

Использование гидравлических стендов «FESTO» при исследовании динамики электрогидравлического следящего привода

12, декабрь 2014

Кулаков Д. Б., Кулаков Б. Б.

УДК: 62-526

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

РУДН

kulakov@bmstu.ru

Введение

Учебная программа, преподаваемая на кафедре «Гидравлика, гидромашины и гидропневмоавтоматика», включает в себя изучение гидроприводов с дроссельным и объемным регулированием. В рамках соответствующих дисциплин у студентов формируются подходы к математическому описанию процессов, протекающих в гидроприводах с аналоговым и цифровым управлением, рассматриваются особенности и ограничения, возникающие при учете нелинейностей их характеристик [1]. Студенты обучаются основам управления гидравлическими элементами и агрегатами. Для закрепления получаемых студентами знаний на кафедре функционируют учебные и научно-исследовательские лаборатории с уникальными стендами, выполненными на базе реальных гидравлических машин и гидроприводов. Однако, часто, реальные гидравлические агрегаты представляют собой систему устройств, объединенных в сложную гидравлическую схему, выполненную в едином корпусе. Это, делает фактически невозможным экспериментальное определение многих характеристик элементов гидропривода и затрудняет понимание происходящих физических процессов у студентов на начальном этапе обучения. Для преодоления этих сложностей в учебном процессе было принято решение дополнить лабораторную базу в области изучения динамики и регулирования гидроприводов и их оптимального управления лабораторными гидравлическими стендами «FESTO» (рис. 1), поступившими на кафедру в 2013 году.

