

УДК 62-503.5
DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28219

Детально розглянуті конструкції випробувального стенду двохпоточної гідрооб'ємно-механічної трансмісії в цілому, системи керування, функції програмного продукту, що застосовувався, а також прилади для збору інформації. Досліджено вплив крокового двигуна в якості виконавчого елемента системи керування об'ємною гідромашиною з гідромеханічним керуванням на основні показники роботи трансмісії. Наведено та проаналізовано отримані експериментальні залежності

Ключові слова: трансмісія, керування, кроковий електропривід, датчик крутного моменту, індуктивний датчик, порошкове гальмо

Подробно описаны конструкции испытательного стенда двухпоточной гидрообъемно-механической трансмиссии в целом, системы управления, функции применяемого программного продукта, а также приборы для сбора информации. Исследовано влияние шагового двигателя, в качестве исполнительного элемента системы управления объемной гидромашиной с гидромеханическим управлением, на основные показатели работы трансмиссии. Приведены и проанализированы полученные экспериментальные зависимости

Ключевые слова: трансмиссия, управление, шаговый электропривод, датчик крутящего момента, индуктивный датчик, порошковый тормоз

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХПОТОЧНОЙ ГИДРООБЪЕМНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

В. Б. Самородов

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*

E-mail: vadimsamorodov@mail.ru

Н. А. Митцель

Аспирант*

E-mail: mittsel_nicholay@mail.ru

*Кафедра "Автомобиле- и тракторостроения" Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт" ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

1. Введение

Кафедра "Автомобиле- и тракторостроения" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" является ведущей в Украине в области разработки и исследования тракторных безступенчатых гидрообъемно-механических трансмиссий (ГОМТ). В текущем году в рамках подготовки диссертационных работ научными сотрудниками кафедры, был разработан и смонтирован экспериментальный стенд исследования работы ГОМТ. Авторами

данной статьи был внесен основополагающий вклад как в разработку идеологии стенда, так и в непосредственное изготовление его конструктивных и вспомогательных элементов, измерительной аппаратуры, управляющих устройств. На рис. 1 представлена кинематическая схема и места подключения датчиков в исполнении стенда с дифференциалом "на выходе".

Стоит отметить, что стенд является переналаживаемым, это свойство позволяет проводить исследования для трансмиссий типа с дифференциалом "на входе", "на выходе" и отдельно исследовать работу

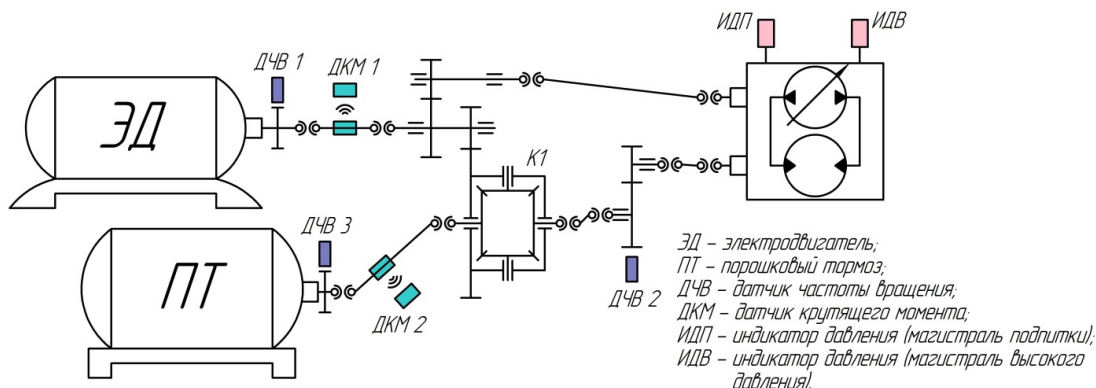


Рис. 1. Кинематическая схема стенда ГОМТ с дифференциалом "на выходе"

гидрообъемной передачи (ГОП), как в моноблочном так и в раздельном исполнении гидромашин. На рис. 2 показан внешний вид стенда.

