

УДК 629.03

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРАТЕГИИ DSAC ПРИ ТРОГАНИИ АВТОПОЕЗДА С МЕСТА В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ СИЛОВОГО АГРЕГАТА

**О. С. РУКТЕШЕЛЬ, В. А. КУСЯК**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

**А. В. БЕЛЕВИЧ, В. И. ЛУЦКИЙ**

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
г. Минск*

### Введение

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 КП используются ИМ 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 ЭМК с различными по диаметру дросселирующими 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».

Цель работы – проверка функциональной работоспособности спроектированной мехатронной системы управления силовым агрегатом автопоезда при трогании с места в автоматическом режиме путем проведения полунатурного эксперимента.

### Основная часть

Специалисты кафедры «Автомобили» БНТУ совместно с ОИМ НАН Беларуси разработали принципиальную схему испытательного стенда для отладки автоматизированной мехатронной системы управления силовым агрегатом (АМСУСА) автопоезда МА3530905-010 полной массой 35 т. 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, используемыми 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 ИМ, 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.

Силовой агрегат 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 демультипликатором.

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 ИМ 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 ИМ 25 переключения передач с пневматическим приводом. Блок 3 двухпозиционных ЭМК управляет наполнением полостей силовых цилиндров ИМ. 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.

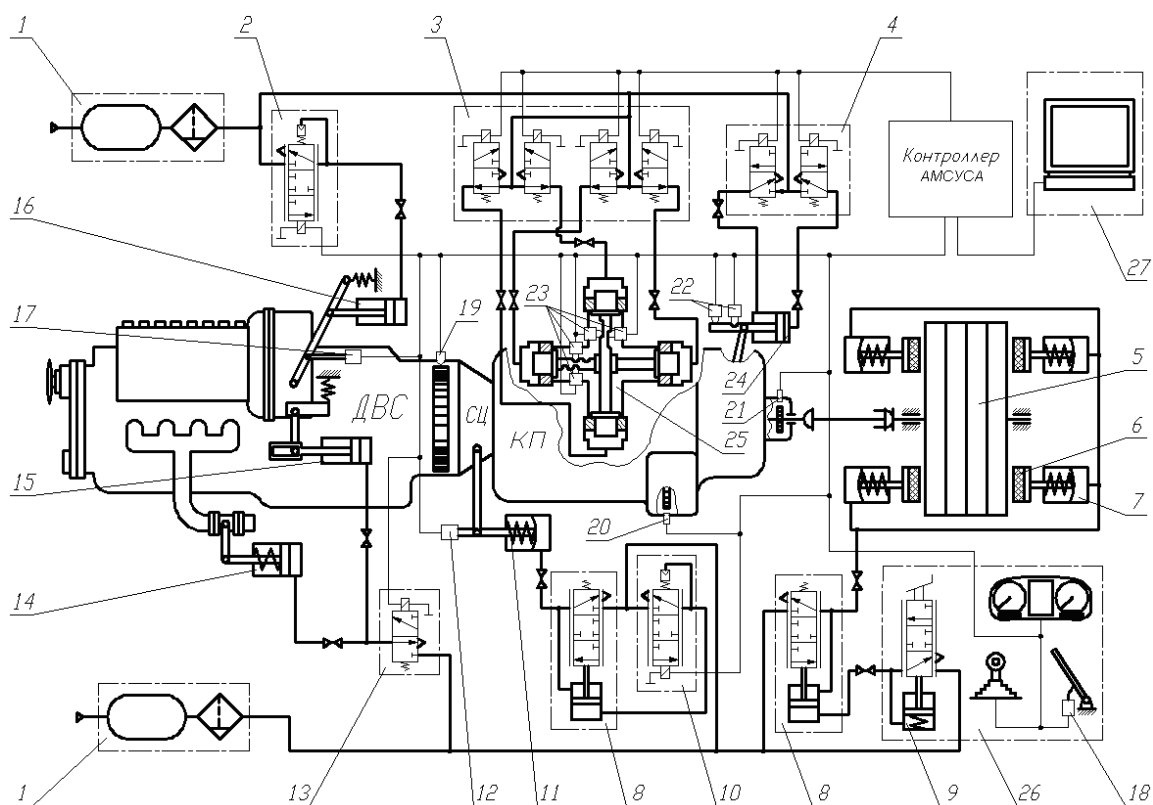


Рис. 1. Принципиальная схема стенда АМСУСА:

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

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-выключе-

чение 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 ЭМК 2–4, 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 ИМ сцепления и двигателя, а также определены зоны управления пропорциональных клапанов (рис. 2–4).

