

УДК 62-50:621.3

В.А. Тихомиров, М.Н. Охотников, А.С. Плехов, А.Н. Блохин

**АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НАГРУЗОЧНОГО СТЕНДА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы разработки и реализации алгоритмов управления электромеханическими преобразователями нагрузочного стенда для испытания механических полуавтоматических и автоматических (роботизированных) трансмиссий автомобилей. Показана целесообразность исполнения системы управления на базе программируемого логического контроллера.

Ключевые слова: испытательный стенд; коробка передач; электромеханические комплексы; программируемый логический контроллер; сенсорная панель управления.

Технические решения известных стендов для исследования и испытания элементов трансмиссии автомобиля [1, 2] позволяют проводить исследования только для одного узла трансмиссии – коробки передач. Эти стенды предназначены для испытания коробок передач с ручным и автоматическим управлением и позволяют проводить ресурсные испытания, исследования трансмиссии на шумность, оценку КПД, внешних (нагрузочных) и энергетических характеристик. Они не предназначены для проведения комплексных одновременных испытаний нескольких трансмиссионных узлов и агрегатов таких как фрикционное сцепление и механическая коробка передач, или более сложное сочетание: фрикционное сцепление - механическая коробка передач - коробка отбора мощности или раздаточная коробка.

Кроме этого, вышерассмотренные решения не позволяют осуществлять доводку конструкции трансмиссии с командным (полуавтоматическим) или автоматическим управлением и проверку работы алгоритмов управления механизмами механической трансмиссии. На этих стендах нельзя провести исследования динамических процессов при трогании и переключении передач, на них невозможно рассмотреть особенности работы электропневматического привода управления узлами и агрегатами, которые используются на транспортных средствах средней, большой и особо большой грузоподъемности.

Для решения перечисленных задач в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева разработан и изготовлен электромеханический комплекс [3], предназначенный для испытания механических полуавтоматических и автоматических (роботизированных) трансмиссий автомобилей, имеющих электропневматический привод (рис. 1).

На рис. 1 обозначено: 1 – монтажная плита; 2 – приводной электродвигатель; 3 – фланец вала электродвигателя; 4 – датчик крутящего момента и частоты вращения; 5, 17, 20 – карданная передача; 6 – вал маховика; 7 – маховик; 8 – фрикционное сцепление; 9 – корпус маховика; 10 – картер фрикционного сцепления; 11 – опора коробки передач; 12 – коробка передач; 13 – первичный вал коробки передач; 14 – ведомый диск сцепления; 15 – выходной вал коробки передач; 16 – датчик крутящего момента и частоты вращения; 18 – инерционная масса; 19 – опора инерционной массы; 21 – вал нагружающего электродвигателя; 22 – нагружающий электродвигатель; 23 – ресивер; 24 – пневмомагистраль; 25 – блок электромагнитных клапанов; 26 – манометр; 27 – датчик давления; 28 – датчик перемещения вилки выключения сцепления; 29 – вычислительный комплекс; 30 – механическая и пневматическая часть стенда.

Для контроля работы узлов и агрегатов, стенд оснащен контрольно-измерительной аппаратурой, включающей датчики крутящего момента и частоты вращения 4 и 16, датчик перемещения 28 вилки (на схеме не показана) выключения испытуемого фрикционного сцепления автомобильного типа 8, датчики давления 27 установленные в исполнительных пневматических узлах. Сигналы от этих датчиков поступают на вычислительный комплекс 29, с

которого передается информация на персональный компьютер (на схеме не показан). По датчикам крутящего момента и частоты вращения 4 и 16 оценивается характер работы трансмиссии и определяются энергетические затраты в узлах и агрегатах трансмиссии.

