

Система управления скважинным плунжерным насосом с цилиндрическим линейным асинхронным двигателем

Р. С. Аипов, д.т.н., профессор, Д. Е. Валишин, ст. преподаватель, В. С. Вохмин, к.т.н., Е. И. Мухортова, к.т.н., Я. Д. Осипов, к.т.н., С. В. Акчури, к.т.н., ФГБОУ Башкирский ГАУ

Использование в водоснабжении эффективных скважинных плунжерных насосов усложняется наличием промежуточной передачи между плунжером и электродвигателем вращения. Это ограничивает возможности регулирования производительности, увеличивает металлоёмкость и стоимость установки.

Для реализации колебательного движения рабочих органов плунжера СПН возможно применение электромагнитов с упругими элементами. Основным их недостатком является сложность создания колебаний большой амплитуды 0,5–0,7 м и низкой частоты 0,1–0,5 Гц [1].

Повысить КПД, снизить металлоёмкость и стоимость насоса можно за счёт применения в электроприводе цилиндрического линейного электродвигателя. При выборе конструкции электродвигателя особое внимание должно уделяться его энергетическим характеристикам, которые напрямую будут зависеть от выполняемых им задач. Аспекты проектирования и моделирования цилиндрических линейных электродвигателей должны рассматриваться в соответствии с требованиями действующего механизма и характеристиками его движения [2, 3].

Актуальные разработки в области СПН с прямым приводом основаны на применении линейных синхронных и асинхронных электродвигателей с управлением по датчикам положения [4]. Реализация линейного синхронного электропривода в СПН предполагает наличие реверсирования. Принудительное реверсирование привода электрическим способом обуславливает необходимость применения режима противовключения. В этом режиме двигателем из сети потребляется энергия, примерно в два раза превышающая гасимую кинетическую энергию привода. Для исключения ударов плунжера о камеру насоса применяются демпфирующие элементы (проставки) [5, 6].

В предлагаемой конструкции электропривода плунжерного насоса энергозатратный режим противовключения и удары плунжера о камеру насоса исключаются применением совместной работы цилиндрического линейного асинхронного двигателя (ЦЛАД) и упругого накопителя механической энергии (УНМЭ). С энергетической точки зрения такой подход наиболее эффективен. Оснащение ЦЛАД УНМЭ позволяет реализовать энергетически эффективный электропривод колебательного движения, причём разгон рабочего органа в одну сторону осуществляется под действием электромагнитного поля ЦЛАД при трёхфазном питании,

а в обратном направлении — за счёт запасенной энергии в УНМЭ и работы ЦЛАД при двухфазном режиме питания.

Отсутствие потребления энергии при гашении кинетической энергии и её использование при разгоне позволяет уменьшить потребляемую из сети энергию. Накопитель потенциальной энергии — упругий элемент, который вместе с накопителем кинетической энергии — массой (вторичный элемент) — образует колебательную пару. Полное преобразование кинетической энергии в потенциальную и наоборот происходит при частоте собственных колебаний привода [1, 2].

Эффективными накопителями энергии могут быть различные упругие элементы. Из них наибольшее значение имеют цилиндрические винтовые пружины, обеспечивающие стабильность настройки, сравнительно небольшие габаритные размеры и массу, простые в сборке и применении.

Особое значение для работы разрабатываемой конструкции имеет система управления приводом, реализующая энергетически эффективный режим работы насоса и уменьшение пусковых токов электропривода.

Целью исследования является снижение энергетических затрат при применении СПН для водоснабжения из скважин с большой высотой подъёма.

Для достижения поставленной цели в настоящем исследовании решались следующие задачи:

- 1) использование неполнофазного режима работы ЦЛАД в приводе с периодическим отключением одной фазы при трёхфазном питании двигателя;
- 2) разработка математической модели привода скважинного плунжерного насоса на базе ЦЛАД, реализующей периодическое отключение одной фазы при трёхфазном питании двигателя;
- 3) разработка системы управления плунжерным насосом с цилиндрическим линейным асинхронным двигателем, конструкция и режим работы которого обеспечивают снижение энергетических затрат привода.

Материал и методы исследования. Для оценки эффективности работы СПН на базе ЦЛАД разработана математическая модель, позволяющая получить временные зависимости сил, действующих на плунжер, определить положение и скорость плунжера и исследовать взаимосвязи в электроприводе плунжера.