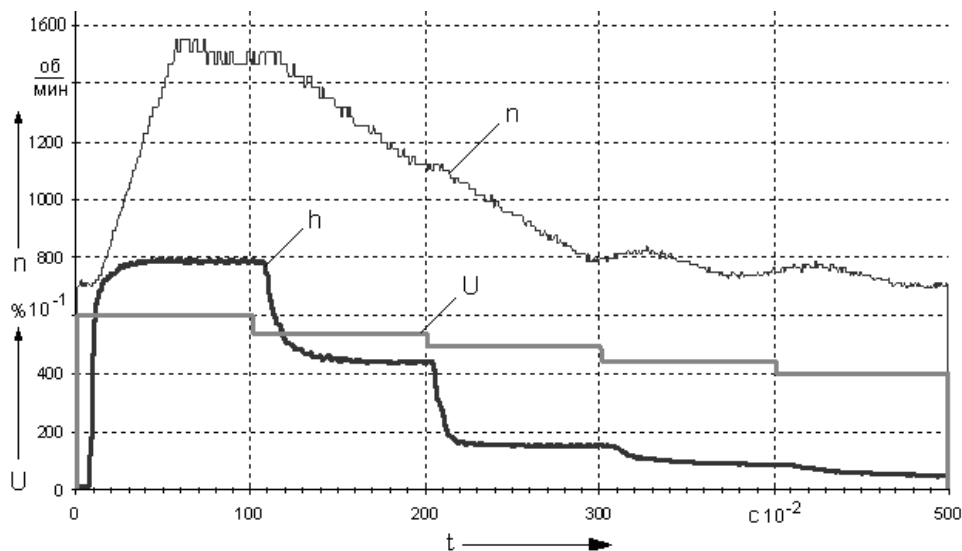


Рис. 2. Работа ИМ управления топливоподачей в зоне регулирования:  
 $U$  – управляющий сигнал ШИМ,  $\% \cdot 10^{-1}$ ;  $h$  – ход рычага ТНВД,  $\text{мм} \cdot 10^{-1}$ ;  
 $n$  – частота вращения коленчатого вала двигателя;  $t$  – время,  $\text{с} \cdot 10^{-2}$

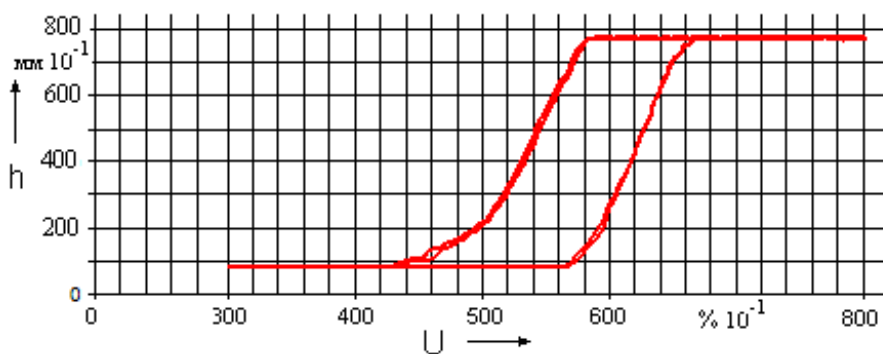


Рис. 3. Гистерезис ИМ управления двигателем:  
 $U$  – управляющий сигнал ШИМ,  $\% \cdot 10^{-1}$ ;  $h$  – ход рычага ТНВД,  $\text{мм} \cdot 10^{-1}$