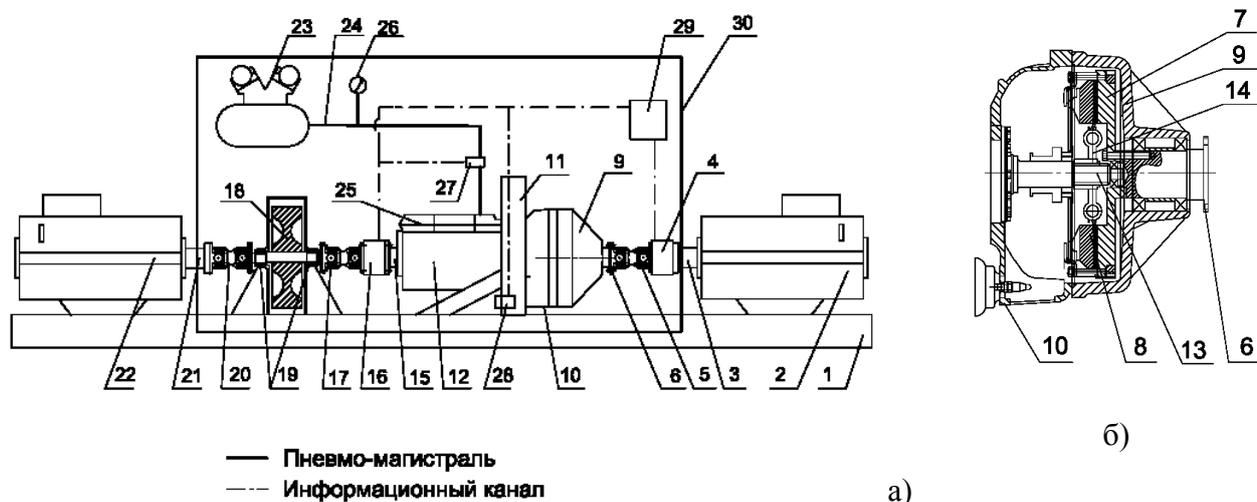


Рис. 1. Структурная схема электромеханического комплекса для испытания автомобильных трансмиссий с автоматическим или командным управлением:

а – электромеханическая и пневматическая часть стенда;

б – узел фрикционного сцепления

В командном режиме управления стенд работает следующим образом: электрическая часть получает из сети переменный ток направляемый в тиристорный преобразователь 30, который преобразует переменный ток в постоянный ток приводного двигателя 2, расположенного на монтажной плите 1. Посредством пульта управления осуществляется выбор необходимого числа оборотов приводного двигателя 2, который вращает ведущий вал 6, на котором установлен маховик 7 соединенный с испытуемым фрикционным сцеплением автомобильного типа 8, через датчики крутящего момента и частоты вращения 4, связанный с валом 6 посредством карданной передачи 5. Испытуемое фрикционное сцепление автомобильного типа 8 позволяет осуществить безударное и плавное переключения передач в испытуемой коробке 12. Крутящий момент через выходной вал испытуемой коробки передач 12 соединенный с ним датчик крутящего момента и частоты вращения 16 и карданную передачу 17 передается на инерционную массу 18 связанную, посредством карданной передачи 20, с нагружающим устройством 22, управление которым осуществляется при помощи пульта управления 33. Нагружающее устройство – электромеханический преобразователь 22 вырабатывает электрическую энергию постоянного тока и направляет ее в тиристорный преобразователь 31, переводящий постоянный ток в переменный и передает его в электрическую сеть 32. Возможно и другое использование нагружающего устройства – в функции двигателя, приводящего в движение выходной вал коробки передач в целях имитации движения автомобиля под действием инерционных или внешних движущих сил.

В автоматическом режиме управления работа стенда в целом аналогична командному режиму управления за исключением того, что включение передачи в испытуемой коробке 12 осуществляется не на основании сигнала от механизма выбора и включения передач (на схеме не показан) о выбираемой передаче, а в соответствии с алгоритмом переключения передач, заключенным в электронном блоке управления (на схеме не показан) изготовителем коробок передач.

На электромеханическом комплексе стенда обеспечиваются следующие режимы испытаний механических полуавтоматических и автоматических (роботизированных) трансмиссий автомобилей, имеющих электропневматический привод:

- расширенные (провокационные) испытания на работоспособность:
 - завышенные усилия включения;
 - минимальная величина рабочего давления пневмосистемы;
- испытания в автоматическом и преселекторном режимах работы коробок передач с определением моментов переключения передач;
- определение параметров работоспособности электропневматического управления коробкой передач и сцеплением;
- определение внутренних потерь в коробке передач;
- определение динамических усилий на деталях коробки передач при переключении;
- определение времени синхронизации и переключения передач;
- определение времени срабатывания и времени выключения/включения механизма управления сцеплением.

