

УДК 621.65

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА С
ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ЛИНЕЙНЫМ
АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В ПРИВОДЕ**

Аипов Рустам Сагитович
д.т.н., профессор
заведующий кафедрой электрических машин и
электрооборудования

Валишин Денис Евгеньевич
старший преподаватель кафедры электрических
машин и электрооборудования

Леонтьев Дмитрий Сергеевич
старший преподаватель кафедры электрических
машин и электрооборудования
*Башкирский государственный аграрный
университет, Уфа, Россия*

В статье рассматривается плунжерный насос с
цилиндрическим линейным асинхронным
двигателем (ЦЛАД) в приводе, защищенный
патентом Российской Федерации и математическая
модель привода, составленная на основе уравнения
движения плунжера и механической
характеристики ЦЛАД по дифференциальным
уравнениям Парка-Горева

Ключевые слова: ПЛУНЖЕРНЫЙ НАСОС,
ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД,
НЕПОЛНОФАЗНЫЙ РЕЖИМ,
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ПЕРЕХОДНОЙ
ПРОЦЕСС

UDC 621.65

**MATHEMATICAL MODEL OF THE
PLUNGER PUMP WITH A CYLINDRICAL
LINEAR INDUCTION MOTOR IN THE
DRIVE**

Aipov Rustam Sagitovich
Dr.Sci.Tech., professor
Head of the Department of electrical machinery and
equipment

Valishin Denis Evgenyevich
senior lecturer of the Department of electrical
machinery and equipment

Leontiev Dmitry Sergeyevich
senior lecturer of the Department of electrical
machinery and equipment
Bashkir Agrarian State University, Ufa, Russia

The article deals with a plunger pump with a
cylindrical linear induction motor (CLIM) in the
drive, patented in the Russian Federation and the
mathematical model of the drive, made on the basis
of the equations of motion of the plunger and
mechanical characteristics of CLIM on differential
equations by Park-Gorev

Keywords: PLUNGER PUMP, LINEAR
ACTUATOR, MATHEMATICAL MODEL,
TRANSITION PROCESS

Основными достоинствами плунжерных насосов являются высокие развиваемые давления (0,25...250 МПа), низкая зависимость производительности насоса от напора. Существующие плунжерные насосы имеют ряд существенных недостатков: наличие звена преобразующие вращательное движение ротора электродвигателя вращения в возвратно-поступательное движение плунжерного механизма, что приводит к потерям энергии до 20 %, наличие большого количества соединительных частей уменьшают надежность насоса.

Повышение надёжности, расширение возможностей регулирования подачи, значительное снижение металлоемкости и стоимости плунжерных насосов можно достичь применением цилиндрического линейного

асинхронного двигателя (ЦЛАД) в приводе. ЦЛАД позволяет получить непосредственно поступательное движение, исключив, промежуточный преобразовательный механизм между насосом и двигателем. Кроме того ЦЛАД обладает конструктивной простотой, технологичностью изготовления, дешевизной, надежностью и разнообразием конструктивных решений.

Разработка плунжерных насосов с линейным электроприводом, а также решение проблем коммутации электродвигателя, работающего в импульсном режиме остается актуальной задачей, для решения которой необходимо провести исследования и определить возможности повышения их показателей за счет рационального управления и выбора частоты импульсного питания.

В статье рассматривается плунжерный насос с ЦЛАД в приводе, защищенный патентом Российской Федерации и математическая модель привода, составленная на основе уравнения движения плунжера и механической характеристики ЦЛАД по дифференциальным уравнениям Парка-Горева.

Система уравнений Парка-Горева представлена в координатной оси неподвижной относительно статора ЦЛАД при трехфазном и двухфазном питании электродвигателя. Решение математической модели выполненной в среде визуального моделирования Matlab – Simulink показало о значительном уменьшении пусковых токов при коммутации в импульсном режиме работы ЦЛАД только одной фазы.

Несомненными достоинствами плунжерных насосов являются высокий КПД и возможность подачи жидкости под сколь угодно большим давлением. В то же время невозможность регулирования подачи, сложность соединения с приводным двигателем, большие размеры и ограничивают их эффективное применение на современных высокопроизводительных насосных станциях систем водоснабжения [1].