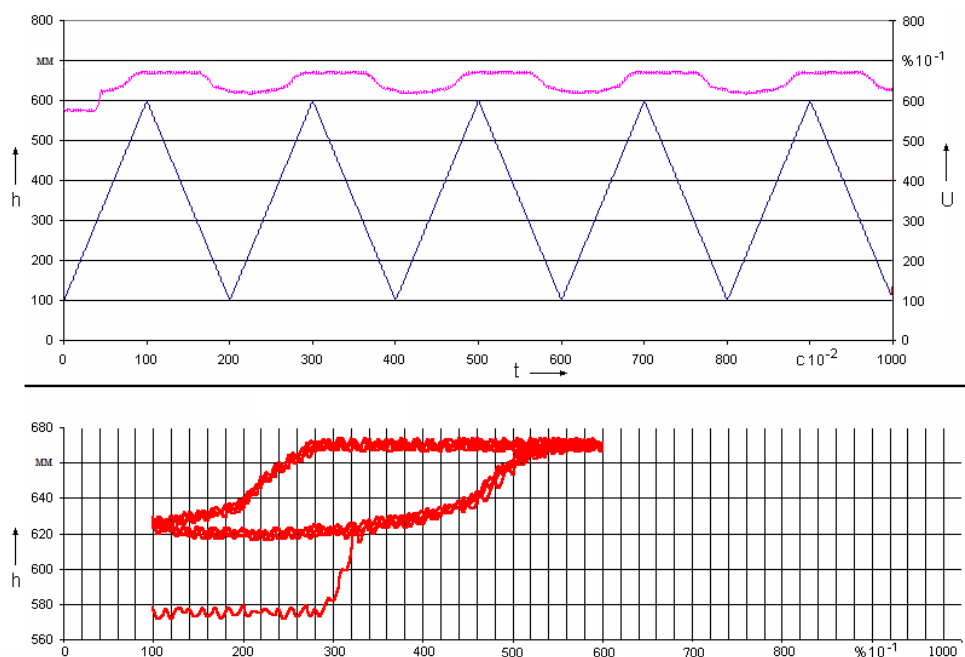


Рис. 4. Характеристика механизма управления сцеплением при частоте управляющего сигнала 100 Гц:  
 $U$  – управляющий сигнал ШИМ, %  $\cdot 10^{-1}$ ;  
 $h$  – ход рычага выключения сцепления, мм;  $t$  – время, с  $\cdot 10^{-2}$

Как видно из представленных результатов, зона управления имеет значительный гистерезис и нелинейность, а рабочий диапазон управляющего сигнала составляет около 18–22 % ШИМ при частоте 100 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.

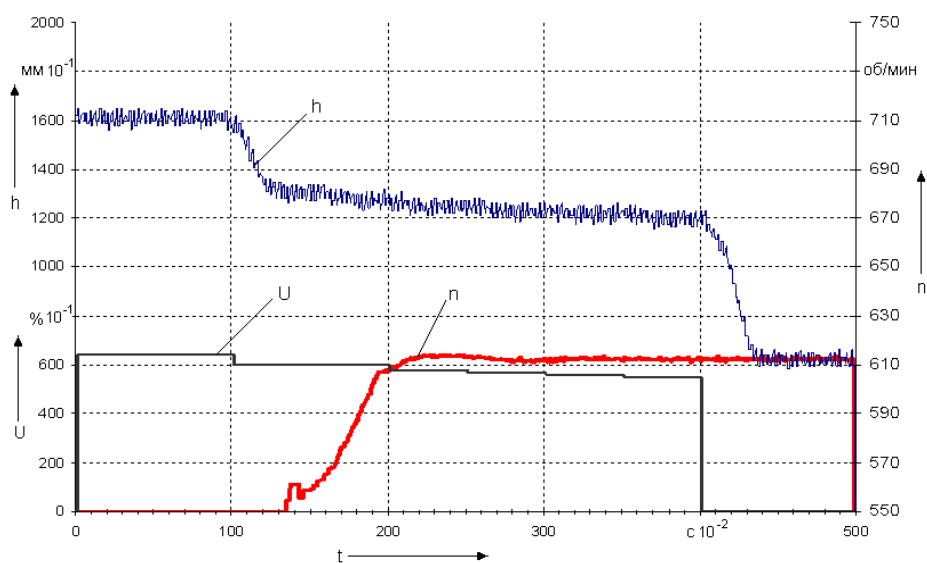


Рис. 5. Осциллограмма процесса быстрого включения сцепления:  
 $U$  – управляющий сигнал ШИМ, %  $\cdot 10^{-1}$ ;  $h$  – ход рычага сцепления, мм  $\cdot 10^{-1}$ ;  
 $t$  – время, с  $\cdot 10^{-2}$ ;  $n$  – частота вращения промежуточного вала КП, об/мин

