

УДК 629.113.585

ПОЛУНАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ТРОГАНИЯ АВТОПОЕЗДА С МЕСТА В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРАТЕГИИ DSAC

О.С. Руктешель, В.А. Кусяк

Белорусский национальный технический университет

А.В. Белевич, В.И. Луцкий

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Разработанный стенд предназначен для отладки и настройки автоматизированной системы трогания с места и переключения передач в трансмиссии с сухим фрикционным сцеплением и механической коробкой. В статье приведена принципиальная схема стенда, даны описание его работы и перечень контрольно-измерительной аппаратуры, а также показаны функциональные связи между механической частью стенда и исполнительным, измерительным и управляющим блоками микропроцессорной системы. Исследована характеристика исполнительного механизма сцепления при различной частоте управляющего сигнала. Приведены отдельные результаты записи процессов трогания при различных темпах управления сцеплением, в том числе и при наличии в цепи управления пропорционально-интегрального регулятора.

Современные тенденции развития автомобилестроения, характеризуются повсеместным внедрением систем автоматизации управления силовым агрегатом, обеспечивающим повышение его ресурса и снижающим нагрузки на водителя.

Обзор мехатронных систем управления трансмиссией, на базе сухого фрикционного сцепления и механической коробки передач (КП) показал, что при практически идентичном наборе датчиков, конструкция исполнительных механизмов (ИМ), а также стратегия управления ими – различные.

Как правило, для управления коробкой передач используются исполнительные механизмы поршневого [1] или диафрагменного [2] типов, управляемые от контроллера посредством двухпозиционных электромагнитных клапанов (ЭМК). Также, встречается вариант установки на крышке КП электродвигателей постоянного тока [3, с. 9], один из которых осуществляет выбор, а второй – включение передачи.

Включение фрикционного сцепления, особенно в процессе трогания с места, требует более сложного алгоритма управления. Для реализации данной задачи, немецкий концерн ZF Friedrichshafen AG использует пневматический силовой цилиндр, шток которого шарнирно соединен с рычагом вала вилки выключения сцепления. В корпус ИМ интегрированы четыре электромагнитных клапана с различными по диаметру дроселирующими отверстиями [4, с. 69]. Клапаны работают попарно синхронно или в режиме последовательного управления. Контроллер управляет временем и тактовой частотой открытия-закрытия соответствующего клапана или группы клапанов. Алгоритм управления, а также параметры, по которым осуществляется обратная связь, представляют основное «ноу-хау» фирмы разработчика и в материалах открытой печати не приводятся.

Корпорация Eaton (США) и концерн Daimler-Benz (Германия) также имеют разработки подобного типа: мехатронные системы управления силовым агрегатом Eaton Fuller UltraShift Transmission [5] и Mercedes Telligent automated. При этом интеллектуальная «начинка» (управляющий алгоритм, тип и используемая стратегия управления ЭМК, тип и параметр обратной связи, тип регулятора, используемого в цепи управления) в доступной технической литературе представлена «черным ящиком».

Специалисты кафедры «Автомобили» БНТУ совместно с ОИМ НАН Беларуси разработали принципиальную схему испытательного стен-

да для отладки автоматизированной мехатронной системы управления силовым агрегатом (АМСУСА) автопоезда МА3530905-010 полной массой 35 тонн. Отличительной особенностью предлагаемого технического решения является использование пневматического пропорционального клапана, управляющего подачей сжатого воздуха в рабочую полость исполнительного механизма сцепления. Из двух наиболее прогрессивных стратегий управления пропорциональными ЭМК, используемых в мировой практике, – Direct Semi-active Control (DSAC) и Direct active Control (DAC) – была выбрана стратегия DSAC, заключающаяся в подаче на обмотку пропорционального клапана широтно-импульсного сигнала с последующим изменением скважности в соответствии с заданным алгоритмом. Управление пропорциональными ЭМК при помощи прямого токового сигнала (стратегия DAC) имеет преимущество в быстродействии. Выигрыш по времени при нарастании/падении давления в полости силового цилиндра составляет приблизительно 0,08 с [6]. Однако для генерации такого сигнала контроллер должен иметь соответствующие технические характеристики.