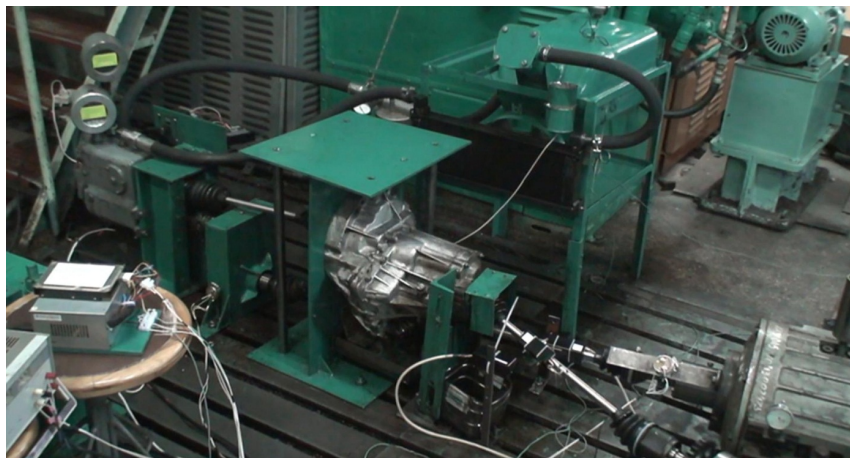


Рис. 2. Внешний вид экспериментального стенда

На данный момент в ВУЗах Украины не существует аналогов подобной установки, что делает проведенное исследование высоко актуальным и востребованным с научной и практической точки зрения.

2. Анализ литературных источников и постановка проблемы

Ограниченное количество отечественной литературы, в которой детально были бы описаны системы управления гидрообъемными насосами/моторами в составе тракторной трансмиссии, ее свойства, возможные варианты конструкции, их преимущества и недостатки, методы расчета и прочее, связана в первую очередь с тем, что украинская промышленность пока не выпускает моделей тракторов с ГОМТ. Ведущим украинским предприятием, изготавливающим аксиально-поршневые машины, является компания "Гидросила ГРУП". Модульное подсоединение гидрораспределителя позволяет присоединять системы управления различного типа: гидромеханическую пропорциональную, электрическую 3-х позиционную, гидравлическую пропорциональную и электрическую пропорциональную [1, 2]. Гидравлическому пропорциональному управлению аксиально-поршневых машин посвящены работы [3, 4].

Зарубежные литературные источники в большинстве своем представлены каталогами продукции фирм производителей, информация в которых сводится к габаритным и присоединительным размерам узлов и их основным характеристикам. В работах [5, 6] приведены математические модели работы пропорциональных клапанов в составе аксиально-поршневой машины.

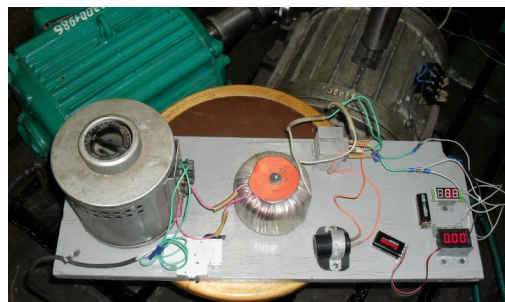
На стенде были использованы два комплекта гидравлических машины с гидромеханическим управлением в моноблочном исполнении фирмы GTN Hydraulics модели 3K10P090 (33 см. куб.) с регулируемым гидронасосом и нерегулируемым гидромотором.

Максимально приблизить работу стенда к режимам работы реального трактора с ГОМТ удалось, используя

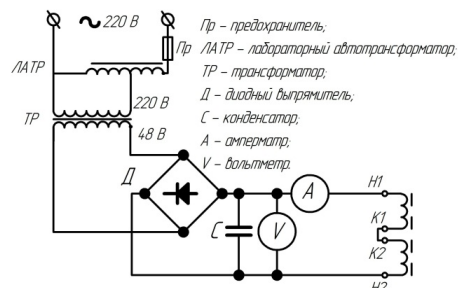
в качестве нагружающего устройства порошокый нагрузочный тормоз ПТ-100 с регулируемым источником питания. На рис. 3, а показан внешний вид источника питания, на рис. 3, б – его принципиальная электрическая схема.