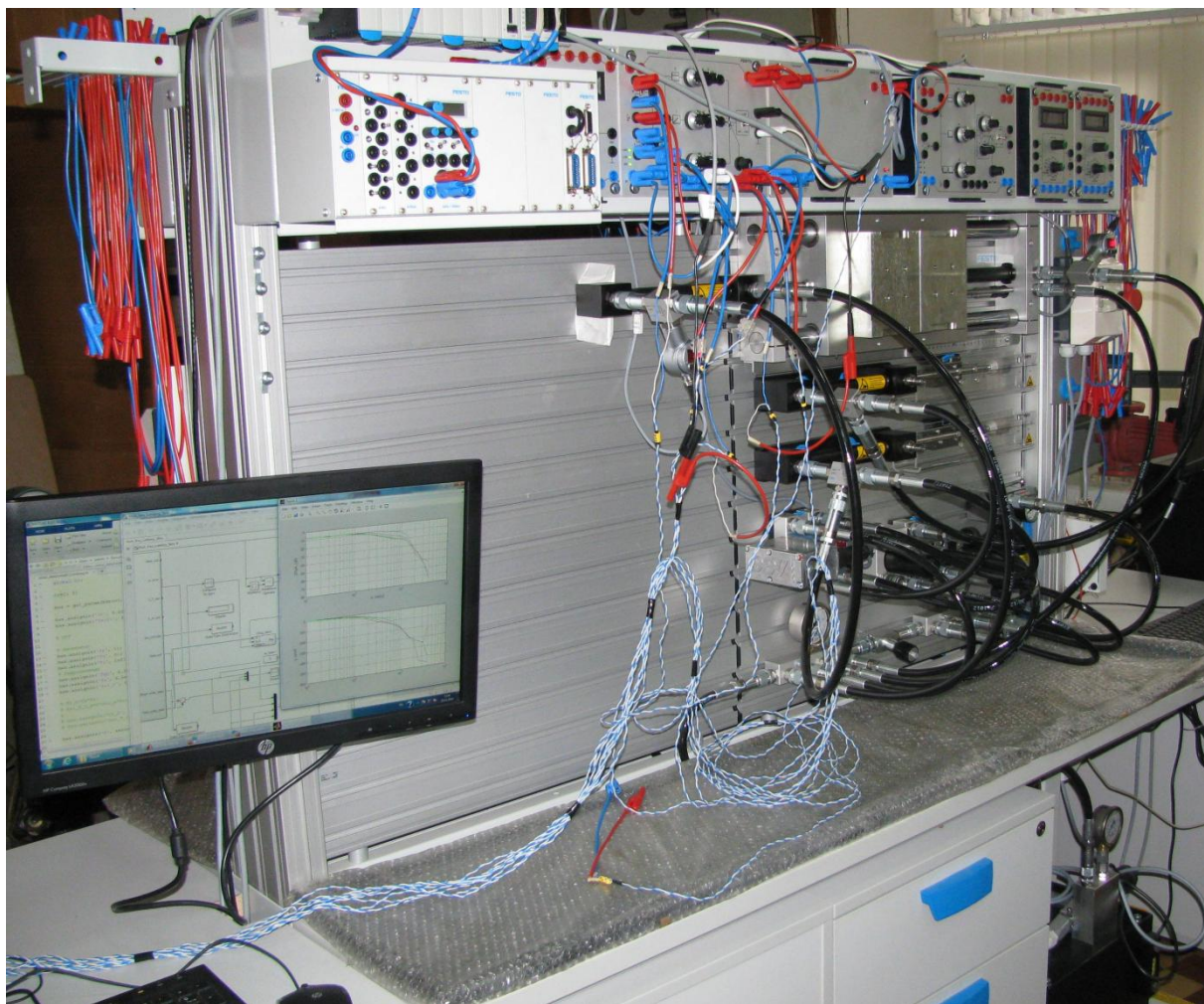


Рис. 1. Общий вид гидравлического стенда FESTO

1. Изначальные и приобретенные возможности стендов FESTO

С точки зрения изучения динамических процессов, проходящих в гидравлических системах, номенклатура оборудования и программного обеспечения гидравлических учебных стендов FESTO (далее - стендов), весьма противоречива. С одной стороны в состав стендов входят качественные быстродействующие электрогидравлические усилители фирмы MOOG (рис. 2), аналоговые ПИД регуляторы и регуляторы по вектору состояния, блоки аналогового/цифрового ввода-вывода EasyPort USB, промышленные контроллеры (рис. 3), современные быстродействующие персональные компьютеры, программное обеспечение, позволяющее имитировать процессы в гидравлических системах и управлять/считывать сигналы с EasyPort. С другой стороны, блок ввода-вывода EasyPort USB фактически не приспособлен для управления быстротекущими процессами в гидроприводе и их исследования [2]. Программное обеспечение, поставляемое со стендами, позволяет исследовать влияние лишь ПИД регулятора, которым не ограничиваются возможности современного управления электрогидравлическими следящими приводами (ЭГСП).