Указанный недостаток выбранной стратегии частично компенсируется использованием пневмокамеры в качестве ИМ сцепления. По данным компании Wabco (Германия) диафрагменные исполнительные механизмы, имеющие меньшую зону нечувствительности, обладают более высоким быстродействием (на 20..25 мс, [7, с. 11]) по сравнению с поршневыми аналогами.

Монтаж стенда был произведен на базе испытательного центра Минского автомобильного завода. Помимо проверки функциональной работоспособности спроектированной АМСУСА, стенд предназначен для отработки алгоритмов трогания с места, маневрирования и переключения передач в автоматическом режиме работы силового агрегата. Принципиальная схема стенда изображена на рис. 1.

Стенд инерционный, разомкнутого типа, включает серийный силовой агрегат, маховые массы с механизмом торможения, пневматическую питающую часть и информационно-управляющую систему.

Силовым агрегатом состоит из дизельного двигателя ЯМЗ-7511.10, однодискового фрикционного сцепления ЯМЗ-184 вытяжного типа с диафрагменной нажимной пружиной и 9-ступенчатой коробки передач МАЗ-543205 с планетарным демальтипликатором.

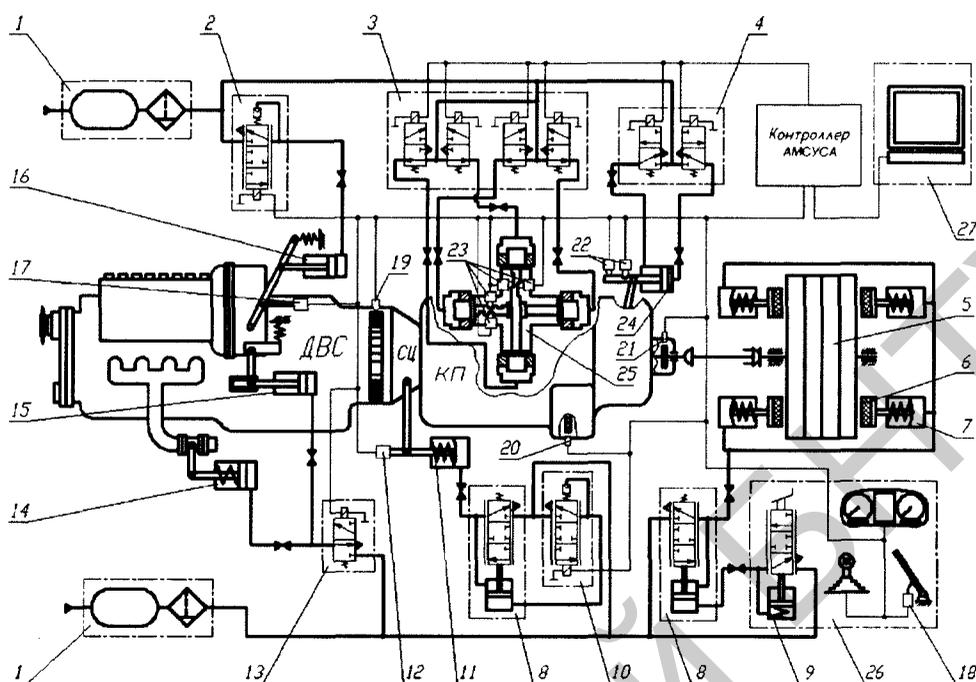


Рис. 1. Принципиальная схема стенда АМСУСА:

1 – питающая часть пневмопривода; 2, 10 – пропорциональные электромагнитные клапаны управления соответственно топливоподачей и сцеплением; 3, 4 – блок электромагнитных клапанов управления исполнительным механизмом соответственно КП и демультипликатора; 5 – инерционная маховая масса; 6 – тормозная колодка; 7 – тормозная камера; 8 – ускорительный клапан; 9 – тормозной кран; 11 – исполнительный механизм (пневмокамера) привода сцепления; 12, 17, 18 – датчики перемещения; 19, 20, 21 – датчики частоты вращения; 22, 23 – концевые выключатели; 13 – клапан управления моторным тормозом и выключением подачи топлива; 14, 15, 16 – исполнительные механизмы соответственно моторного тормоза, выключения подачи топлива и рычага топливоподачи; 24 – исполнительный механизм демультипликатора; 25 – исполнительный механизм КП; 26 – пульт управления; 27 – ПЭВМ

Двигатель имеет механическое управление топливоподачей. Рычаг регулятора частоты вращения топливного насоса высокого давления (ТНВД) перемещается пневматическим силовым цилиндром 16. Соответствие угла поворота рычага и положения педали подачи топлива обеспечивается контроллером АМСУСА с помощью пропорционального клапана 2 и датчиков 17, 18.