Применение ручного гидромеханического пропорционального управления наклонной шайбой насоса может позволить с высокой точностью исследовать статические режимы работы ГОМТ. Однако, уже в процессе первых испытаний были замечены вибрации на рукоятке управления, а при имитировании сопротивления движению нагрузочным устройством, отмечалось увеличение прикладываемого усилия к рукоятке, а иногда даже выбивание ее в значение параметра регулирования $e = -1$, что соответствует нулевому значению скорости выходного вала. Помимо этого главным недостатком данной

конструкции стал тот факт, что невозможно ручным управлением с высокой точностью воссоздать процесс разгона и торможения по заданным временным зависимостям, а оператор должен постоянно находиться вблизи вращающихся валов и магистрали высокого давления.



а



б

Рис. 3. Регулируемый источник питания порошокого нагрузочного тормоза: а – внешний вид источника питания; б – принципиальная электрическая схема

Опираясь на результаты первых испытаний, техническое задание и специфику самой установки к системе управления ГОМТ были предъявлены следующие требования:

1. Максимальная приближенность к управлению ГОМТ на реальном тракторе.

2. Четкое позиционирование наклонной шайбы насоса и надежное удержание ее в заданном положении.

3. Возможность воспроизведения всех типов линейных и нелинейных законов управления.

4. Минимальная скорость срабатывания и легкость монтажа на стенде.

5. Возможность работы оператора на безопасном удалении от стенда.

3. Цель и задачи исследования

Проведенные исследования имели целью установить степень пригодности шагового электропривода для управления регулируемой гидрообъемной машиной на тракторе. Установить будут ли ему присущи такие проблемы как проскальзывание ротора, какую минимально устойчивую угловую скорость поворота он сможет реализовать, будут ли замечены рывки на выходном валу либо скорость будет изменяться плавно.

Для достижения поставленной цели решались задачи:

- обеспечение максимальной точности позиционирования наклонной шайбы гидромашины и удержание ее в текущем положении при изменении значения внешней нагрузки;

- определить наличие связи между значением нагрузки, прикладываемой к выходному валу, и ступенчатым характером изменения его скорости, а также длительностью закона управления.

4. Материалы и методы исследования

4. 1. Устройство шагового электропривода и приборы фиксации результатов

Шаговый привод, как недорогая альтернатива сервоприводу, наилучшим образом подходит для автоматизации отдельных узлов и систем и широко применяется в станкостроении и робототехнике. Один из способов управления шаговым приводом описан в [7], пути увеличения точности позиционирования, а также применения шагового двигателя в системах с обратной связью раскрыты в [8], алгоритм программирования микроконтроллеров шагового двигателя описан в [9].

Составляющими элементами шагового электропривода (рис. 4) являются шаговый двигатель FL86STH80-4208A (1), микроконтроллер (2), который осуществляет связь с компьютером, источник питания NES-100-48 (3), драйвер CNC 4.5A (4).

Для сбора данных был применен внешний модуль АЦП E14-140M (рис. 5) и программа LGraph2, предназначенная для регистрации, визуализации и обработки аналоговых сигналов, записанных с помощью измерительных плат или модулей АЦП производства ООО "Л Кард".

На выходном валу (рис. 1) были установлены индуктивный датчик угловой скорости ИДС и датчик крутящего момента оригинальной конструкции, передающий сигнал по радиоканалу (рис. 6), состоящий из передатчика и приемника.

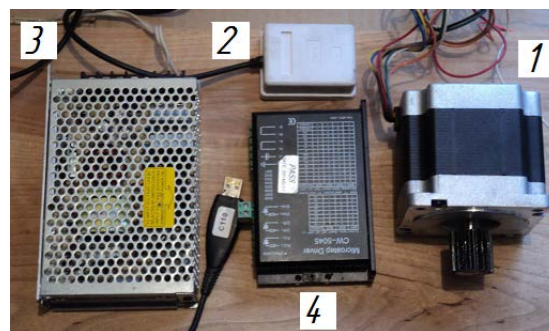


Рис. 4. Компоненты шагового электропривода



Рис. 5. Внешний модуль АЦП E14-140M с клеммником

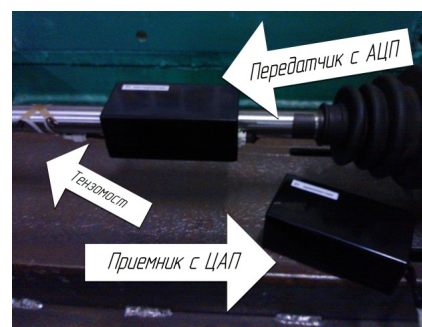


Рис. 6. Датчик крутящего момента

Для минимизации влияния атмосферных факторов на погрешность измерений до и после испытаний валы с датчиками крутящего момента подвергались тарировке на специально разработанном приспособлении.