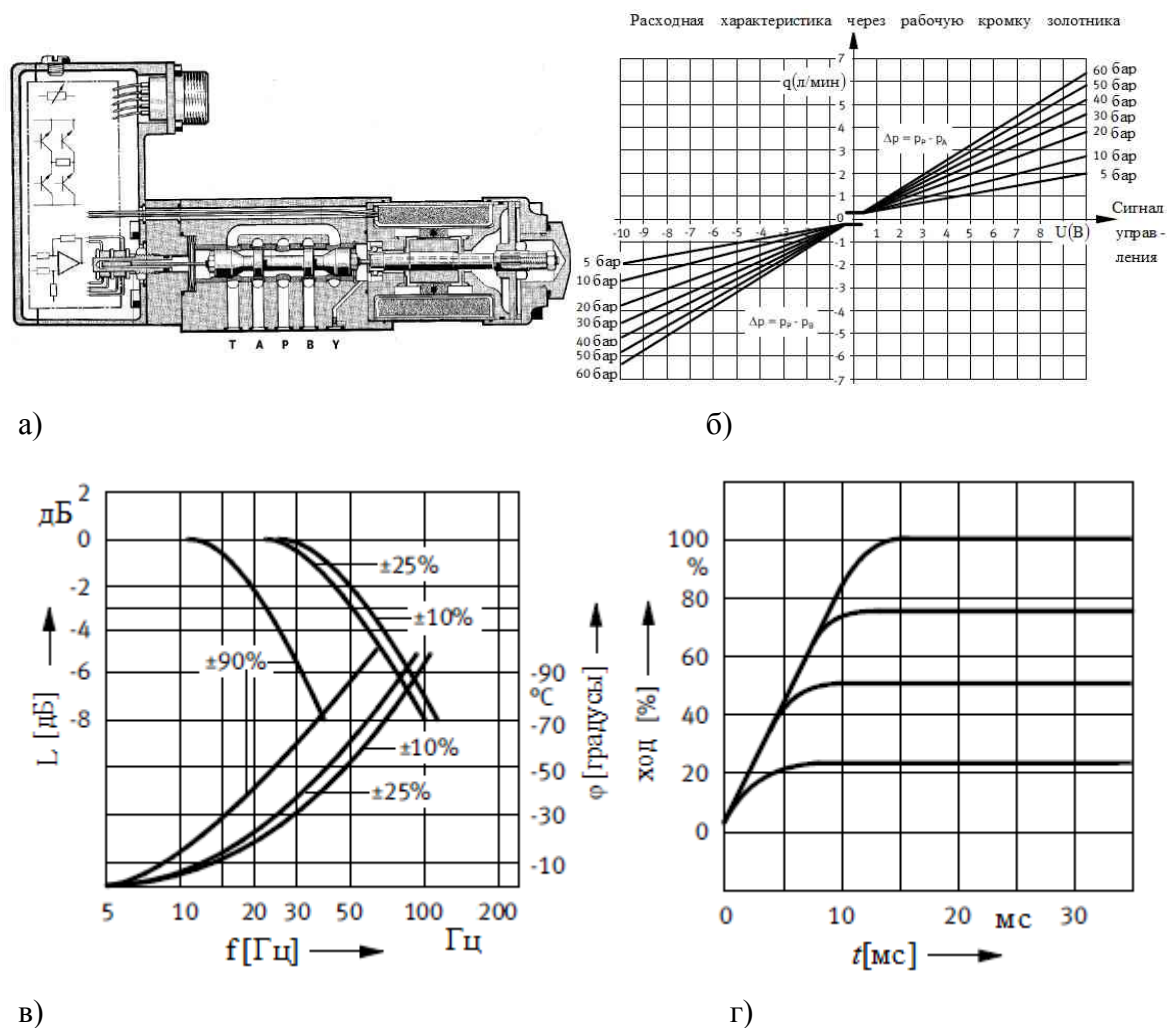


Рис. 2. Разрез ЭГУ “MOOG” (а), его расходные (б), частотные характеристики (в) и переходные процессы (г)



Рис. 3. Электронный модуль ПИД регулятора, блок аналогового/цифрового ввода-вывода EasyPort USB и промышленный контроллер

Проанализировав потенциальные возможности стендов и требования, предъявляемые к ним учебным процессом ВУЗа, было принято решение провести их модернизацию, путем интеграции в их состав программных сред MatLab и LabView и быстродействующих плат ввода-вывода. В таблице 1 показаны варианты использования вычислительной тех-

ники и программного обеспечения в составе гидравлических стендов FESTO в стандартной комплектации стендов и в дооснащенном варианте при реализации ЭГСП.

Таблица 1. Возможности реализации ЭГСП на стендах Festo

№ п/п		Оборудование (кроме датчиков, электрогидравлического усилителя, гидравлических компонентов)	Кол-во каналов ЦАП/АЦП	Возможный регулятор	Программное обеспечение	Частота замыкания обратной связи ЭГСП, Гц: реализованная/максимальная паспортная
1	стандарт. компл.	блок ПИД-регулятора	-	ПИД	–	–
2		Контроллер Festo CECC CoDeSys (программируется с ПК)	4/4	Любой	CoDeSys	100/500
3		ПК, EasyPort	2/4	ПИД	Windows, FluidSim	30/500
4	Модерниза-	ПК, EasyPort	2/4	Любой	Windows, LabView	30/500
5		ПК, NI PCI-6024E, блок ПИД-регулятора	2/16	Любой	Windows, Matlab	5000/20000

Пункты 1 - 3 таблицы 1 соответствуют стандартной комплектации стендов. Пункты 4 – 5 – соответствуют модернизированным стендам. Быстродействие системы управления и регистрации экспериментальных данных показано через максимальную частоту замыкания обратной связи ЭГСП.