Для математического описания работы СПН использованы дифференциальные уравнения механического движения. Определяющей величиной является зависимость усилия двигателя от его скорости. Направление и начало координат для каждого этапа движения плунжера отсчитываются от крайних положений вторичного элемента ЦЛАД.

Начало отсчёта времени выбирается индивидуально для прямого (вверх) и обратного (вниз) движения плунжера.

Наличие многократного интегрирования в уравнениях обуславливает значительную нелинейность рассматриваемой задачи. Дополнительную сложность вносит различная форма аналитической записи этих уравнений на этапах прямого (при трёхфазном питании ЦЛАД) и обратного движения (в двухфазном режиме питания). Для решения нелинейной динамической системы уравнений использовался пакет объектно-визуального моделирования Simulink (MATLAB). Реализация математической модели привода СПН на базе ЦЛАД в приложении Simulink представлена в ранее опубликованных работах [7–9].

Экспериментальная установка для исследования характеристик СПН на базе ЦЛАД имеет модульную структуру, что позволяет исследовать различные типы ЦЛАД, использовать плунжеры разных диаметров и упругие элементы с различными характеристиками.

Система управления позволяет реализовать необходимые схемы коммутации для получения различных режимов работы ЦЛАД, в том числе работу двигателя с трёхфазным и двухфазным питанием, а также обеспечить автоколебательный режим или режим вынужденных колебаний с управлением работой ЦЛАД по времени и положению плунжера.

Для реализации неполнофазного режима работы СПН на базе ЦЛАД в приводе применяется импульсное управление ЦЛАД на основе программируемого логического контроллера, реализующего периодическое отключение одной из фаз индуктора от сети.

На рисунке 1 представлена структурная схема системы управления СПН на базе ЦЛАД в приводе.

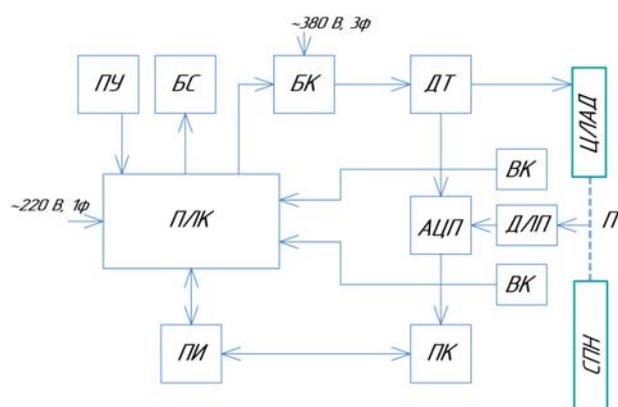


Рис. 1 – Структурная схема системы управления СПН на базе ЦЛАД в приводе:

АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БК – блок коммутации; БС – блок сигнализации; ВК – выключатель концевой; ДЛП – датчик линейного положения; ДТ – датчик тока; ПЛК – программируемый логический контроллер; ПИ – преобразователь интерфейсов; ПК – персональный компьютер; ПУ – пульт управления; П – плунжер (вторичный элемент).

Функциональное назначение основных блоков системы управления:

1) программируемый логический контроллер (ПЛК) обеспечивает заданный режим работы ЦЛАД;

2) блок сигнализации (БС) располагается на панели управления и служит для индикации режимов работы;

3) преобразователь интерфейсов (ПИ) RS-485/USB связывает ПЛК с персональным компьютером (ПК) и необходим для настройки контроллера и диспетчеризации работы системы управления;

4) блок коммутации (БК) осуществляет подключение ЦЛАД к источнику питания по заданной схеме, т.е. в определённые моменты времени производит отключение одной из фаз трёхфазной системы питания. Тем самым обратный ход плунжера насоса (реверс) осуществляется при двухфазном питании, т.е. в неполнофазном режиме работы.

Блок коммутации выполнен на базе программируемого реле с поддержкой аналоговых сигналов для локальных систем ОВЕН ПР114, имеющего четыре аналоговых входа и до восьми дискретных выходов, позволяющего управлять также твердотельными реле (ТТР). Твердотельные реле серии HDH-12044.ZD3 предназначены для коммутации цепей питания мощных нагрузок в однофазных или трёхфазных сетях.

ТТР данной серии характеризуются: максимальным допустимым током нагрузки до 120 А; широким диапазоном коммутируемого напряжения 40–440 В; минимальными коммутационными помехами при переключении. Низкий уровень коммутационных помех обусловлен тем, что переключение реле происходит при переходе напряжения через нулевой уровень. Это позволяет уменьшить начальный бросок тока, снизить уровень создаваемых электромагнитных помех и, как следствие, увеличить срок службы коммутируемых нагрузок.