4. 2. Программный продукт для управления шаговым электроприводом

Удобство работы и широкий перечень возможностей управления были обеспечены программным продуктом "Control", разработанным в свободной среде Lazarus для компилятора Free Pascal Compiler. Эта программа позволила реализовать весь потенциал шагового электропривода, получить высокую наглядность, легкость доступа к сохраненным файлам-отчетам, а также использовать законы управления, построенные в среде MathCad.

Программа Control имеет четыре основных вкладки: Статика, Динамика, Настройки и Реальное время. Работа с программой начинается с вкладки "Настройки". Оператору ПК необходимо подключить устройство управления шаговым двигателем к USB-порту компьютера. Необходимо выбрать порт, к которому подключено устройство управления. Параметры коммуникации

остаются неизменными. Кнопка “Тест” служит для проверки наличия связи с устройством управления (рис. 7).

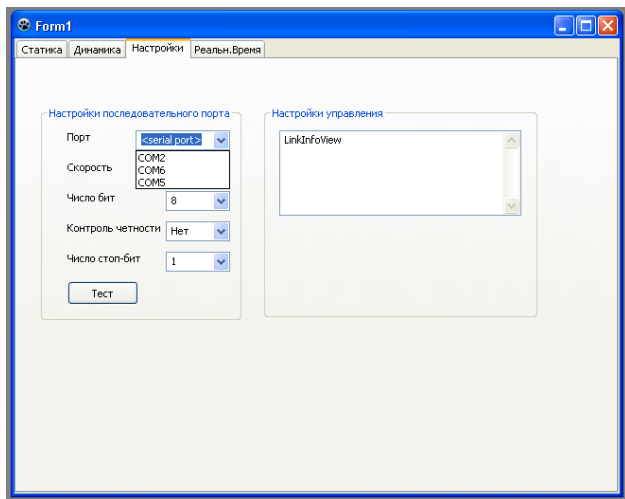


Рис. 7. Вкладка “Настройки” программы Control

Вкладка “Статика” (рис. 8) является базовой, если привод смонтирован на новую гидромашину и данные о калибровке, угле между положениями (-1) и (+1) наклонной шайбы, отсутствуют. Данные о калибровке рекомендуется сохранять, в этом случае при каждом новом включении программы привод сам определит крайние положения и рассчитает параметр регулирования (скольким шагам соответствует $e = -1$, скольким $e = 0$ и т. д.).

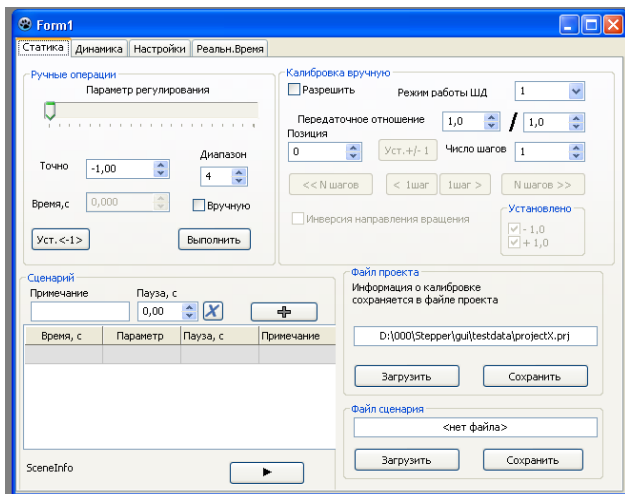


Рис. 8. Вкладка “Статика” программы Control

На вкладке “Статика” возможно создавать “Сценарий” работы, записывать его и неоднократно воспроизводить. Суть работы “по-сценарию” заключается в том, что оператор задает набор характерных точек в виде таблицы, в которой указывает время, за которое шаговый электропривод должен выставить нужный параметр регулирования, сам параметр регулирования в диапазоне $-1...+1$ с точностью до сотых, и длительность паузы – время, на протяжении которого будет удерживаться заданный параметр регулирования. Таблица сценария может иметь до 30 строк вклю-

чительно. Использовать сценарий очень удобно при исследовании статических режимов работы ГОМТ и при наборе статистической информации, когда необходимо многократное повторение стандартного испытания.