В целях иллюстрации возможностей стенда и разработанной авторами системы программного управления рассмотрим наиболее трудный в реализации режим испытания механизма управления сцеплением;

С целью уменьшения динамических нагрузок в трансмиссии и обеспечения плавного включения сцепления осуществляется экспериментальное определение зависимости положения вилки сцепления от положения педали газа. Проверка проводится в режим имитации трогания с места.

Испытание механизма управления сцеплением обычно выполняется в ручном режиме. При этом исследуются и анализируются все процессы, происходящие в механизме, и выбираются оптимальные параметры работы. Все параметры процессов фиксируются с помощью специального программного обеспечения на персональном компьютере.

При установке частоты вращения вала приводного электродвигателя 650 об/мин, на механизме выбора и включения передач устанавливается передача, соответствующая троганию автомобиля с места. При этом происходит выключение фрикционного сцепления и последующее перемещение ведущего диска в положение, обеспечивающее минимальный зазор между дисками без передачи крутящего момента. Затем происходит включение первой передачи в коробке. После включения первой передачи осуществляется плавное изменение углового положения педали газа, что приводит к увеличению частоты вращения вала приводного электродвигателя с 650 до 800 об/мин. Это должно приводить к изменению положения вилки сцепления, обеспечивающее сближение дисков сцепления с последующим плавным увеличением передаваемого крутящего момента от приводного электродвигателя до максимального значения. При резком уменьшении частоты вращения вала двигателя происходит разведение дисков сцепления до установления стабильной частоты вращения вала двигателя.

При достижении 800 об/мин происходит быстрый выпуск воздуха из пневмокамеры механизма управления сцеплением, что приводит к полному включению сцепления. При уменьшении частоты вращения до значения меньше 650 об/мин происходит разведение дисков сцепления до установления 650 об/мин.

Проверка закона автоматического переключения передач на электромеханическом комплексе может быть выполнена полностью в автоматическом режиме.

Для этого требуется обеспечить автоматический разгон приводного двигателя до заданной скорости с заданным темпом разгона. Это является имитацией управления педалью газа у реального автомобиля для получения заданной скорости движения автомобиля.

Аналогично в ручном режиме выполняется проверка времени включения передачи.

При ручной проверке закона автоматического переключения передач используется педаль, имитирующая педаль газа автомобиля, показанная на рис. 2.

На электромеханическом комплексе эта педаль задает скорость вращения приводного электродвигателя коробки передач. При этом исследуются и анализируются все процессы,

происходящие в трансмиссии, и выбираются оптимальные законы переключения передач. Все параметры процессов фиксируются с помощью специального программного обеспечения на персональном компьютере.



Рис. 2. Имитатор педали газа автомобиля

Определение передаточных чисел коробки передач на промежуточных передачах U_{km} производится по одному из следующих методов:

- 1) геометрическому ряду;
- 2) гармоническому ряду;
- 3) арифметическому ряду.

В основу первого метода положено условие постоянство скоростного интервала двигателя ($we1 - we2$), используемого при разгоне на различных передачах. Соблюдение этого условия (пренебрегая снижением скорости при переключении) обеспечивает равенство скоростей движения в конце разгона на данной передаче и в начале на последующей.

Проверка закона автоматического переключения передач требует реализации сложного алгоритма управления приводным электродвигателем и двигателем имитации движения автомобиля.

Алгоритм проверки закона автоматического переключения передач требует выполнения следующих действий:

1. Задание частоты вращения холостого хода приводного двигателя $n_{xx} = 600 \dots 650$ об/мин;
2. Включение j -й передачи в трансмиссии для трогания с места;
3. Увеличение частоты вращения приводного двигателя n педалью газа до оборотов, при которых происходит переключение на следующую ($j+1$) передачу;
4. Передача значения скорости двигателю-имитатору движения. Задание должно соответствовать с учетом передаточного числа коробки значению скорости, достигнутому приводным двигателем непосредственно перед переключением передачи. Сигнал на задание скорости двигателя имитации передается в момент отключения сцепления. Скорость двигателя имитации в момент отключения сцепления контролируется датчиком оборотов, и надо ее сохранить, воздействуя на вход управления тиристорного преобразователя, который питает этот двигатель.
5. Продолжаем движение на ($j+1$) передаче, увеличивая частоту вращения приводного двигателя с помощью педали газа до переключения на следующую ($j+2$) передачу;
6. Продолжаем процесс переключения передач до тех пор, пока не достигнем высшей передачи.