Производительность плунжерного насоса напрямую зависит от длины хода и частоты вращения кривошипа приводного двигателя. Как правило, между плунжером и электродвигателем вращения присутствуют, так же, понижающий редуктор или клиноременная передача [2].

На рисунке 1 показан плунжерный насос с ЦЛАД в приводе [3], который не имеет перечисленные выше недостатки.

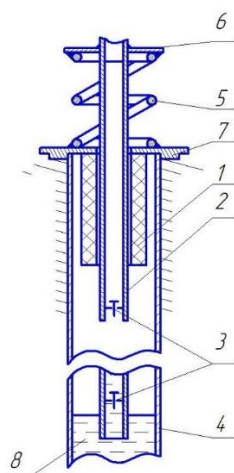


Рисунок 1 Плунжерный насос с ЦЛАД:

1 – статор ЦЛАД; 2 – плунжер-ротор ЦЛАД; 3 – клапаны плунжера;
4 – корпус насоса; 5 – пружина; 6 – фланец; 7 – заглушка; 8 – вода

Плунжерный насос работает следующим образом. При подаче трёхфазной системы питания к статору 1 ЦЛАД, электрический ток в статоре создает бегущее магнитное поле, направленное вверх из скважины. Магнитное поле, взаимодействуя с током, индуцируемом в плунжера-ротора 2, вызывает появление электромагнитной силы двигателя (F_d) приложенное к плунжеру-ротору 2. Под действием силы F_d плунжер-ротор 2 перемещается относительно корпуса 4 и статора 1 ЦЛАД вверх из скважины.

По мере движения плунжера-ротора пружина 5 будет разжиматься, создавая увеличивающую силу сопротивления F_c . При достижении равенства сил $F_d = F_c$ скорость плунжера-ротора будет равна нулю, и

датчик скорости плунжера-ротора в станции управления насосом (на рисунке не показан) включит коммутатор, который обесточивает любую, одну из фаз статора ЦЛАД. Бегущее магнитное поле, создаваемое статором исчезает, следовательно, $F_d=0$. Под действием силы F_c предварительно растянутой пружины 5, плунжер-ротор начинает движение в обратном направлении (в скважину) с возрастающей скоростью. Этому способствует и появление при движении плунжера-ротора электромагнитной силы F'_d при двухфазном питании статора ЦЛАД. После прекращения предыдущей деформации пружина 5 начнёт под действием инерции движущихся масс и силы F'_d деформироваться в другую сторону. В какой-то момент времени кинетическая энергия движущихся масс перейдет в потенциальную энергию сжатой пружины 5. Движение плунжера-ротора прекратится. Датчик скорости отключит коммутатор. Статор ЦЛАД станцией управления подключится к трехфазной системе питания. Появится сила F_d в направлении из скважины. Под действием этой силы и потенциальной энергии деформированной пружины 5 начнется движение плунжера-ротора в противоположную сторону в направлении из скважины. Так как в представленном техническом решении плунжер-ротор ЦЛАД совмещен с трубопроводом для прохода жидкости, последний совершает такое же колебательное движение, как плунжер-ротор. При движении водоподъемной трубы в скважину обратный клапан 3 открывается, а при движении водоподъемной трубы из скважины клапан закрывается. Между нижним клапаном и водой в скважине возникает разреженное пространство, в которое из скважины устремляется жидкостной поток. Далее описанный процесс повторяется. Количество установленных клапанов в водоподъемной трубе определяется глубиной подъема жидкости. Чем больше глубина подъема, тем больше должно быть количество установленных клапанов.

В предлагаемом техническом решении только одна фаза двигателя периодически отключается от источника питания, две оставшиеся фазы остаются подключёнными к источнику питания постоянно. ЦЛАД насоса периодически из трёхфазного режима работы переводится в двухфазный, тем самым уменьшая пусковые токи и улучшая энергетические характеристики. Кроме этого, имеющая место при двухфазном режиме питания ЦЛАД вибрация плунжера-ротора передается водоподъёмной трубе, уменьшая сопротивление жидкости о стенки трубы и повышая эффект погружения в скважину.