В качестве исполнительного механизма привода сцепления использована пневмокамера 11. Управление сцеплением осуществляется при помощи пропорционального клапана 10 и ускорительного клапана 8, который служит для более быстрого впуска и выпуска воздуха из пневмокамеры.

Коробка передач оборудована исполнительным механизмом 25 переключения передач с пневматическим приводом. Блок 3 двухпозиционных электромагнитных клапанов управляет наполнением полостей силовых цилиндров исполнительного механизма. Выбор и включение

передачи происходят за счет сброса давления воздуха в соответствующих полостях. Установка нейтрали обеспечивается подачей воздуха во все полости силовых цилиндров при обесточенных клапанах. Переключение диапазонов демультипликатора осуществляется клапанами 4 и двухпозиционным пневмоцилиндром 24.

Моторный тормоз используется для выравнивания угловых скоростей синхронизируемых элементов КП при переключении на высшую передачу. Электромагнитный клапан 13 подает сжатый воздух в пневмоцилиндр 14 управления заслонкой моторного тормоза и пневмоцилиндр 15 выключения подачи топлива.

Имитация сопротивления движению автомобиля осуществляется механизмом торможения. Механизм состоит из четырех тормозных камер 7, прижимающих колодки 6 к маховым массам 5. Тормозной момент регулируется двумя следящими клапанами 8 и 9.

Информационно-управляющая система стенда представляет собой комплекс устройств для получения, преобразования и регистрации информации о функционировании объекта испытаний. В нее входят датчики АМСУСА, контроллер с аналого-цифровым преобразователем, ПЭВМ 27 с программным обеспечением и линии связи.

На пульте 27 управления, имитирующем рабочее место водителя, расположены органы управления узлами стенда и контрольные приборы, позволяющие следить за работой автоматизированной мехатронной системы. Оператор выбирает селектором режим работы силового агрегата, а затем воздействует на педаль 18 управления топливоподачей. Изменение топливоподачи дизельного двигателя, включение-выключение сцепления и переключение ступеней в коробке происходит автоматически в результате срабатывания пневматических силовых исполнительных механизмов 11, 16, 24 и 25 при подаче сигнала от контроллера на соответствующий электромагнитный клапан 2, 3, 4, 10 или их комбинацию.

Функциональность разработанной мехатронной системы и работоспособность алгоритмов, управляющих процессом трогания автомобиля с места, подтверждена серией опытных испытаний.

В частности, были получены характеристики

исполнительного механизма сцепления и двигателя, а также определены зоны управления пропорциональных клапанов (рис. 2, 3, 4, 5).

Как видно из представленных результатов зона управления имеет значительный гистерезис и нелинейность, а рабочий диапазон управляющего сигнала составляет около 18–22% ШИМ при частоте 400 Гц.

На рис. 5, 6 представлены результаты записи процесса соответственно при плавном и резком трогании на I-й передаче. В качестве выходного параметра для оценки эффективности работы сцепления брались обороты промежуточного вала [8, с. 46], которые, при отсутствии датчика момента на выходном валу, позволяли косвенным образом оценить работу сцепления.

Однако ввиду узкого диапазона регулирования и значительного гистерезиса, обеспечить качественное управление плавностью включения сцепления в таких условиях довольно затруднительно. Для тонкого регулирования процессом включения сцепления, необходимо иметь обратную связь. Поэтому в цепь управления был введен пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор.

На стенде были проведены исследования и сравнительные испытания нескольких стратегий управления сцеплением с обратной связью по оборотам.