Рассмотрим каждый из вариантов использования стендов FESTO более подробно.

При использовании в учебном процессе аналоговых электронных модулей ПИД регуляторов и регуляторов по вектору состояния, возникают следующие трудности:

- параметры регуляторов все равно нужно рассчитывать на внешних ЭВМ с использованием дополнительных программных сред разработки;
- требуется дополнительное использование программных и аппаратных средств для регистрации результатов эксперимента.

Промышленные контроллеры Festo CECC CoDeSys, поставляемые в составе стендов, программируются на Си подобном языке. Это, с одной стороны, позволяет реализовать любой алгоритм управления, но, с другой стороны, значительно замедляет отладку программ и не обеспечивает визуализацию структуры системы управления и графическое отображение изменения исследуемых переменных управляемой системы. Максимальная частота выполнения программы и дискретизации сигналов ввода-вывода, которую удалось получить на стенде, составляет 100 Гц.

Использование EasyPort USB совместно с программой FluidLAB, запускаемой на персональном компьютере, позволяет реализовать только цифровой ПИД регулятор. При

этом не всегда удается получить удобное графическое отображение регистрируемых процессов.

При использовании EasyPort совместно со средой разработки виртуальных приборов LabView (п. 4 таблицы 1) появляется возможность использовать среду графического программирования при создании регуляторов [3]. Однако, нужно отметить относительно низкую частоту дискретизации сигналов управления и сигналов с датчиков стенда.

Все вышеперечисленные недостатки не позволяли использовать гидравлические стенды в состоянии поставки для изучения динамики гидроприводов в курсах ВУЗа. Поэтому было принято решение дооснастить стенды высокоскоростными современными платами сопряжения с ЭВМ и установить на их компьютеры программные пакеты Matlab и LabView [4]. Такая модернизация позволяет студентам на одном рабочем месте лабораторного стенда (рис. 1) проводить все этапы синтеза регуляторов различных типов для ЭГСП и получать экспериментальные подтверждения теоретических исследований. На компьютере в среде Simulink [5] исследуется работа ЭГСП (на математической модели) с разрабатываемым регулятором и определяются параметры регулятора, в соответствии с заданными критериями работы привода. В структурной схеме ЭГСП с разработанным регулятором взаимодействие регулятора с блоками математической модели неизменяемой части изменяется на взаимодействие с реальными устройствами, с использованием модулей ввода/вывода сигналов через платы АЦП/ЦАП. Проводится физический эксперимент, подтверждающий проведенные ранее теоретические исследования. При этом регистрация и обработка экспериментальных данных производится в той же среде Matlab (рис. 4) [6,7]. Также нельзя не отметить, что сохраняются такие достоинства обучения студентов на стендах FESTO как наглядность исследуемой гидравлической схемы (которая собирается самими обучающимися) и индивидуальное выполнение лабораторных работ.