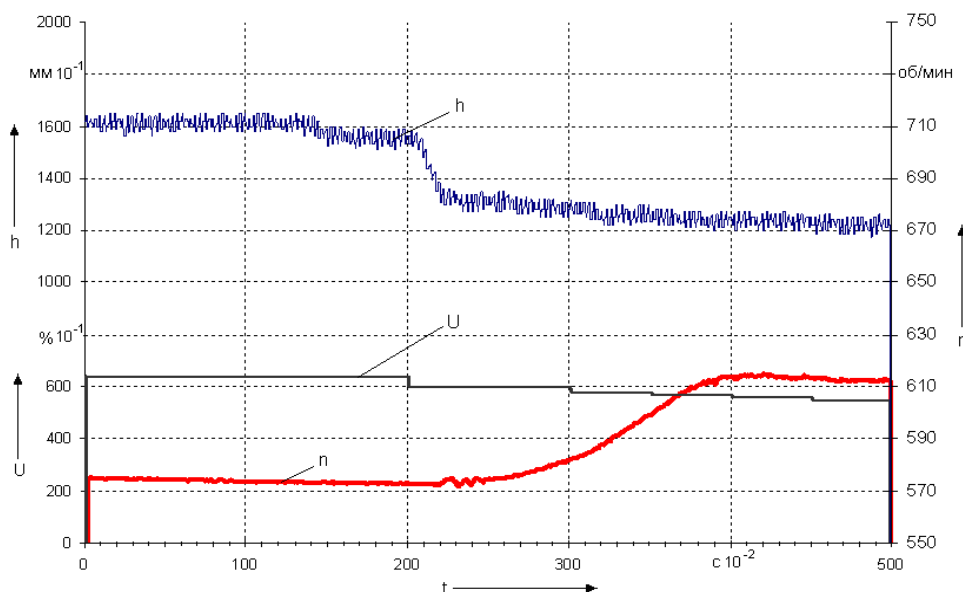


Рис 6. Осциллограмма процесса плавного трогания с места:  
 $U$  – управляющий сигнал ШИМ,  $\% \cdot 10^{-1}$ ;  $h$  – ход рычага сцепления,  $\text{мм} \cdot 10^{-1}$ ;  
 $t$  – время,  $\text{с} \cdot 10^{-2}$ ;  $n$  – частота вращения промежуточного вала КП, об/мин

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. Модуляция управляющего сигнала осуществлялась по формуле

$$U = \frac{K(Y_{\text{зад}} - Y_{\text{тек}}) + U_{i-1}(1 + 2\tau) - U_{i-2}\tau}{1 + \tau}, \quad (1)$$

где  $U$  – коэффициент заполнения сигнала ШИМ;  $Y_{\text{зад}}$ ,  $Y_{\text{тек}}$  – соответственно, уставка и текущее значение изменения угловых скоростей ведущего и ведомого дисков сцепления в единицу времени;  $K$ ,  $\tau$  – коэффициенты, влияющие на качество протекания переходных процессов.

Коэффициенты ПИ-регулятора [см. формулу (1)] подбирались таким образом, чтобы обеспечить плавность включения сцепления за относительно короткий интервал времени. 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 КП, содержащий 3 фазы регулирования с индивидуально настраиваемыми параметрами;
- алгоритм компенсации гистерезиса ИМ;
- алгоритм фильтрации измеряемых параметров: оборотов вращения и вычисляемых ускорений.