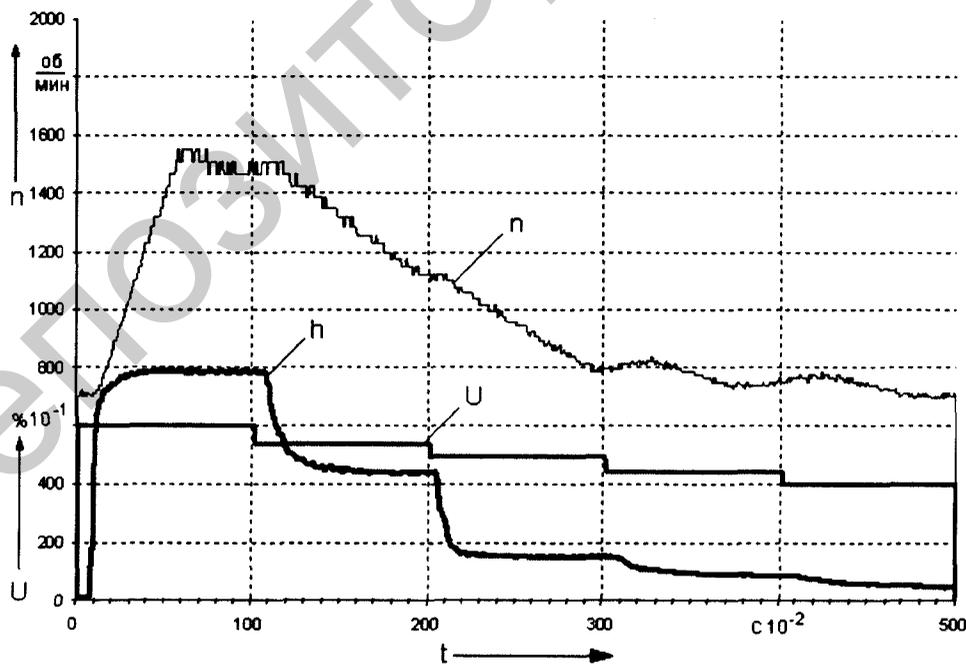


Рис. 2. Работа ИМ управления топливоподачей в зоне регулирования:

U — управляющий сигнал ШИМ, $\% \cdot 10^{-1}$; h — ход рычага ТНВД, $мм \cdot 10^{-1}$; n — частота вращения коленчатого вала двигателя; t — время, $с \cdot 10^{-2}$

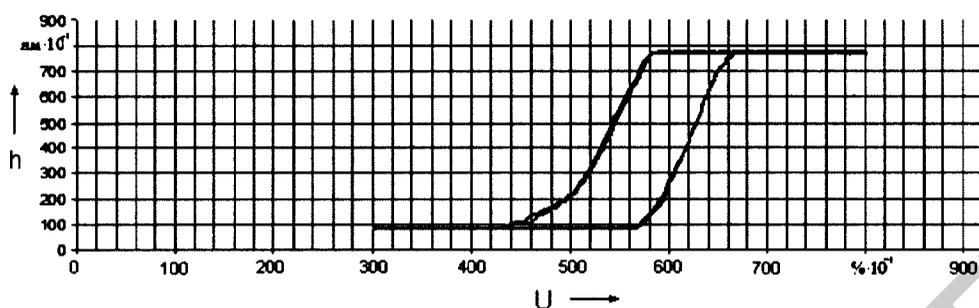


Рис. 3. Гистерезис исполнительного механизма управления двигателем:
 U – управляющий сигнал ШИМ, $\% \cdot 10^1$; h – ход рычага ТНВД, $\text{мм} \cdot 10^1$