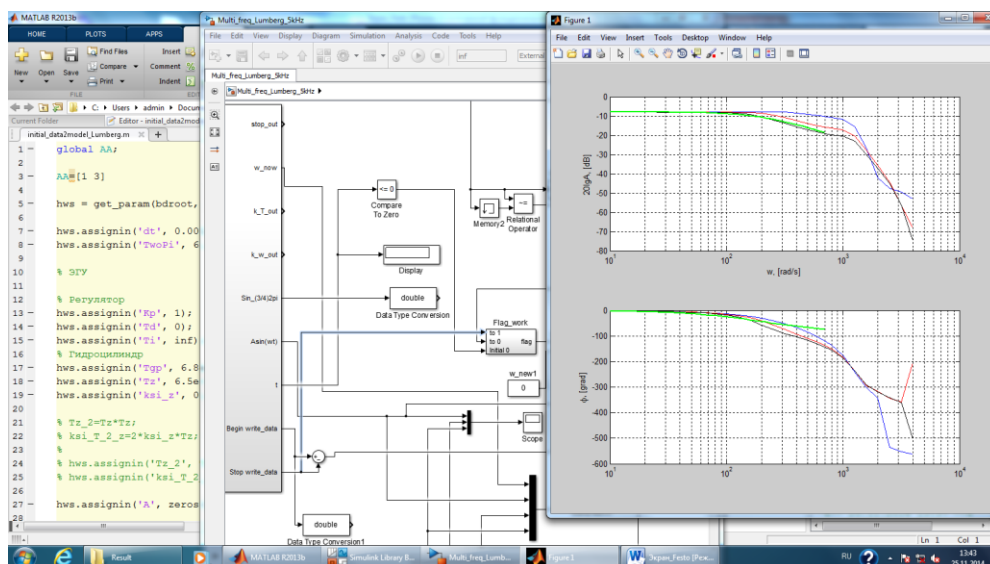


Рис. 4. Интерфейс оператора при экспериментальном определении частотных характеристик ЭГУ на гидравлическом стенде FESTO

При модернизации стендов, для сопряжения ЭВМ с гидравлическими и электронными устройствами были использованы платы ЦАП, АЦП NI PCI-6024E фирмы National Instruvents. Технические характеристики платы: разрешение 12 бит на программно выбираемый диапазон измерений аналогового сигнала ($\pm 10, \pm 5, \pm 0.5, \pm 0.05$ Вольт), 16 не дифференциальных/8 дифференциальных аналоговых входов, 2 аналоговых выхода, 8 настраиваемых дискретных входа-выхода, максимальная частота оцифровки 200 kS/s (kiloSamples/second). Выбранные платы обладают следующими достоинствами:

- технические характеристики плат полностью удовлетворяют требованиям учебного процесса;
- поддерживаются модулем RealTime Windows Target пакета Matlab;
- совместимы с LabView;
- относительно недорогие при покупке на вторичном рынке.

Для реализации на ЭВМ регуляторов ЭГСП, работающих в реальном масштабе времени используется RealTime Windows Target Matlab Toolbox, совместно с модулями среды Matlab: Matlab Coder, Simulink, Simulink Coder. Максимальная частота дискретизации, заявляемая производителем, составляет 20 кГц.

2. Синтез регуляторов ЭГСП на стендах FESTO

Задача оптимального управления, например, возникает, когда качество переходного процесса не удовлетворяет требуемым критериям и может быть улучшено с помощью того или иного регулятора. Для исследования динамики ЭГСП и синтеза оптимальных регуляторов на гидравлических стендах FESTO собирается схема, показанная на рис. 5. Включение двух гидроцилиндров навстречу друг другу позволяет убрать нелинейность, вызванную их непроходными штоками. Поскольку их соединение между собой в нашем случае можно считать абсолютно жестким, мы их рассматриваем как один гидроцилиндр, с проходным штоком.

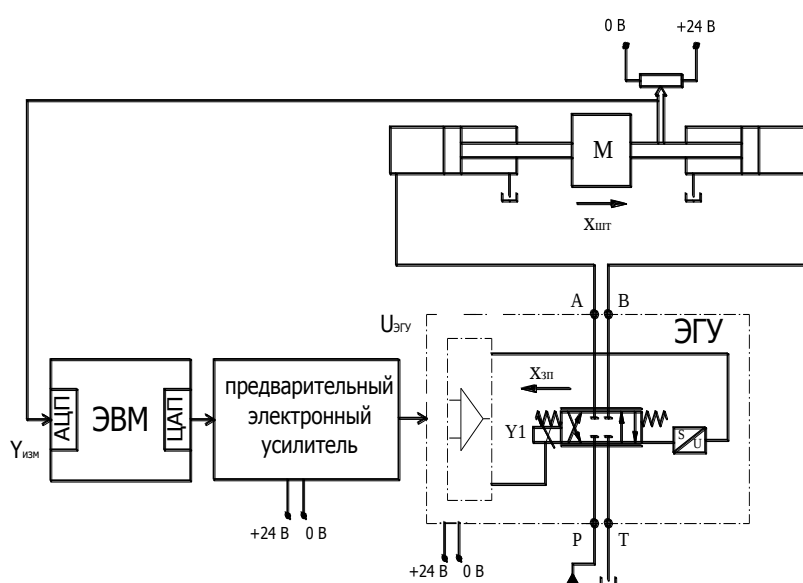


Рис. 5. Схема лабораторной установки для исследования динамики ЭГСП

Исследования показали, что постоянная времени динамического звена, описывающего в линейной математической модели нагруженный гидроцилиндр, определяемая сжимаемостью жидкости и массой груза [1], сравнима с постоянной времени ЭГУ (рис. 2). Это значительно усложняет задачу оптимального управления, поскольку требует улучшения качества регулирования золотникового распределителя. При этом нужно учитывать, что:

1. золотниковый распределитель, в таком случае, должен быть описан нелинейной математической моделью (см. ЛАЧХ золотникового распределителя при разных амплитудах входного воздействия на рис. 2) и, как следствие, регулятор должен быть нелинейным;
2. максимальное качество переходного процесса золотникового распределителя (в силу наличия в нём локальной обратной связи – в его электронном блоке первого каскада усиления) уже получено в ходе его разработки и «выжать» что-то ещё из его динамических свойств едва ли представляется возможным.

Поэтому было принято решение «заглубить» динамические свойства ЭГСП, увеличив постоянную времени нагруженного гидроцилиндра, определяемую массой груза и сжимаемостью жидкости.

Динамика разомкнутого контура ЭГСП может быть описана передаточной функцией (1) [1]

$$W(s) = K_{YC} \frac{1}{T_{ЭГУ}s + 1} \cdot \frac{1}{T_{ГП}s} \cdot \frac{1}{T_{\eta}^2 s^2 + 2\xi_{\eta} T_{\eta} s + 1} K_{OC}. \quad (1)$$

Здесь K_{YC} – коэффициент усиления, $T_{ЭГУ}$ – постоянная времени ЭГУ, $T_{ГП}$ – гидравлическая постоянная времени привода, T_{η}, ξ_{η} – механическая постоянная времени и коэффициент относительного демпфирования гидроцилиндра соответственно, K_{OC} – коэффициент обратной связи.

Механическая постоянная времени гидроцилиндра определяется формулой (2)

$$T_{\eta} = \sqrt{\frac{mV_0}{2BF_{\eta}^2}}, \quad (2)$$

где m – суммарная масса груза, поршня и штока гидроцилиндра;

V_0 – объём полости гидроцилиндра при начальном положении поршня и гидролинии, соединяющей распределитель с этой полостью;

B – модуль объёмной упругости жидкости в полости гидроцилиндра;

F_{η} – рабочая площадь поршня в полости гидроцилиндра.

Масса груза ЭГСП была увеличена с до 27.5 кг путём прикрепления к направляющей дополнительных грузов (без переделки стендов). Кроме того, были увеличены объёмы гидравлических линий, соединяющих ЭГУ с полостями гидроцилиндров. Увеличение объёмов в данном случае физически имитирует увеличение массы груза, которым оперирует ЭГСП.

В результате удастся «разнести» постоянные времени гидроцилиндра и ЭГУ, приближённо описывать ЭГСП линейной математической моделью и производить улучшение динамики ЭГСП, с использованием различных регуляторов.

На рис. 6 показаны экспериментально определенные переходные процессы ЭГСП на стендах FESTO. Первый процесс соответствует гидроприводу с П регулятором, второй - с регулятором состояния с наблюдателем Люенбергера. Для сравнения качества регулирования, переключение между регуляторами ЭГСП производится в структурной схеме построенной в среде Matlab Simulink непосредственно в процессе работы гидропривода. Для уменьшения колебаний стенда при работе нагруженного гидропривода (при определении переходного процесса или при движении по гармоническому закону с разными частотами) на второй стороне стенда собирается аналогичная схема гидропривода (рис. 5) с такими же параметрами. Управляющие сигналы на входы обоих приводов подаются одновременно с одного компьютера в противофазе. Поэтому на рис. 6 показаны изменения положений штоков гидроцилиндров гидроприводов одновременно работающих на двух сторонах гидравлического стенда.