Для написания математической модели плунжерного насоса с ЦЛАД в приводе разработана кинематическая схема (рисунок 2).

Система уравнений, описывающих движение плунжера-ротора имеет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_d - F_c - mg - F_{тр}; \\ m\ddot{x} = F'_d - F_c + mg - F_{тр} \end{cases} \quad (1)$$

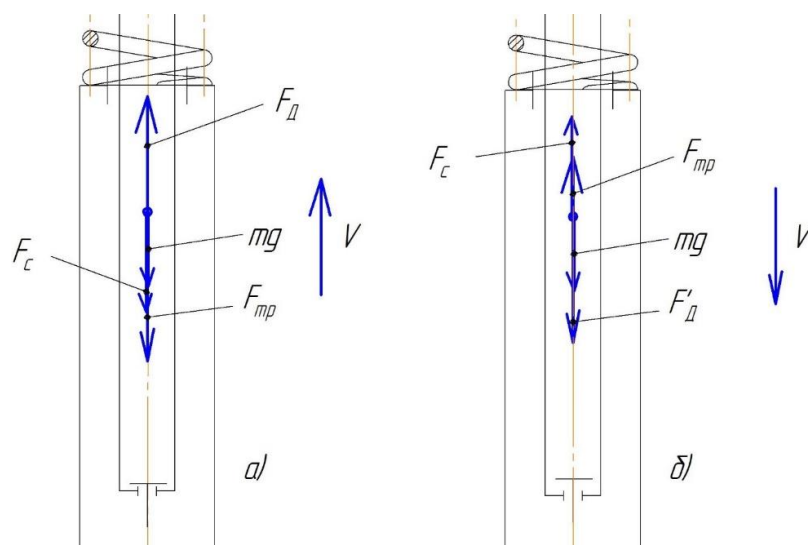


Рисунок 2 Кинематическая схема плунжерного насоса с ЦЛАД в приводе
 а – силы, действующие при движении плунжера из скважины; б – силы, действующие при движении плунжера в скважину:

mg – сила тяжести, определяемая массой плунжера-ротора (m) и ускорением свободного падения (g); $F_{тр}$ – сила сухого и вязкого трения; V – скорость движения плунжера-ротора.

При математическом описании процессов, происходящих в ЦЛАД, составляются уравнения равновесия напряжений обмоток и уравнения равновесия сил на валу электрического двигателя. Выбираемая форма записи этих уравнений должна обеспечить наибольшую простоту и точность исследования различных режимов работы электрической машины. Во многом это определяется выбором системы координатных осей [4].

В теории электромагнитных процессов работы линейных асинхронных двигателей можно рассмотреть три координатные системы [5]:

1) d, q, θ – система неподвижна относительно вторичного элемента (в нашем случае плунжера-ротора);

2) x, y, θ – система неподвижна относительно бегущего электромагнитного поля машины;

3) α, β, θ – система неподвижна относительно статора.

При рассмотрении несимметричных режимов работы электрической машины широко используется ортогональная система α, β, θ неподвижная относительно статора. Ось α при этом совмещается с осью статора, а ось β опережает ее на угол $\pi/2$.

Математическое моделирование электромагнитных процессов ЦЛАД проводилось на основе уравнений Парка-Горева [4]. При этом были приняты общепринятые для подобного моделирования допущения [6].