Для коммутации трёхфазной нагрузки установлены три ТТР в каждой из трёх фаз. Это повышает надёжность коммутации, а следовательно, и всей системы управления в целом;

5) с помощью потенциометрического датчика линейного положения (ДЛП) «Gefran» LT-M-0500-s производится определение положения плунжера. Позиционирование положения плунжера необходимо для расширения диапазона регулирования работы СПН.

Принцип работы датчика основан на изменении величины сопротивления встроенного переменного резистора в зависимости от положения штока относительно корпуса датчика, что в свою очередь определяется его линейным перемещением. С выхода датчика перемещения снимается напряжение, пропорциональное перемещению. Предельное измеряемое линейное перемещение для данного датчика составляет 500 мм. Максимальному перемещению соответствует напряжение 10 В на выходе

датчика. Следовательно, перемещению 10 мм соответствует напряжение на выходе 0,2 В.

При включении установки плунжер начинает двигаться возвратно-поступательно с переменным ускорением. При этом с выхода датчика можно снимать временную зависимость напряжения, пропорциональную положению плунжера. Изменения напряжения через АЦП заносятся в память компьютера. Затем осуществляется перевод полученных временных зависимостей напряжения в соответствующие им зависимости перемещения, скорости и ускорения плунжера;

6) выключатели концевые (ВК) срабатывают при заданной степени сжатия упругих накопителей механической энергии. Максимальный показатель степени сжатия упругих накопителей определяется по результатам математического моделирования;

7) для снятия зависимостей тока индуктора ЦЛАД и определения положения плунжера от времени экспериментальная установка для исследования характеристик СПН на базе ЦЛАД в приводе была оснащена следующим комплектом измерительного оборудования: датчик тока, датчик линейного положения, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), подключённый к персональному компьютеру.

Сигналы с датчиков регистрировались АЦП – многоканальным осциллографом ACUTE серии DS-1000 (модель DS-1102), позволяющим фиксировать сигнал с датчиков в режиме реального времени на мониторе компьютера, запоминать и конвертировать сигнал для дальнейшей обработки с возможностью последующего экспорта всех данных на внешнюю память.

Устройства серии DS-1000 представляют собой портативные цифровые запоминающие осциллографы (ЦЗО или DSO), подключаемые через порт USB-2.0 к персональному компьютеру или ноутбуку. Для работы АЦП на ПК необходимо установить специализированное программное обеспечение;

8) для контроля тока использовались датчики тока (ДТ) на основе эффекта Холла фирмы Honeywell CSLA1CF.

Результаты исследования. Исследование математической модели направлено на установление влияния параметров электропривода СПН на энергоэффективность его работы, в том числе при неполнофазном режиме работы ЦЛАД.

Исследование проводили со следующими параметрами схемы замещения ЦЛАД и водонасосной установки (по техническим паспортным данным двигателя, предоставленным заводом-изготовителем): $R_1=0,5$ Ом, $X_1=1$ Ом, $X_2'=0,1$ Ом, $X_m=5$ Ом, $R_2'=1$ Ом, $V_0=3,6$ м/с и полюсное деление $\tau=0,036$ м, число пар полюсов $p=6$, масса плунжера – $m_p=3,875$ кг; диаметр плунжера – $D_p=20$ мм; диаметр трубопровода – $D_t=20$ мм; диаметр всасывающего трубопровода – $D_{твсас}=20$ мм; плотность воды – $\rho_0=1000$ кг/м³.

Токи, возникающие при пуске, реверсе, торможении, изменении скорости, сбросе и набросе нагрузки, существенно превышают номинальные значения (рис. 2). По этой причине выделяющиеся в двигателе потери оказываются весьма значительными и существенно влияют на энергетические показатели работы электропривода, а также вызывают его дополнительный нагрев [8]. Постоянная коммутация фаз негативно влияет на ресурс ЦЛАД [9].

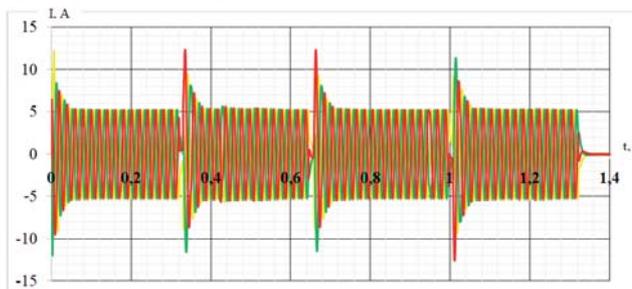


Рис. 2 – Ток в трёх фазах ЦЛАД при работе в режиме реверса

Особенно большое значение потери электроэнергии в переходных процессах имеют в ЦЛАД, для которого режим реверса является основным.