Требуемая зависимость скорости двигателя имитации n_2 от скорости приводного двигателя n_1 иллюстрируется рис. 3.

При автоматизации сложных технологических процессов в настоящее время обычно применяют программируемые промышленные контроллеры. Промышленный контроллер является законченным устройством, которое обладает широкими возможностями по реали-

зации программным способом различных алгоритмов управления и содержит встроенные подпрограммы регуляторов для автоматического регулирования параметров технологического процесса. Промышленный контроллер имеет встроенные интерфейсы для связи с внешними устройствами и различные блоки расширения. Все это позволяет выполнять программирование контроллера в соответствии с заданным алгоритмом управления, вводить в промышленный контроллер командные сигналы и сигналы от внешних датчиков, выдавать на внешние устройства управляющие и информационные сигналы.

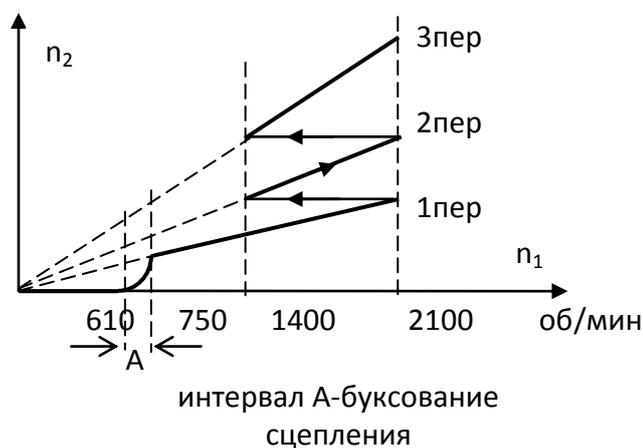


Рис. 3. Требуемая зависимость скоростей вращения двигателей стенда

Для оперативного изменения параметров программы логического управления и динамического регулирования в промышленном контроллере и визуального наблюдения параметров технологического процесса наиболее подходит другой элемент современных систем автоматизации – программируемая сенсорная графическая панель (сенсорный экран). Эта связка (контроллер и сенсорный экран) позволяет автоматизировать и визуализировать процедуру автоматической настройки трансмиссии.

Именно эта концепция и была принята при реализации системы управления электро-механическим комплексом для испытания механических трансмиссий автомобилей с автоматическим управлением. Совместно с контроллером и сенсорным экраном используется персональный компьютер, который собирает все данные о ходе испытаний механических полуавтоматических и автоматических (роботизированных) трансмиссий автомобилей.

Автоматический разгон приводного двигателя реализован с помощью формирования сигнала управления от промышленного контроллера для преобразователя питания приводного двигателя. В контроллере формируется линейно нарастающий код, который через цифро-аналоговый преобразователь подается на вход управления тиристорного преобразователя, питающего приводной двигатель. Плавно нарастающий код образуется путем заполнения двоичного счетчика, имеющегося в контроллере, импульсами от управляемого генератора импульсов на таймерах, которые имеются в составе контроллера. Изменяя период этих импульсов, можно менять темп разгона. Период является программным параметром таймера. Чем больше период, тем медленнее нарастает код на выходе счетчика и медленнее разгон приводного двигателя. На стенде предусмотрено 10 темпов разгона. Время разгона $t_{разг}$ определяется по следующей формуле:

$$t_{разг} = T_T * N_n = 0,01 * (11 - A) * N_n, \quad (1)$$

где $T_T = 0,01$ с – это время уставки таймера, который используется для построения генератора импульсов; N_n – код задаваемой скорости; A – темп разгона, 1, 2, 3, ..., 10. Здесь $A=1$ – минимальный темп разгона, $A=10$ – максимальный темп разгона.

При этом линейно нарастающий код задания скорости N_n изменяется следующим образом:

$$N_n = (N_{\text{зад}}/T_u) * k T_T,$$

где $N_{\text{зад}}$ – заданный код установившейся скорости; T_u – постоянная интегрирования; T_T – период тактов счета; $k = 0, 1, 2, \dots$ – номер такта.