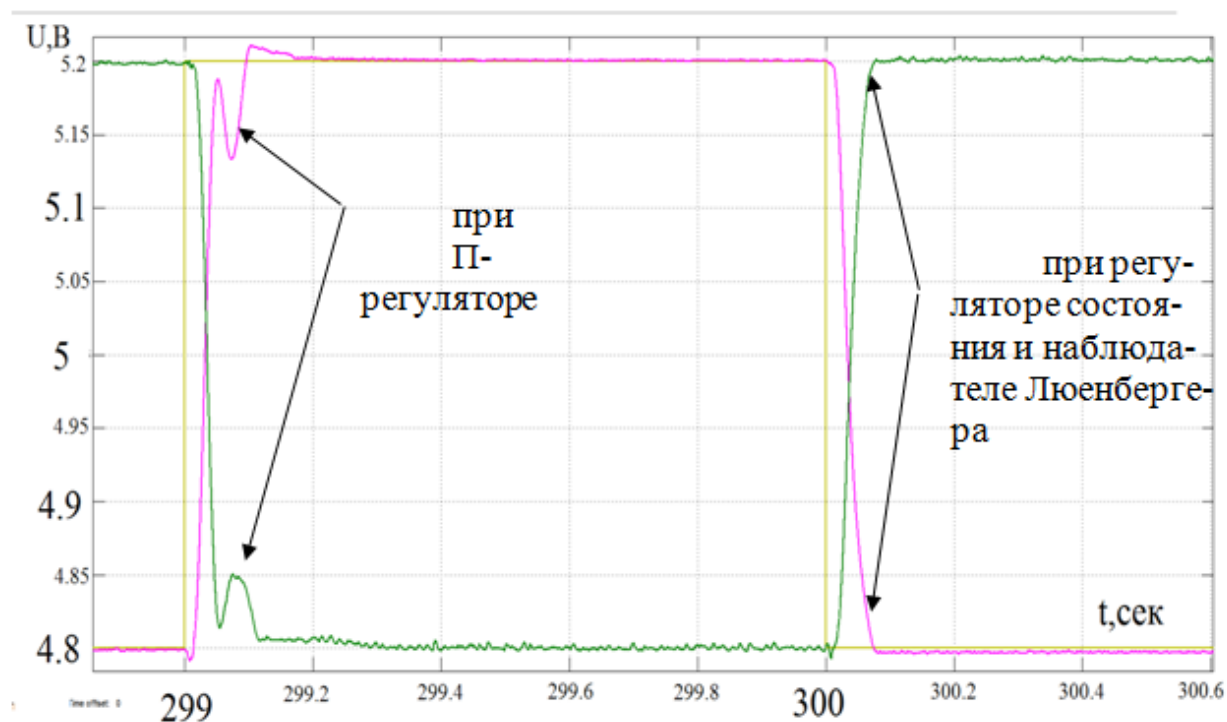


Рис. 6. Переходный процесс для случая П-регулятора и регулятора состояния с наблюдателем Люенбергера

Заключение

В результате исследований и модификации гидравлических стендов FESTO, проведенной авторами, значительно расширились возможности их применения в учебном процессе. Появилась возможность их использования для экспериментального исследования динамических свойств как гидравлических элементов по отдельности, так и гидропривода в целом. Можно без преувеличения утверждать, что в результате объединения вычислительной мощности и многообразия возможностей программной среды Matlab с наглядно-

стью представления физических моделей исследуемых гидросистем выводит стенды FESTO на качественно новый уровень обучения, соответствующий требованиям ВУЗа.

Список литературы

1. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение. 1987 г. 464 с.
2. Ле Ба Чунг Способ подключения периферийных устройств к системе управления через интерфейс USB 2.0 // Труды Одиннадцатого международного симпозиума «Интеллектуальные системы». – М.: РУДН, 2014. – с. 118-122.
3. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabView для всех. 4-е изд. М.: Изд-во ДМК. 2011 г. 904 с.
4. Федосов В.П., Нестеренко А.К. Цифровая обработка сигналов в LabView. М.: Изд-во ДМК. 2013 г. 470 с.
5. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7 Самоучитель. ДМК-Пресс, 2008. 784 с.
6. Ануфриев И.Е. Самоучитель Matlab 5.3/6.x. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 712 с.
7. И. Ануфриев, А. Смирнов, Е. Смирнова. MATLAB 7.0. в подлиннике. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 1097 с.