Стоит отметить, что после окончания работы перед выключением питания необходимо нажимать кнопку “Уст. -1”, по её нажатию система автоматически вернет наклонную шайбу в положение $e = -1$, это избавит оператора от необходимости проведения калибровки при следующем включении.

На вкладке “Динамика” (рис. 9) имеется возможность задать закон управления импортом данных из среды MathCad либо вручную. Поддерживается ввод неограниченного количества точек. Над введенной неупорядоченной последовательностью точек (e,t) программа проводит регрессию по методу наименьших квадратов (МНК). Полученная аппроксимация значений представляет собой полином 3-й степени. Коэффициенты полинома отображаются внизу графика. На рис. 9, а представлен линейный закон, построенный в программе Control, на рис 9, б – нелинейный закон, импортированный из среды MathCad.

При этом, если загружен выбранный диапазон, время перемещения вычисляется исходя из формулы полинома. Если начальное значение параметра меньше конечного, используется полином, рассчитанный для восходящей ветви, если начальное значение параметра больше конечного – используется нисходящая ветвь. Для вычисления времени по заданной функции $e(t)$ используется решение нелинейного уравнения методом Ньютона [10].

Программа построена таким образом, что представление зависимости $e(t)$, а, следовательно, и полином – разное при движении от -1 до $+1$ (“восходящая” ветвь) и при движении от $+1$ до -1 (“нисходящая” ветвь). Для корректной работы пользователь должен задать обе ветви характеристики. В общем случае эти ветви могут не обладать свойствами симметрии. Для случая симметричной характеристики имеется возможность задать половину (“восходящую” ветвь) и нажать кнопку “Дополнить”, тогда программа построит нисходящую ветвь, симметричную введенной пользователем относительно оси, проходящей через максимальное значение времени, определенной в “восходящей” ветви кривой. При этом в нижней части графика будут видны коэффициенты полиномов для обеих ветвей зависимости (рис. 10).

Точность вычисления времени по значению параметра регулирования составляет половину шага таймера контроллера управления – 64 мкс. Для поиска начального приближения используется поиск интервала, в котором находится значение параметра. Данный метод применим для функциональных зависимостей, имеющих монотонное поведение в интервалах таблично задаваемых значений.

При перемещениях органа управления, шаговый привод управляется импульсами. Импульсы имеют постоянный период следования для равномерных перемещений, применяемых при калибровке, установке начального положения и при линейной характеристике регулирования, и переменный для нели-

нейной характеристики. В последнем случае расчет траектории происходит по следующему алгоритму:

1. Задаем начальное и конечное значения параметра p_0, p_1 ;
2. Вычисляем $p_{i+1} = G(F(p_i \pm 1))$, где $G(p)$, $F(p)$ – взаимнообратные численные соотношения между количеством шагов и значением параметр регулирования, полученные при калибровке;
3. Вычисляем методом Ньютона значения времени, соответствующие значениям параметров, т.е. находим корни уравнений $p_i = E(t_i)$, $p_{i+1} = E(t_{i+1})$;
4. Вычисляем интервал времени между импульсами, $dt = |t_i - t_{i+1}|$;
5. Переводим интервал в число импульсов таймера контроллера шагового привода. Один импульс таймера = 128 мкс.;
6. Повторяем п. 2–5 до тех пор, пока не достигнем конечного значения p_1 .

Вкладка “Реальное время” (рис. 11) представляет собой набор средств для задания последовательности перемещений по заданным диапазонам, т.е. для “сборки” закона управления при неповторяющихся изменениях. Для этого время работы привода разделено на интервалы, в течение которых выполняется перемещение регулирующего органа по законам, загруженным не вкладке “Динамика”. При вводе значений автоматически обеспечивается:

1. Равенство конечного значения параметра и начального значения в следующем интервале;
2. Автоматический расчет времени перемещения при наличии необходимых данных, т.е. все ячейки таблицы в строке должны быть заполнены, а кроме того выбранный диапазон должен быть задан и корректно отображаться на вкладке “Динамика”.