Постоянная интегрирования T_u определяется по выражению

$$T_u = N_{\text{зад}} T_T / K_I,$$

где K_I – величина приращения за 1 такт счета (может меняться программным способом). Код N_n достигает значения $N_{\text{зад}}$, и на этом его возрастание прекращается.

Испытательный стенд имеет систему датчиков. Оба электродвигателя, приводной и имитации движения, имеют на валу импульсные датчики оборотов с количеством импульсов на оборот 120 имп./об. Сигналы этих датчиков используются для индикации действительных скоростей вращения n электродвигателей на сенсорном экране. Пересчет сигналов импульсных датчиков в код скорости N_n выполняется по следующему выражению:

$$N_n = \frac{60}{k * T} N, \quad (2)$$

где k – количество импульсов на оборот (датчики имеют 120 имп./об); T – интервал измерения в сек (принято $T = 50 * 10^{-3}$ сек); N – программный код скорости.

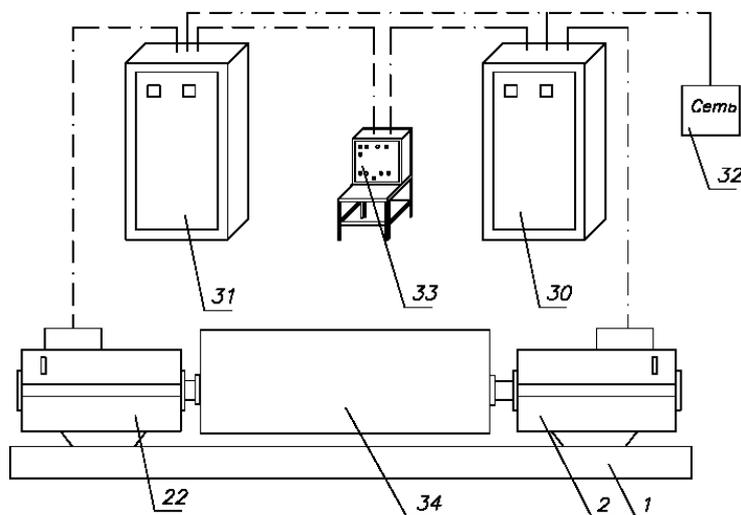
Программный код скорости определяется по формуле

$$N = T * f,$$

где f – частота импульсов в Гц от импульсного датчика оборотов, $f = k * n / 60$. Здесь n в об/мин.

Электромеханический комплекс позволяет выполнить испытания фрикционных сцеплений, коробок передач, коробок отбора мощности, раздаточных коробок и т.д., имеющих непосредственное ручное, дистанционное ручное, командное (полуавтоматическое) или автоматическое управление. Кроме этого, электромеханический комплекс позволяет осуществлять доводку конструкции трансмиссионных механизмов, узлов и агрегатов и алгоритмов их управления.

Электрическая часть стенда (рис. 4) состоит из приводного двигателя 2; механизма нагрузки 22, являющихся обратимыми электрическими машинами, закрепленных на монтажной плите 1; тиристорных преобразователей 30 и 31, питающиеся от сети 32 (380 В), расположенные рядом с монтажной плитой; пульт управления 33 приводным двигателем 2 и механизмом нагрузки 22. Позиция 34 – схематичное изображение механической и пневматической частей стенда.



— Соединительные провода

Рис. 4. Электрическая часть стенда

В качестве приводного двигателя 2 был выбран электродвигатель 4ПН280СГУХЛ4 220/220 1500/2600 с тахогенератором ТС-1М (производство ПАО «Электромашина», г. Харьков). Мощность 110 кВт, номинальные обороты 1500 об/мин, максимальные обороты – 2600 об/мин (рис. 4).

Тормозные устройства необходимы для того, чтобы нагружать двигатель при стендовых испытаниях путем поглощения его механической энергии специальным устройством – тормозом и измерять при помощи контрольно-измерительного оборудования развиваемый двигателем крутящий момент.

В настоящее время широкое применение получили тормозные устройства с гидравлическими и электрическими тормозами, в том числе электромагнитные.

Для обеспечения и поддержания требуемых оборотов и нагрузки для двигателя и генератора были выбраны преобразователи 30 и 31 для привода постоянного тока тиристорного типа ТП-500/460Н-2-2УХЛ4.