Система уравнений, описывающая работу ЦЛАД при трехфазном питании статора имеет вид:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dy_{a1}}{dt} &= U_{a1} - \frac{p}{t} v_0 a'_s y_{a1} + \frac{p}{t} v_0 a'_s y_{a2} + \frac{p}{t} v_k y_{b1} \\
 \frac{dy_{b1}}{dt} &= U_{b1} - \frac{p}{t} v_0 a'_r y_{b1} + \frac{p}{t} v_0 a'_r K_s y_{b2} - \frac{p}{t} v_k y_{a1} \\
 \frac{dy_{a1}}{dt} &= -\frac{p}{t} v_0 a'_r y_{a1} + \frac{p}{t} v_0 a'_r K_s y_{a1} + \frac{p}{t} (v_k - v) y_{b1} \\
 \frac{dy_{b1}}{dt} &= -\frac{p}{t} v_0 a'_s y_{b1} + \frac{p}{t} v_0 a'_s K_s y_{b1} - \frac{p}{t} (v_k - v) y_{a1} \\
 U_{a1} &= \frac{2}{3} \left(U_a - \frac{1}{2} (U_b + U_c) \right) \\
 U_{b1} &= \frac{1}{3} (U_b - U_c) \\
 F_{\Delta} &= \frac{2 p^2 v_0 k_r}{3 t^2 s x_s} (y_{a2} y_{b1} - y_{a1} y_{b2})
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $y_{a1}, y_{b1}, y_{a2}, y_{b2}$ – потокосцепления по осям α и β соответственно статора и ротора;

U_a, U_b, U_c – напряжения фаз «А», «В», «С»;

v_0 – синхронная скорость электромагнитного поля ЦЛАД;

v_k – скорость координатной системы, в системе α, β ;

t – полюсное деление обмотки ЦЛАД;

a'_s, a'_r, K_s, K_r – коэффициенты уравнений системы;

s – коэффициент рассеяния магнитного потока;

x_s – индуктивное сопротивление статора.

Система уравнений Парка-Горева для двухфазного режима питания статора ЦЛАД примет следующий вид (отключена фаза «А»):

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dy_{a1}}{dt} &= U_{a1} - \frac{p}{t} v_0 a' y_{a1} + \frac{p}{t} v_0 a' y_{a2} + \frac{p}{t} v_k y_{b1} \\
 \frac{dy_{b1}}{dt} &= U_{b1} - \frac{p}{t} v_0 a' y_{b1} + \frac{p}{t} v_0 a' K_r y_{b2} - \frac{p}{t} v_k y_{a1} \\
 \frac{dy_{a1}}{dt} &= -\frac{p}{t} v_0 a' y_{a2} + \frac{p}{t} v_0 a' K_r y_{a1} + \frac{p}{t} (v_k - v) y_{b2} \\
 \frac{dy_{b1}}{dt} &= -\frac{p}{t} v_0 a' y_{b2} + \frac{p}{t} v_0 a' K_r y_{b1} - \frac{p}{t} (v_k - v) y_{a2} \\
 U_{a1} &= -\frac{1}{3} (U_b + U_c) \\
 U_{b1} &= \frac{1}{3} (U_b - U_c) \\
 F_D &= \frac{3 p^2 v_0 k_r}{2 t^2 S x_s} (y_{a2} y_{b1} - y_{a1} y_{b2})
 \end{aligned} \right\} (3)$$

Математическая модель работы плунжерного насоса с ЦЛАД в приводе решается в среде визуального моделирования Matlab–Simulink [6].

На рисунке 3 приведен вид математической модели в среде визуального моделирования без описания назначения блоков модели.