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

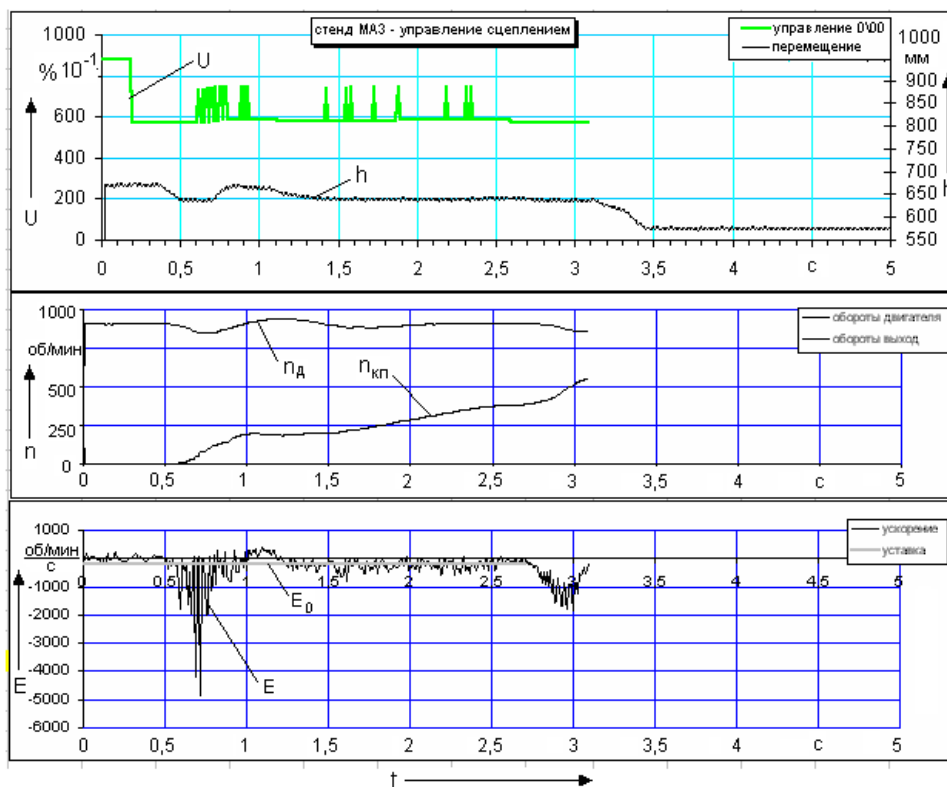


Рис. 7. Осциллограмма процесса трогания с ПИ-регулятором в цепи управления:  
 $U$  – управляющий сигнал ШИМ;  $h$  – ход рычага сцепления;  $t$  – время;  
 $n_{\text{д}}$ ,  $n_{\text{кп}}$  – частота вращения, соответственно, коленвала ДВС и промежуточного вала КП;  
 $E$ ,  $E_0$  – производная разности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

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  $21 \text{ рад/с}^2$  по ускорению ведомого диска, электронный блок управления (ЭБУ) формировал 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 в  $22,3 \text{ Вт/см}^2$  и  $10,1 \text{ Дж/см}^2$ , коэффициенту динамических нагрузок в 1,58 и максимальному размаху колебаний производной продольного ускорения автомобиля в  $38,5 \text{ м/с}^3$ .

### Заключение

1. Спроектированная мехатронная система управления силовым агрегатом автопоезда на базе сухого фрикционного сцепления и механической КП полностью работоспособна, что подтверждается результатами полунатурного эксперимента по троганию с места в автоматическом режиме.

2. Для обеспечения качественного протекания процесса трогания автопоезда с места включение сцепления необходимо производить при среднем темпе нарастания момента трения  $k_{\text{сц}} = 1,15 \text{ с}^{-1}$ , что возможно при наличии в цепи управления обрат-

ной связи по оборотам промежуточного или выходного вала. При таких параметрах алгоритма весь процесс трогания с места в автоматическом режиме работы силового агрегата происходит за время  $t_{\text{общ}} = 3,2$  с, причем время разгона ведомого диска до угловой скорости двигателя составляет 2,6 с, что соответствует удельным работе и мощности буксования фрикционных элементов, равной  $22,3$  Вт/см<sup>2</sup> и  $10,1$  Дж/см<sup>2</sup>, коэффициенту динамических нагрузок в 1,58 и максимальному размаху колебаний производной продольного ускорения автомобиля в  $38,5$  м/с<sup>3</sup>.

3. С целью увеличения быстродействия мехатронной системы на переходных режимах движения в алгоритм управления целесообразно вводить фрагмент компенсации гистерезиса ИМ дизельного двигателя и фрикционного сцепления, что положительно скажется на эксплуатационных свойствах АТС.

4. Оптимальная частота генерируемого сигнала с широтно-импульсной модуляцией для спроектированной мехатронной системы управления топливоподачей ДВС и фрикционного сцепления составляет 100 Гц и обеспечивает, при имеющихся геометрических параметрах ИМ и характеристиках электронных компонентов привода, диапазон управления ИМ в пределах 18–22 % ШИМ.

### Литература

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 С2 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В60К20/00, МПК<sup>7</sup> 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.<sup>5</sup> В60К 17/12 / D. P. Janecke, L. A. Kominck, 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. Красневский, Л. Г. 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. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2011. – С. 44–47.
9. Руктешель, О. С. Определение пороговых значений параметра обратной связи при широтно-импульсном управлении сцеплением / О. С. Руктешель [и др.] // Вестн. Восточноукр. нац. ун-та им. В. Даля. – 2010. – № 6 (148). – С. 97–101.