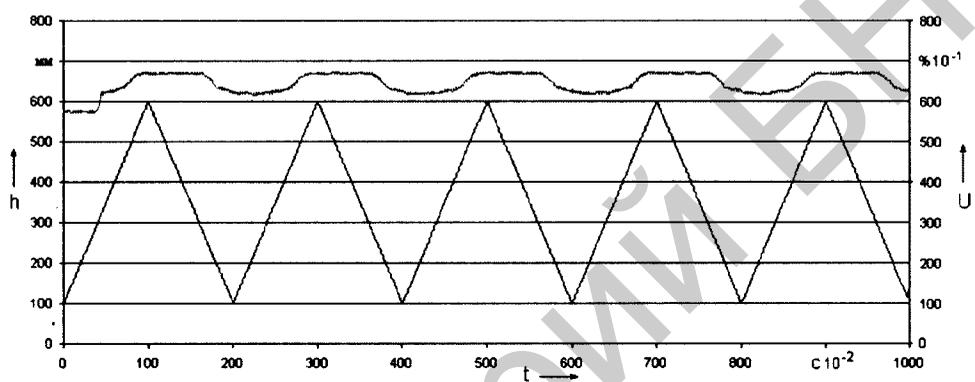


Рис. 4. Характеристика механизма управления сцеплением при частоте управляющего сигнала 100 Гц:
 U – управляющий сигнал ШИМ, $\% \cdot 10^1$; h – ход рычага выключения сцепления, мм; t – время, $\text{с} \cdot 10^2$

Качество управления оценивалось по признакам устойчивости результатов при допустимых изменениях внешних условий – нагрузки, давления воздуха в контуре управления, бортового напряжения питания. Наиболее удачной оказалась стратегия управления, имеющая следующие особенности реализации:

- цифровой ПИ-регулятор с дискретностью управления $1/100$ секунды с обратной связью по оборотам двигателя и промежуточного вала коробки передач, содержащий 3 фазы регулирования с индивидуально настраиваемыми параметрами;
- алгоритм компенсации гистерезиса исполнительного механизма.

– алгоритм фильтрации измеряемых параметров: оборотов вращения и вычисляемых ускорений.

Отдельные результаты эксперимента по управлению сцеплением с использованием стратегии DSAC приведены на рис. 7.

Предлагаемая стратегия управления сцеплением позволяет учесть нелинейность и гистерезис характеристики ИМ сцепления, а ввод обратной связи по оборотам промежуточного вала дает возможность отслеживать характер нарастания момента трения сцепления при включении фрикционного узла.

Как видно из представленной осциллограммы (рис. 7), при превышении порогового значения в 21 рад/с^2 по ускорению ведомого диска, ЭБУ сформировал сигнал на выключение сцепления,

что вело к перестройке структуры алгоритма и последующему согласованию кинематических и силовых факторов ведомой и ведущей частей сцепления. Средний темп включения сцепления в процессе трогания составил $1,15 \text{ с}^{-1}$, что соответствует, согласно результатам моделирования [9,

с. 101, табл. 2], удельным работе и мощности буксования фрикционных элементов соответственно $22,3 \text{ Вт/см}^2$ и $10,1 \text{ Дж/см}^2$, коэффициенту динамических нагрузок в 1,58 и максимальному размаху колебаний производной продольного ускорения автомобиля в $18,5 \text{ м/с}^3$.