Нажатие кнопки “Старт” запускает вычисление траектории параметра регулирования, преобразование их в команды контроллера и последующую загрузку этих команд в контроллер. Ход выполнения отображается индикатором.

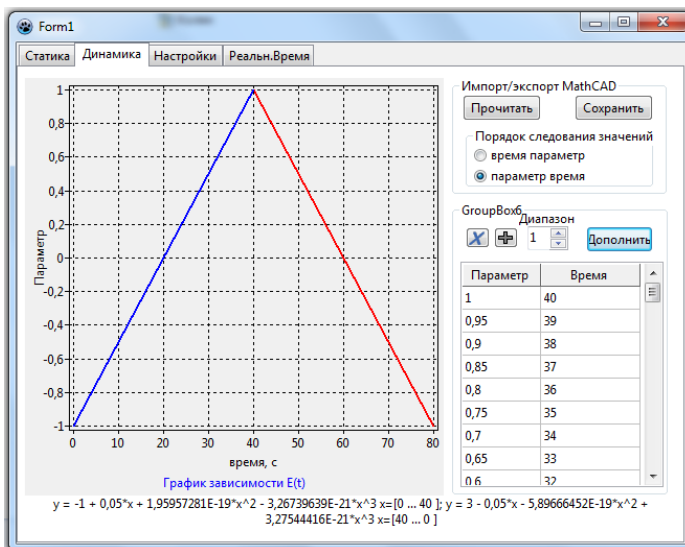


Рис. 10. Закон управления в случае симметрии “восходящей” и “нисходящей” ветвей

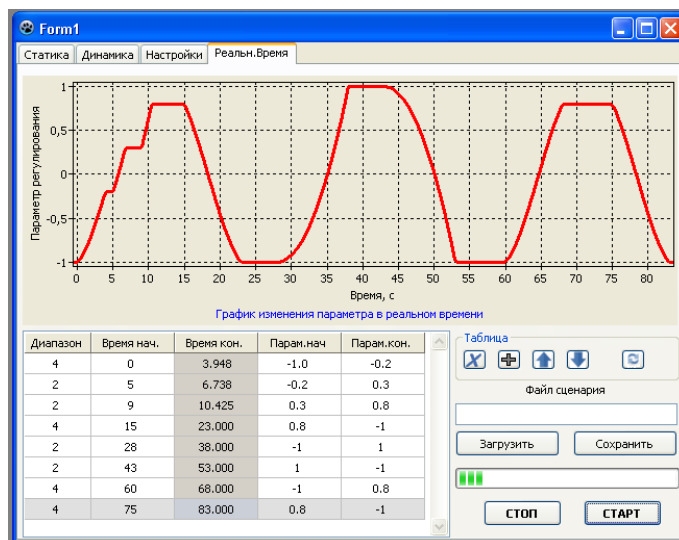
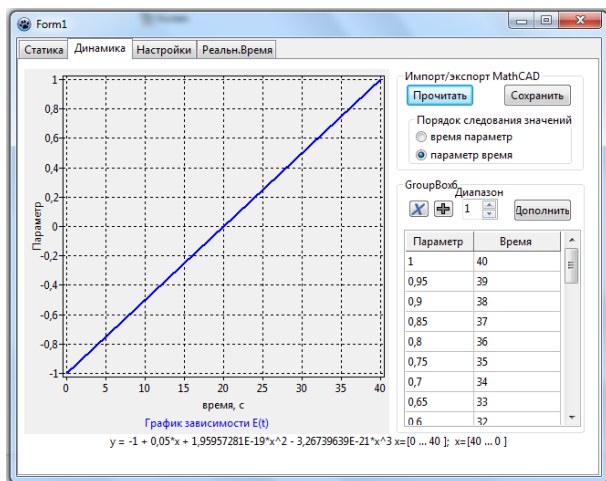
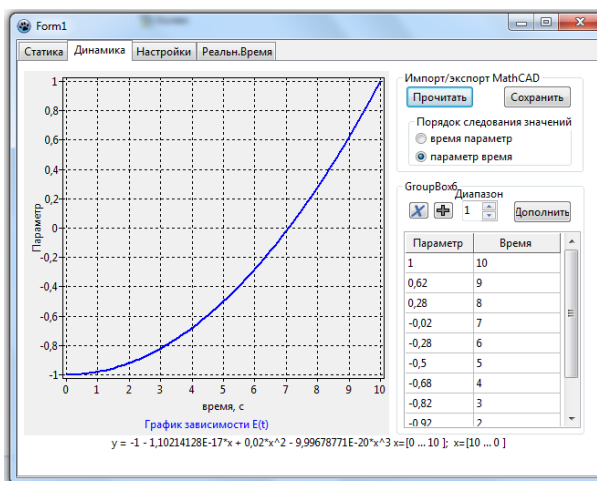