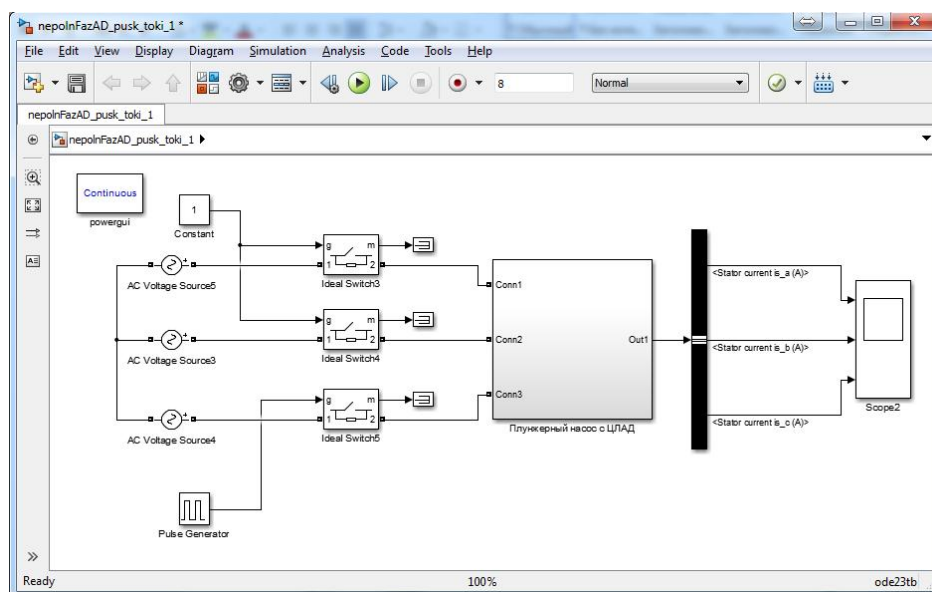


Рисунок 3 Вид математической модели плунжерного насоса с ЦЛАД в среде Matlab – Simulink

На рисунке 4, приведены, как пример, функции силы тока статора от времени, полученные в результате решения математической модели.

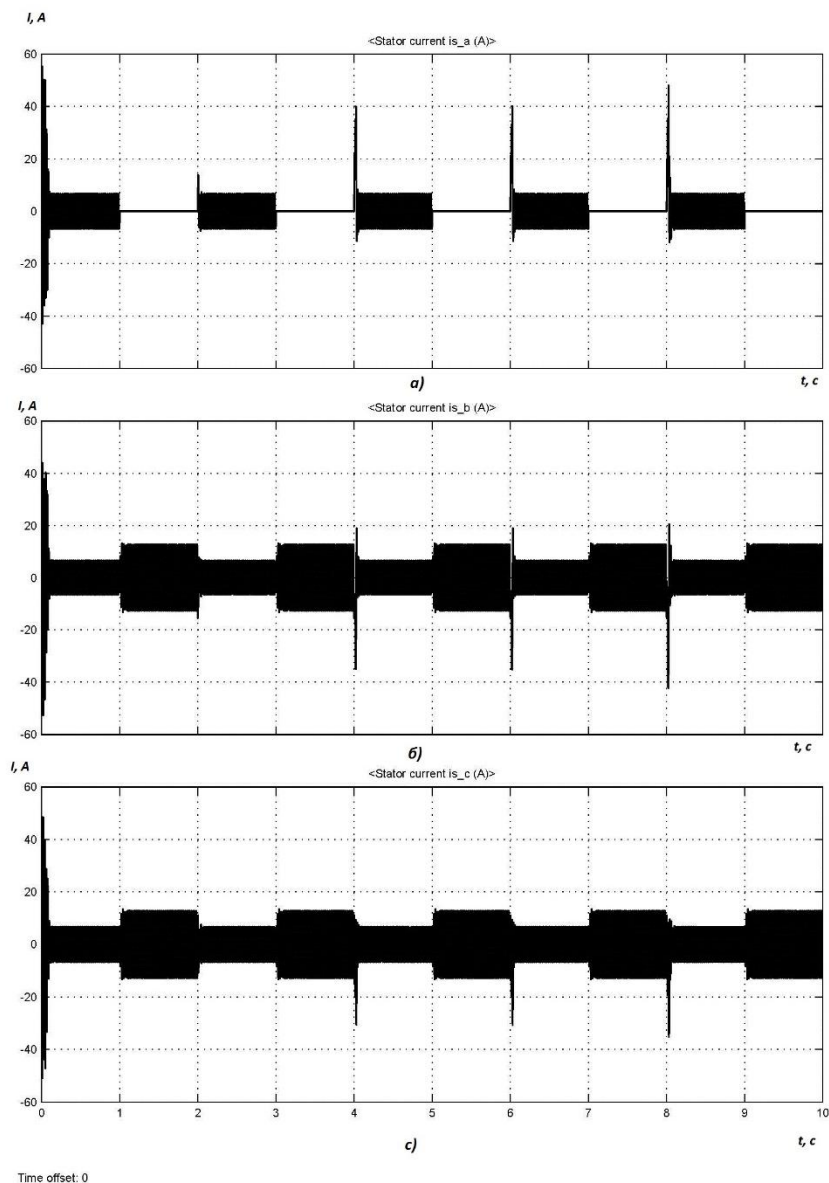


Рисунок 4 Сил тока в фазах ЦЛАД при коммутации:
 а – ток в фазе «А» в функции времени; б, в – токи в фазах «В» и «С» в
 функции времени

Из представленных графиков видно, что при коммутации одной фазы наблюдается практически полное отсутствие пусковых скачков тока, что благоприятно сказывается на работе ЦЛАД.