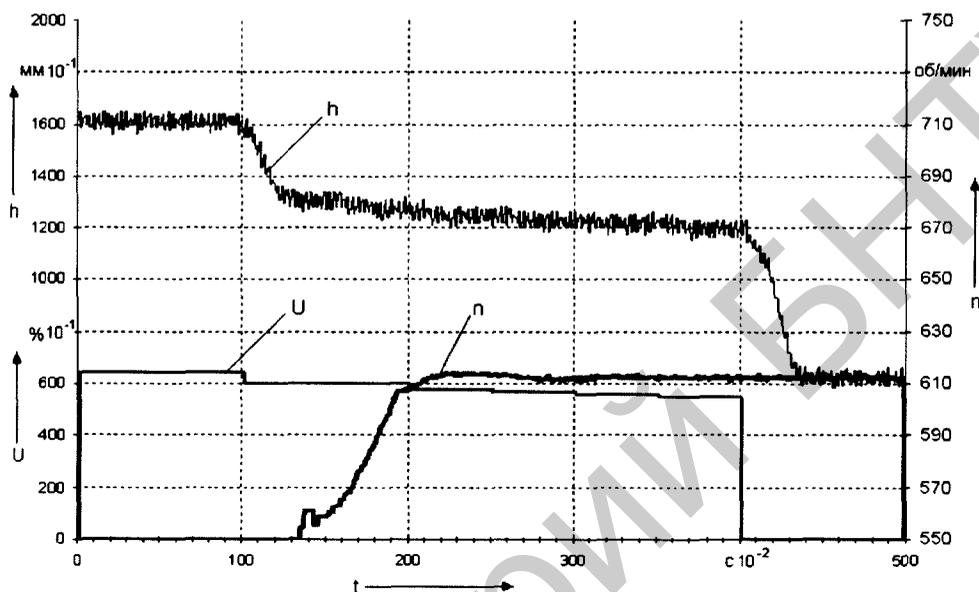
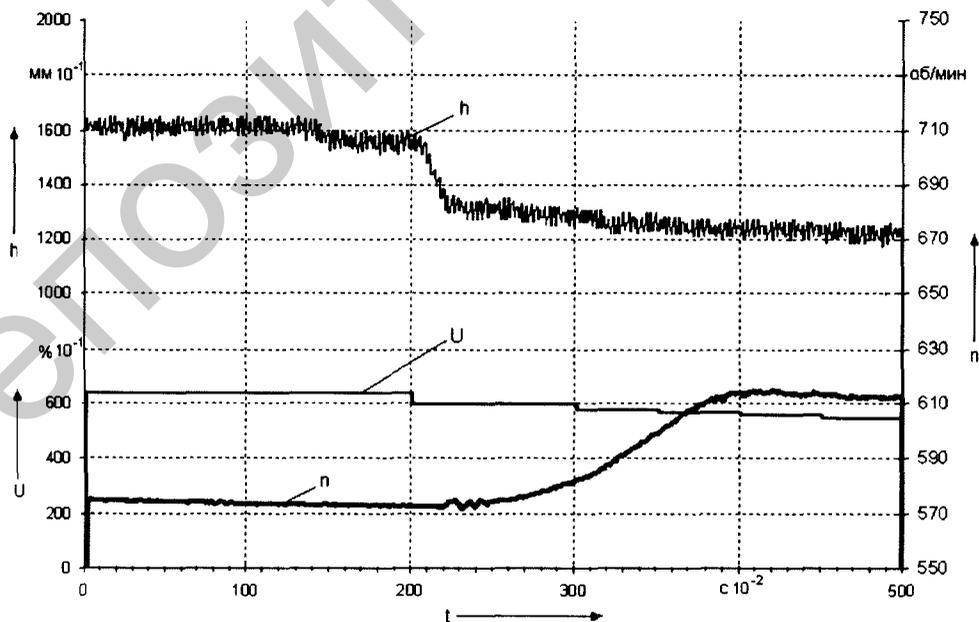


Рис. 5. Осциллограмма процесса быстрого включения сцепления:

U – управляющий сигнал ШИМ, $\% \cdot 10^{-1}$; h – ход рычага сцепления, $\text{мм} \cdot 10^{-1}$, t – время, $\text{с} \cdot 10^{-2}$, n – частота вращения промежуточного вала КП, об/мин



Рису. 6. Осциллограмма процесса плавного трогания с места:

U – управляющий сигнал ШИМ, $\% \cdot 10^{-1}$; h – ход рычага сцепления, $\text{мм} \cdot 10^{-1}$, t – время, $\text{с} \cdot 10^{-2}$, n – частота вращения промежуточного вала КП, об/мин