Рис. 11. Вкладка “Реальное время” программы Control



а



б

Рис. 9. Вкладка “Динамика” программы Control: а – линейный закон управления; б – нелинейный закон управления импортированный из MathCad

При вычислении перемещения программа проходит вдоль оси времени с постоянным шагом 128 мкс, отмечает изменения параметра, соответствующие одному шагу (импульсу управления, подаваемому на привод) и формирует управляющую команду.

Контроллер управления шаговым двигателем имеет буфер на 192 команды, что исключает прерывание управляющей последовательности при нормальном функционировании операционной системы компьютера.

5. Результаты исследования

Испытание шагового электропривода было разделено на статическое и динамическое.

В первом случае проверялась четкость позиционирования и способность привода удерживать наклонную шайбу в различных $\epsilon = \text{const}$ в течение длительного (не менее 300 сек.) времени. Испытания проводились при различной скорости и тормозном моменте на выходном валу и различных температурах рабочей жидкости гидропривода (от 30 до 55 °С).

Результаты показали, что на всех режимах колебания скорости выходного вала трансмиссии не превышали 25 об/мин. На рис. 12. представлен график поведения скорости выходного вала при $\epsilon = -0,78$.

Главным критерием для оценки динамических качеств шагового электропривода, как исполняющего элемента системы управления ГОМТ, послужило наличие ступеней и их величина на графике скорости выходного вала. На рис. 13 приведен график разгона по линейному закону $\epsilon(t) = 0,05t - 1$ (с симметричной "восходящей" и "нисходящей" ветвями). На рис. 14. показаны ступени на графике скорости выходного вала.

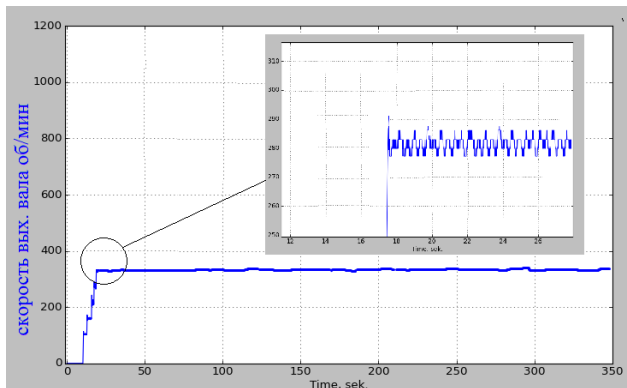


Рис. 12. График поведения скорости выходного вала при постоянном параметре регулирования

Однако при проведении исследования был установлен тот факт, что вид кривой изменения скорости выходного вала непосредственно связан с величиной тормозного момента M_T , который развивал в тот или иной момент поршковый нагрузочный тормоз. Так, при $M_T \approx 150$ Нм кривая приобретает ступенчатый вид при $\epsilon \geq +0,85$, а при $M_T \approx 60$ Нм (тормоз подсоединен к

трансмиссии, но не запитан) уже при $\epsilon \geq +0,3$. Таким образом, можно сделать вывод, что обнаруженные рывки скорости в силу своей незначительности не способны вызвать нарушения в работе ГОМТ, а минимизировать их можно введением промежуточной передачи между шаговым двигателем и валом управления.

