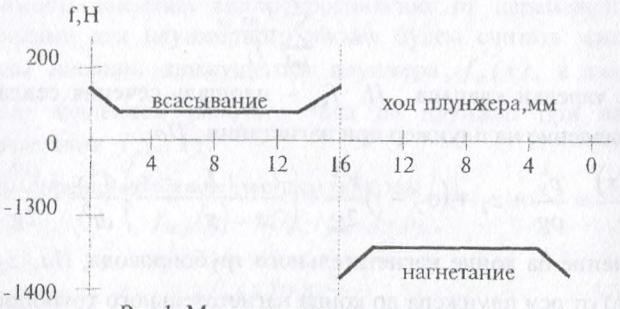


Рис.1. Механическая характеристика

В соответствии с техническими данными для электронасосного плунжерного агрегата НД 1.0 63/16 *А* определяем составляющие внешней силы сопротивления. Сила инерции плунжера, изменяясь в соответствии с законом изменения ускорения по закону косинуса, имеет максимальные значения 0,785 *Н* при $x = 0$ и $x = 0{,}016$ *м*. Сила трения покоя составляет величину 78,5 *Н* при $x = 0$ и $x = 0{,}016$ *м*. Сила трения движения – 19,6 *Н*.

Сила давления жидкости на плунжер при всасывании составляет 57,6 *Н*, а при нагнетании – 1286 *Н*. При этом максимальная скорость движения плунжера равняется 0,118 *м/с*, а средняя – 0,059 *м/с*. Базируясь на полученных данных строим механическую характеристику, внешний вид которой представлен на рис.1.

Анализ этой характеристики позволяет заключить следующее. Во-первых, силы сопротивления, действующие на якорь при всасывании и нагнетании существенным образом отличаются $\left[f_{\Sigma}(x)_{вс} \approx 0{,}1 f_{\Sigma}(x)_{нг}\right]$, то есть механическая характеристика имеет весьма ощутимую несимметрию. Во-вторых, на протяжении каждого из фрагментов (всасывание, нагнетание) полного цикла работы плунжера силы сопротивления остаются практически постоянными. Исключение составляют лишь моменты трогания и остановки плунжера, когда довольно значительно ощущается сила трения покоя.

3. Сравнение различных типов двигателей. Приступая непосредственно к выбору типа двигателя прежде всего отметим, что из известных на сегодняшний день трех типов двигателей – асинхронного, синхронного и постоянного тока, наиболее подходящим, по нашему мнению, представляется последний. Дело в том, что два первых типа для обеспечения относительно небольших перемещений с заданной скоростью движения плунжера, а также регулирования этих параметров потребует достаточно сложных полупроводниковых преобразователей, изменяющих частоту с промышленной на входе до единиц *Гц* на выходе. Кроме того, у этих типов двигателей не высока перегрузочная способность.

Этих проблем нет в линейных двигателях постоянного тока с тиристорным коммутатором [2]. Оставив, пока, за пределами своего внимания работу тиристорного коммутатора, рассмотрим тяговые характеристики трех наиболее характерных конструкций таких двигателей, схемы которых приведены на рис.2.

Здесь в варианте А представлен двигатель электродинамического типа, в варианте В – двигатель электромагнитного типа с неизменным рабочим зазором и полезной силой, направленной параллельно зазору, и, наконец, в варианте С – электромагнитный двигатель с переменным воздушным зазором и полезной силой, действующей вдоль зазора [3]. Для первого варианта сердечники статора и якоря выполнены из немагнитных материалов, а для двух других из ферромагнетика. Размеры подобраны такими, чтобы габариты, а также расход конструкционных и активных материалов были приблизительно одинаковы.

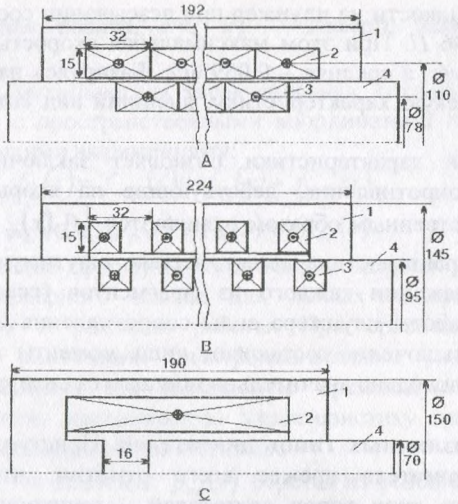


Рис.2. Схемы сравниваемых двигателей:
1 – сердечник статора; 2 – обмотка статора (А – 6 катушек по 480 витков провода сечением 1 мм^2, В – 7 катушек по 180 витков, С – 1 катушка, 3000 витков);
3 – обмотка якоря (А – 5 катушек по 480 витков, В – 6 катушек по 180 витков);
4 – сердечник якоря.