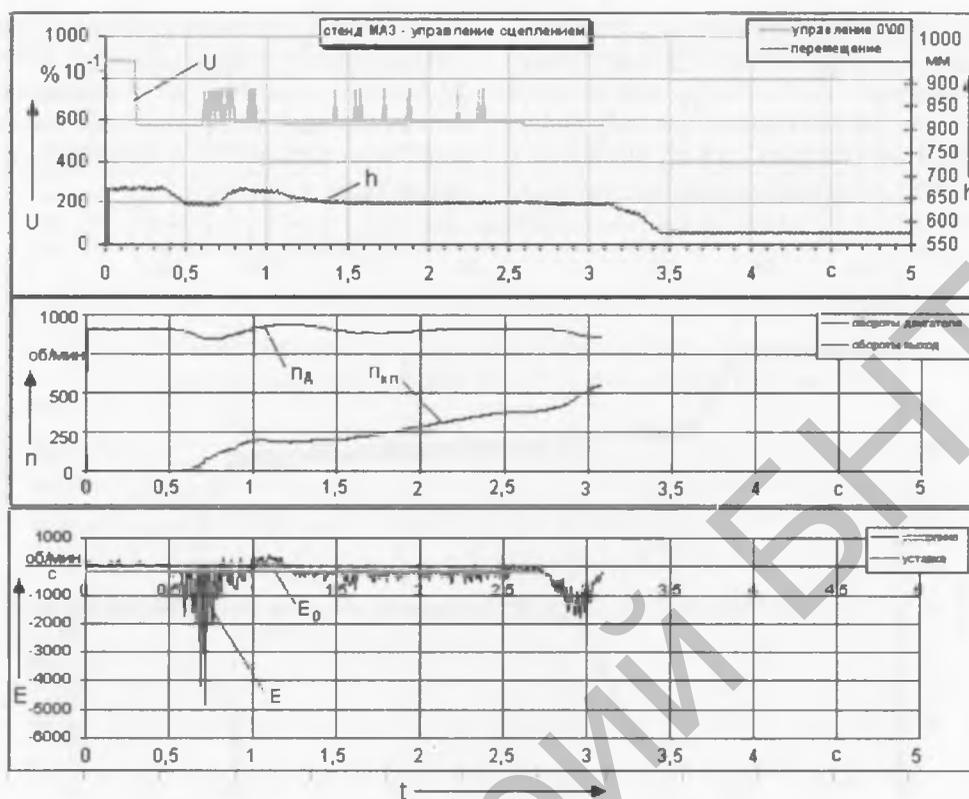


Рис. 7. Осциллограмма процесса трогания с ПИ-регулятором в цепи управления: U – управляющий сигнал ШИМ; h – ход рычага сцепления; t – время; n_d, n_{kp} – частота вращения соответственно коленвала двс и промежуточного вала КП; E, E_0 – производная разности угловых скоростей ведущей и ведомой частей сцепления и ее пороговое значение

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ZF– AS Tronic® / ZF tech. information, Sheet-No. 1327 750 102a. – ZF Fridrichshafen AG, Germany, 2001. – 23 p.
2. Механизм автоматизированного переключения передач в механической ступенчатой коробке передач: пат. 2192973 C2 Российская Федерация, МПК7 В60К20/00, МПК7 В60К20/02 / Р.М. Фадеев; заявитель ОАО «КамАЗ». – № 2001104251/28; заявл. 13.02.01; опубл. 20.11.02. – 6 с.
3. Method of controlling an automated mechanical transmission shift mechanism: pat. 5325029 USA, int. Cl.5 В60К 17/12 / D.P. Janecke, L.A. Kominek, S.A. Edelen; assignee Eaton Corporation. –№ 985190; filed 11.30.92; date of patent 28.06.94. – 14 p.
4. ZF AS Tronic и ZF AS Tronic mid: техническое руководство по установке, работе и вводу в эксплуатацию / ZF tech. information, Sheet-No. 1328 765 901f21. – ZF Fridrichshafen AG, Germany, 2005. –105 p.
5. Fuller®Automated Transmissions: Fuller®UltraShift® LST -LHP, -LEP / Eaton tech. information: condensed specifications TRSL-0300, -0318 807 2.5M/WP, TRSL – 0314 807 2M/WP. – Eaton Corporation, USA, 2007. –6 p.
6. Lee, H.-W. A study on full electronic control of automatic transmission: direct active shift control / H.-W. Lee, J.-S. Oh, G.-H. Jung: Hyundai Motor Company// F2000A101: materials of FISITA World Automotive Congress – Seoul, Korea, 2000. –P. 1–6.
7. Конструкции автомобилей. Антиблокировочные и противобуксовочные системы : зарубежный опыт // ЦНИИТЭИавтопром, М.,1989 – 79 с.
8. Управление фрикционным сцеплением на основе шим-сигнала с однопараметрической обратной связью / Л.Г. Красневский [и др.] // Перспективные приводные системы, трансмиссии и робототехнические комплексы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 окт. 2011 г. / Белорусско-российский ун-т. – Могилев, 2011. – С. 44-47.
9. Определение пороговых значений параметра обратной связи при широтно-импульсном управлении сцеплением / О.С. Руктешель [и др.] // Вестник Восточноукраинского нац. Ун-та им. В. Даля. – 2010. – № 6(148). – С. 97–101.