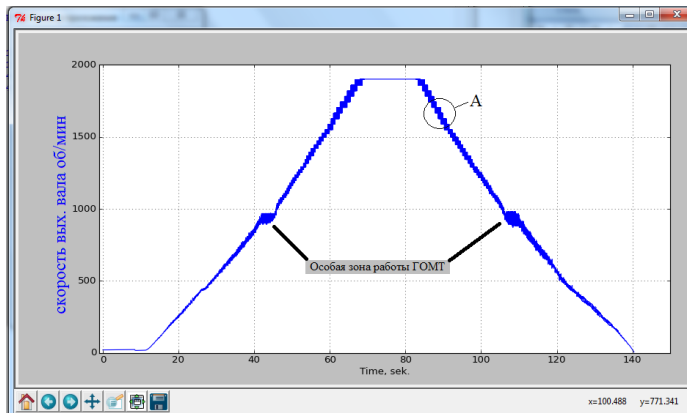


Рис. 13. Разгон по закону управления

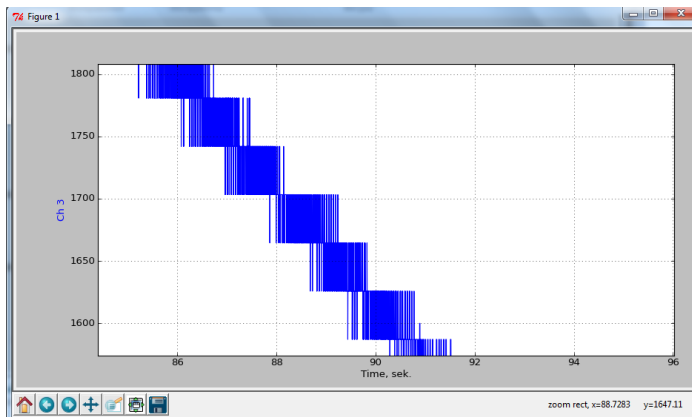


Рис. 14. Фрагмент графика скорости выходного вала

6. Выводы

Проведенное исследование установило, что применение шагового электропривода, как исполнительного элемента на аксиально-поршневых гидрообъемных машинах с гидромеханическим управлением, позволяет не только повысить удобство управления трактором для оператора, но и получить ряд свойств, которыми на данный момент обладают лишь гидромашин с электрическим пропорциональным управлением:

- управление с помощью джойстика;
- возможность разгона по оптимальному закону записанному в памяти микроконтроллера;
- легкая наладка обратной связи.

В ходе исследования были получены графики изменения скорости выходного вала при постоянном параметре регулирования, а также при разгоне и последующем торможении по линейному закону управления. Введение промежуточной зубчатой передачи между валом шагового двигателя и управляющим валом позволяет повысить точность позиционирования и использовать двигатель с меньшим моментом удержания.

Литература

1. Насосы аксиально-поршневые регулируемые серий S и H [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.hydrosila.com/products/piston-engines/hydro-nasosu.html>
2. Петров, В. А. Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин [Текст] / В. А. Петров. – М.: Машиностроение. – 1988. – 248 с.
3. Андреев, М. А. Коррекция динамических характеристик регулятора аксиально-поршневого насоса с электрогидравлическим пропорциональным управлением [Текст] / М. А. Андреев, С. Е. Семёнов // Наука и Образование. – 2012. – № 12. – С. 47–54.
4. Feilong, Z. The Simulation and Optimization of the Electro-Hydraulic Proportional Control System Based on Simulink [Text] / Z. Feilong, K. Gangsheng // Sensors & Transducers Journal. – 2013. – Vol. 21. – P. 1–7.
5. Hu, J.-J. Construct and study mathematical model of direct-acting proportional control valve hydraulic pressure motor [Text] / J.-J. Hu, S.-P. Yang, G.-B. Zhao // Modern manufacturing engineering. – 2008. – Vol. 6. – P. 99–102.
6. Yang, K.-U. Pressure control of hydraulic servo system using proportional control valve [Text] / K.-U. Yang, I.-H. Oh // KSME International Journal. – 1999. – Vol. 13. – P. 229–239.
7. Bruniaux, P. Optimal control of stepper motor with definition of safety factor [Text] / P. Bruniaux, V. Koncar // Motion Control for Intelligent Automation. – 1992. – Vol. 1. – P. 27–29. doi: 10.1016/b978-0-08-042058-5.50065-4
8. William, A. Motion Control With Stepper Motors [Text] / A. William // The System Engineers Handbook. – 2002. – Vol. 5. – P. 477–493. doi: 10.1016/b978-0-08-051902-9.50049-2
9. Papoff, P. A programmable positioning stepper-motor controller [Text] / P. Papoff, D. Ricci // Talanta. – 2009. – Vol. 8. – P. 117–121.
10. Калиткин, Н. Н. Численные методы [Текст] / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.