При моделировании работы СПН в режиме реверса бросок тока составил $2-2,2 \cdot I_{ном}$. В режиме коммутации только одной фазы ЦЛАД (рис. 3) бросок составил не более $1,62 \cdot I_{ном}$, т. е. наблюдается снижение пусковых токов по амплитуде, как минимум на 19%.

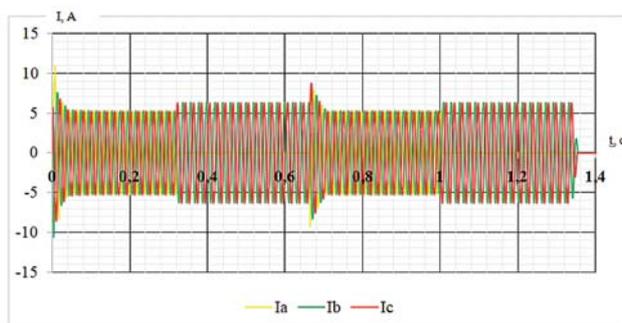


Рис. 3 – Ток в трёх фазах при коммутации только фазы А

Полученные осциллограммы тока, потребляемого индуктором ЦЛАД (рис. 4), подтверждают снижение пусковых токов как по амплитуде – на 19%, так и по продолжительности – на 17%.

В качестве показателя экономичности энергопотребления для насосов был выбран КПД, характеризующий отношение полезной мощности насоса к мощности на приводном валу. На рисунке 5 для сравнения представлен график зависимости КПД от напора для различных насосов (ЭЦВ 4-1,5-50). КПД СПН предлагаемого привода имеет более высокие значения в широких пределах, чем КПД насосов центробежного действия.

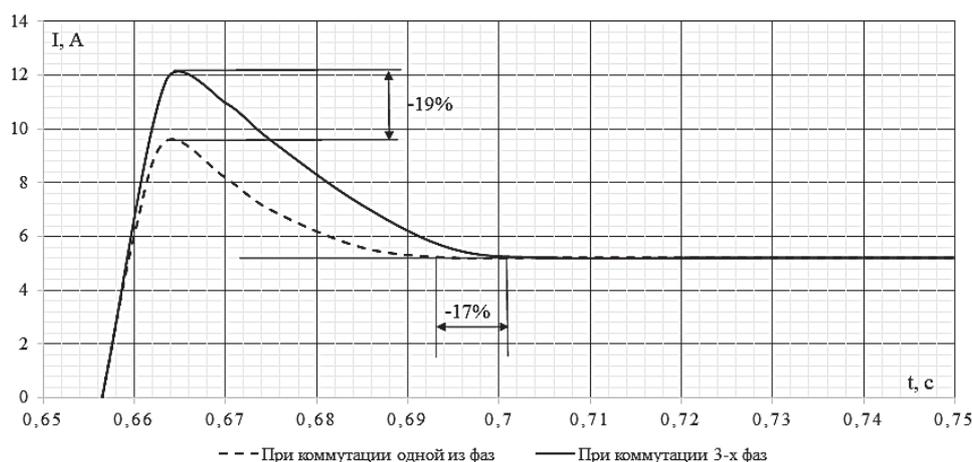


Рис. 4 – Ток при коммутации всех трёх фаз и при коммутации только фазы А

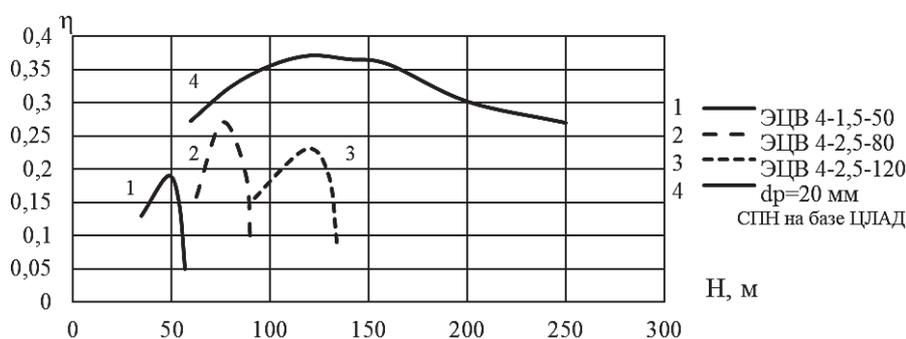


Рис. 5 – КПД различных насосов в зависимости от напора

Выводы

1. Анализ результатов собственных исследований и исследований других авторов показал, что предлагаемая конструкция скважинного плунжерного насоса с цилиндрическим линейным асинхронным двигателем в приводе с периодической коммутацией его фазы обладает научной новизной. Оригинальность технического решения защищена патентом РФ [10].