Выбранные для сравнения варианты, в принципе, охватывают все возможные конструкции линейных двигателей, которые могут быть использованы для привода плунжера. Картина была бы совершенно полной, если бы были рассмотрены двигатели, разделенные по длине неферромагнитными прокладками [4], а также двигатели с многократным использованием потока [3]. Но эти двигатели, по нашему мнению, идентичны варианту В и их анализ будет предметом отдельных исследований. Здесь же мы попытаемся ответить на вопрос - какой из двигателей наиболее пригоден для того, чтобы создать тяговую характеристику $f_e(x)$, являющуюся зеркальным отображением статической механической характеристики электронасосного плунжерного агрегата НД 1.0 63/16А, приведенной на рис.1.

Критериями при сравнении будут:

– уровень достигаемой силы;
– качество силы, характеризуемое коэффициентом неравномерности

$$k_н = \frac{f_{max} - f_{min}}{F_{cp}},$$

где $f_{max} - f_{min}$ – максимальное и минимальное значения электромагнитной

силы, развиваемой двигателем при перемещении якоря в рабочей зоне (16 *мм*),

$F_{ср}$ – среднее значение силы;

– электромагнитная инерционность двигателя, характеризуемая в данном случае индуктивностью L.

Для расчета сил использовался энергетический подход, в соответствии с которым

$$f = -\frac{dW_m}{dx}.$$

Для варианта А мгновенное значение сил взаимодействия обмоток якоря и статора при условии постоянства тока в них может быть найдено как

$$f = -i_я \cdot i_p \frac{dM_{я\,p}}{dx},$$

где взаимоиндуктивность $M_{я\,p}$ определяется по методу, основанному на теореме о четырех прямоугольниках [5].

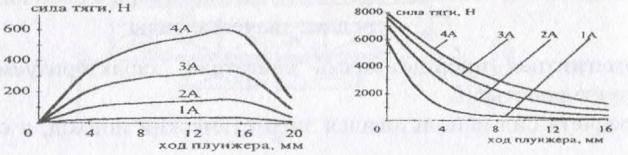
Для двух других вариантов полная энергия, запасенная в магнитном поле устройств при постоянстве тока и изменении положения якоря, а следовательно и потокосцепления от ψ_1 до ψ_2,

$$W_m = \int_{\psi_1}^{\psi_2} id\psi$$

Расчет распределения магнитного поля с учетом реального поперечного сечения и насыщения ферромагнетиков производился методом конечных разностей в соответствии с методикой, изложенной в [6]. В таблице и на рис. 3 приведены численные значения критериев для трех типов двигателей, а также тяговые характеристики $f_e(x)$ для двигателей электромагнитного типа.

Сравнение исследуемых двигателей

Вариант двигателя	$\frac{f_{max}}{f_{min}}$, *Н*	K_H	L,*Гн*	Примечание
А	90/16	0,15	0,018	
В	560/160	0,58	1,22÷0,22	Большее значение соответствует начальным перемещениям (осевое расстояние между однополярными катушками близко к 0)
С	8000/1200	1,9	21÷4	Большее значение соответствует минимальному зазору при минимальной плотности тока



вариант В вариант С

Рис.3. Тяговые характеристики исследуемых двигателей.

Анализируя приведенные результаты цифрового моделирования, приходим к следующим выводам. Электродинамический двигатель, хотя и обладает достаточно однородным характером тяговой силы, а также малой электромагнитной инерционностью, в рассматриваемом классе устройств вряд ли может найти применение вследствие весьма низкого значения тяговой силы. В качестве силовой машины он может быть использован, если плотность тока в обмотках будет в пределах 300 $А/мм^2$. Это либо устройства с применением сверхпроводящих обмоток возбуждения, либо с применением криорезистивных обмоток в импульсных режимах. Но это уже устройства другого класса. За базовый следует принять вариант С. Устранить столь существенный градиент силы тяги, имеющий место в таком двигателе можно двумя путями. Во-первых, разработкой магнитопровода такой конструкции, чтобы проводимость магнитному потоку при перемещении якоря оставалась неизменной. Во-вторых, применяя схему регулированиия МДС, например, такого типа, которые используются для регулирования зазора в электромагнитном подвесе. Проведенный на базе цифрового моделирования анализ показал возможность использования для привода плунжерных насосов линейных тяговых двигателей электромагнитного типа и тем самым улучшения массогабаритных показателей такого рода агрегатов. Для полной адаптации тяговых характеристик такого рода двигателей к механическим характеристикам плунжерных насосов необходимы конструктивные и схемотехнические решения, направленные на обеспечение регулирования силы тяги в зависимости от пространственного положения якоря.

Список литературы: 1. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем./ *Башта Т.М.* М. Машиностроение,1986, 486 с. **2.** *Омельяненко В.И.* Линейные двигатели постоянного тока с тиристорным коммутатором. Харьков, Основа,1994, 76 с. **3.** *Рященцев Н.П.* Электропривод с линейными электромагнитными двигателями. Новосибирск. Наука. 1981, 375 с. **4.** *Ямпольский Ю.Г.* Электрический линейный импульсный двигатель. А.С. 1821876 СССР, Н 02 К 33/00, опубл. 15.06.93. Бюл. N22, 3 с. **5.***Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей. Справочник. Л., "Энергия", 1970, 428 с. **6.** *Милых В.И.* Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин. Электротехника №12, 1982, с. 46-49.

Поступила в редколлегию 15.04.04