Проведенные исследования математической модели плунжерного насоса с ЦЛАД показывают хорошую сходимость с результатами исследования на экспериментальной лабораторной установке (рисунок 5).



Рисунок 5 Лабораторная установка плунжерного насоса с ЦЛАД

1 – ЦЛАД; 2 – плунжерный насос

Выводы:

1. Разработанная математическая модель позволяет исследовать электромеханические переходные процессы, включая несимметричные режимы работы ЦЛАД в приводе плунжерного насоса.

2. Коммутация только одной фазы позволяет ослабить переходные процессы по току в десятки раз.

3. Разработанное техническое решение и разработанная математическая модель может быть использовано в инженерной практике создания аналогичных машин.

Список литературы

1. *Гейер В.Г.* Гидравлика и гидропривод [Текст] / В.Г. Гейер, В.С. Дулин, А.Н. Заря: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1991. – 331 с.
2. *Вильнер Я.М.* Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам [Текст] / Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев, Б.Б. Некрасов и др.; под. ред. Б.Б. Некрасова. – Минск: Высшая школа, 1985. – 382 с.
3. Патент №2370671, Российская Федерация, МПК F04B 47/06/ Насосная установка [Текст] / Р.С. Аипов, В.Ф. Гильванов, Д.С. Леонтьев, А.В. Линенко (RU). – №2008130485/06; заявл. 22.07.2008; опубл. 20.10.2009, Бюл. №29. – 4 с.: ил.
4. *Соколов М.М.* Электропривод с линейными асинхронными двигателями [Текст] / М.М. Соколов, Л.К. Сорокин. – М.: Энергия, 1974. – 136 с.
5. *Аипов Р.С.* Линейные электрические машины и приводы на их основе [Текст]/ Р.С. Аипов. – Уфа: БГАУ, 2003. – 201 с.
6. *Аипов Р.С.* Основы построения и теории линейных асинхронных приводов с упругими накопителями энергии [Текст] / Р. С. Аипов. – Уфа: БГАУ, 2006. – 330 с.

References

1. Gejer V.G. Gidravlika i gidroprivod [Tekst] / V.G. Gejer, V.S. Dulin, A.N. Zarja: Uchebnik dlja vuzov. – M.: Nedra, 1991. – 331 s.
2. Vil'ner Ja.M. Spravochnoe posobie po gidravlike, gidromashinam i gidroprivodam [Tekst] / Ja.M. Vil'ner, Ja.T. Kovalev, B.B. Nekrasov i dr.; pod. red. B.B. Nekrasova. – Minsk: Vysshaja shkola, 1985. – 382 s.
3. Patent №2370671, Rossijskaja Federacija, MPK F04V 47/06/ Nasosnaja ustanovka [Tekst] / R.S. Aipov, V.F. Gil'vanov, D.S. Leont'ev, A.V. Linenko (RU). – №2008130485/06; zajavl. 22.07.2008; opubl. 20.10.2009, Bjul. №29. – 4 s.: il.
4. Sokolov M.M. Jelektroprivod s linejnymi asinhronnymi dvigateljami [Tekst] / M.M. Sokolov, L.K. Sorokin. – M.: Jenergija, 1974. – 136 s.
5. Aipov R.S. Linejnye jelektricheskie mashiny i privody na ih osnove [Tekst]/ R.S. Aipov. – Ufa: BGAU, 2003. – 201 s.
6. Aipov R.S. Osnovy postroenija i teorii linejnyh asinhronnyh privodov s uprugimi nakopiteljami jenerгии [Tekst] / R. S. Aipov. – Ufa: BGAU, 2006. – 330 s.