2. Исследование математической модели показало, что работа ЦЛАД в неполнофазном режиме при обратном ходе плунжера СПН позволяет уменьшить пусковые токи до 19% по амплитуде и до 17% по продолжительности. Проведённое исследование показало, что предложенная конструкция и работа ЦЛАД в неполнофазном режиме в приводе СПН обеспечивают значительное повышение энергетической эффективности насосного оборудования: установлено, что максимальный КПД СПН на базе ЦЛАД составляет 0,37 (рис. 5). Наиболее эффективен диапазон работы с производительностью от 0,8 до 1,4 м³/ч, в этом диапазоне КПД составит не менее 0,33.

3. Проведено экспериментальное исследование, в результате которого получены временные зависимости фазного тока индуктора ЦЛАД и положения плунжера. Математическая обработка результатов исследования показала, что расхождение расчётных и экспериментальных данных по положению

плунжера не превышает 7,7%, а по току — 12,5%, что позволяет считать снятые экспериментальные зависимости с достаточной точностью соответствующими данным теоретических исследований, а разработанную математическую модель — адекватно отражающей физические процессы.

Литература

1. Аипов Р.С. Линейные электрические машины и приводы на их основе: учебное пособие. Уфа: БГАУ, 2003. 201 с.
2. Линенко А.В. Линейные асинхронные электроприводы сложного колебательного движения для технологических машин АПК. Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. 184 с.
3. Соколов В.В. Цилиндрические линейные асинхронные двигатели для привода погружных плунжерных насосов: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2006. 135 с.
4. Yarullin R., Aipov R., Gabitov I., Linenko A., Akchurin S., Safin R., Mudarisov S., Khasanov E., Rakhimov Z., Masalimov I. Adjustable Driver of Grain Cleaning Vibro-Machine with Vertical Axis of Eccentric Masses Rotation / R. Yarullin, R. Aipov, I. Gabitov, A. Linenko, S. Akchurin, R. Safin, S. Mudarisov, E. Khasanov, Z. Rakhimov, Z. Rakhimov and I. Masalimov // Journal of Engineering and Applied Sciences, 13, 2018, pp. 6398–6406.
5. SHANKS, David S. Linear pumping system and methods for controlling the same. U.S. Patent Application No 15/432,542, 2018.
6. ETTER, Nathan; GARRETT, David L.; WILLIAMS, Gary. Systems and Methods for Operating a Linear Motor to Prevent Impacts with Hard Stops. U.S. Patent Application No 15/975,926, 2018.
7. Аипов Р.С., Валишин Д.Е. Математическая модель линейного асинхронного привода плунжерного насоса с периодической коммутацией фазы источника трёхфазного напряжения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. № 4. С. 13–20.
8. Аипов Р.С., Валишин Д.Е. Исследование привода скважинного плунжерного насоса на базе ЦЛАД с неполнофазным режимом работы // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (43). С. 43–49.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

9. Linenko A.V., Aipov R.S., Yarullin R.B., Gabitov I.I., Tuktarov M.F., Mudarisov S.G., Kabashov V. Yu, Kamalov T.I., Gilvanov V.F., Khalilov B.R. Experimental Vibro-Centrifugal Grain Separator with Linear Asynchronous Electric Drive / A. V. Linenko, R. S. Aipov, R. B. Yarullin, I. I. Gabitov, M. F. Tuktarov, S. G. Mudarisov,, V. Yu. Kabashov, T. I. Kamalov, V. F. Gilvanov, B. R. Khalilov // Journal of Engineering and Applied Sciences, 13, 2018, pp. 6551 – 6557.
10. Пат. № 2578746, Российская Федерация, МПК F04В 47/06, F04В 17/04/ Насосная установка / Р.С. Аипов, Д.Е. Валишин, Д.С. Леонтьев (RU). № 2015106455/06,; заявл. 25.02.2015; опубл. 27.03.2016. Бюл. № 9. 5 с.