Электрические машины имеют мощность по 110 кВт каждая при номинальном напряжении 220 В. Преобразователи 30 и 32 характеризуются номинальным выпрямленным напряжением 460 В. Эти обстоятельства обуславливают потери из-за реактивных токов не менее 15% от установленной мощности электрических машин, которые покрываются генератором. Последний при мощности 150 кВА способен обеспечить менее 40 кВАр реактивной мощности, потребляемой преобразователями, что недостаточно для рассматриваемого комплекса.

В связи с этим, модернизированный тиристорный выпрямитель в звене постоянного тока наименее нагруженного преобразователя работает при опережающих углах управления с принудительной коммутацией в целях обеспечения генерации в питающую сеть реактивной мощности [4]. Последняя компенсирует реактивную мощность, потребляемую приводным двигателем стенда.

Все вычисления по приведенным выражениям выполняются с помощью промышленного контроллера. Причем для вычисления кода N и отсчета интервала измерения T используются имеющиеся в составе промышленного контроллера быстродействующие аппаратные счетчики с предельной рабочей частотой 20 кГц [5].

Схема взаимодействия отдельных блоков стенда, системы управления и измерения приведена на рис. 5.

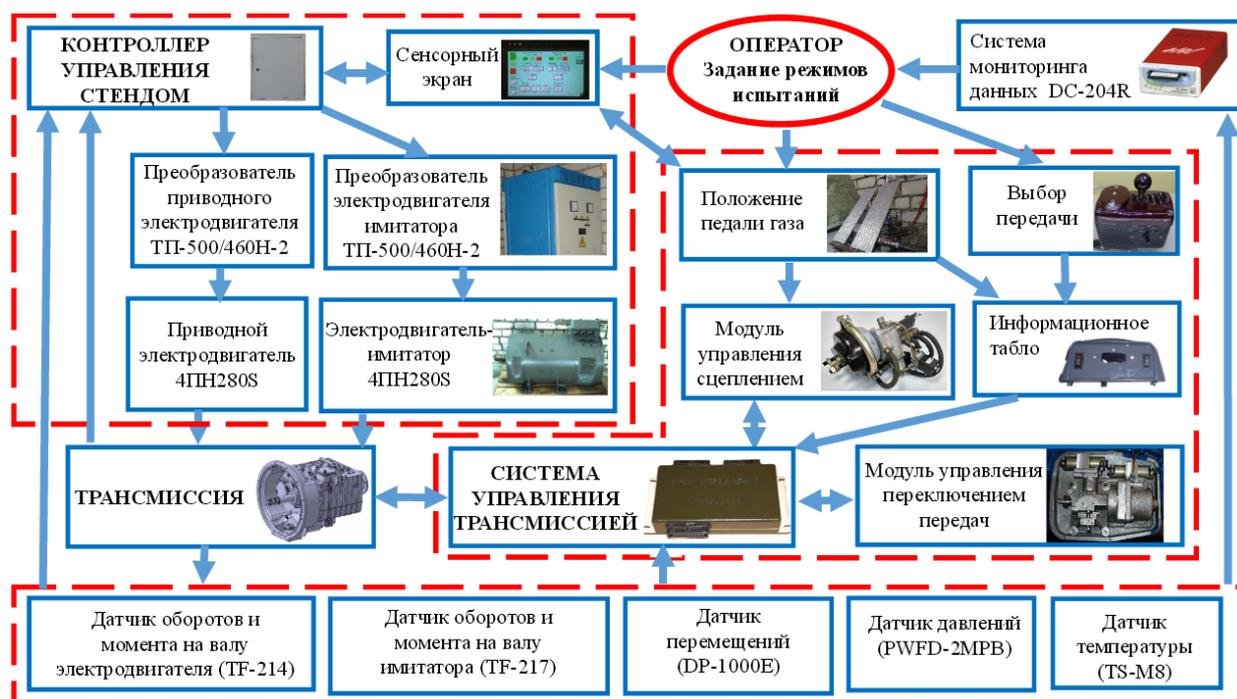


Рис. 5. Схема взаимодействия отдельных блоков стенда, системы управления и измерения

Силовые шкафы питания электродвигателей (приводного и имитации движения) и шкафы управления представлены на рис. 6.

Задание параметров управления и регистрация рабочих электромеханических параметров комплекса в автоматическом режиме проверки закона переключения передач выполняется с применением сенсорной панели. С ее помощью формируются командные сигналы, собирается полученная от оборудования информация в аналоговом или цифровом виде. Вид сенсорной графической панели при задании и отработке 1-й скорости представлен на рис. 7.



Рис. 6. Фотография шкафов управления стендом

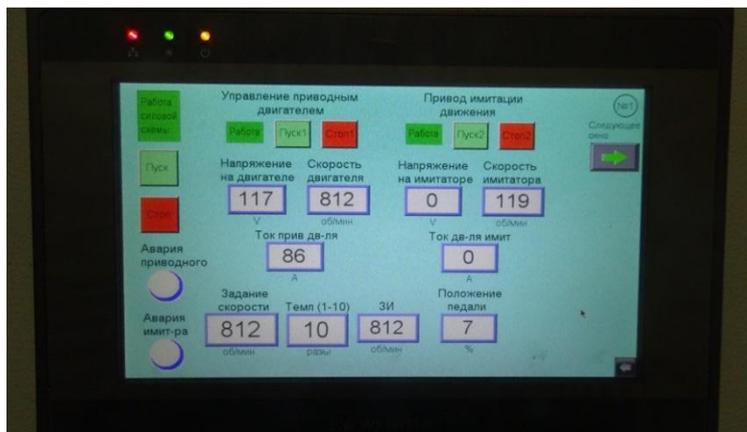


Рис. 7. Вид сенсорной графической панели при задании и отработке 1-й скорости

На сенсорной панели имеются все необходимые органы управления (кнопки «Пуск» и «Стоп») для подачи питания на испытательный стенд и подключения преобразователей приводного двигателя и двигателя имитации движения. На ней отображаются рабочие параметры этих электродвигателей: напряжение на двигателе, скорость двигателя и ток двигателя. Имеются цифровые сенсорные дисплеи для задания уровня скорости, до которой будет разгоняться приводной двигатель, дисплей для задания темпа разгона и дисплей, отображающий процесс нарастания скорости до заданного значения с заданным темпом. Также имеется цифровой дисплей, отображающий в % положение педали газа автомобиля при ручной проверке закона автоматического переключения передач. Вся информация на сенсорную панель поступает после обработки ее контроллером от имеющейся на стенде системы датчиков.

Выводы

1. Реализованы законы энергосберегающего и функционального управления электромеханическими преобразователями стенда.
2. Показана возможность реализации алгоритмов управления режимами стенда средствами регулируемого электропривода и программируемого контроллера.
3. Разработана и реализована современная система управления, совмещенная с системой измерения и фиксации результатов экспериментов.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках Соглашения №14.577.21.0080 от 05.06.2014 по теме «Разработка, исследование и создание амфибийного вездеходного транспортного средства с колесной формулой 8x8 и высокими экологическими качествами движителя для обеспечения жизнедеятельности на Севере», уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0080.

Библиографический список

1. www.kopis.ru.
2. <http://www.powerlinkpt.com/index.php/en/>.
3. Пат. 154 871(13) U1 Российская Федерация, МПК G01M 13/02. Стенд для ногофункциональных испытаний узлов и агрегатов Механических трансмиссий автомобилей с автоматическим или командным управлением [Текст] / Блохин Александр Николаевич, Плехов Александр Сергеевич, Маньковский Василий Владимирович, Шатилов Владимир Викторович, Любичев Павел Владимирович (RU); Заявка: 2014151594/28, 19.12.2014, 10.09.2015 Бюл. № 25.
4. **Blokhin, A.** Electromechanical Complex of Test Loading Stand of Multistage Transmissions with Automatic Control / A. Blokhin, S. Dobryaev, A. Plekhov, V. Titov // Applied Mechanics and Materials Vol. 763 (2015) pp 78-85, Trans Tech Publications, Switzerland, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.763.78.
5. **Тихомиров, В.А.** Программируемый регулятор нагрева для сложных технологических процессов / В.А. Тихомиров, Г.В. Свердлик // Труды НГТУ. – 2015. – № 1 (108). – С. 209–216.

*Дата поступления
в редакцию 28.09.2016*

V.A. Tikhomirov, M.N. Ohotnikov, A.S. Plekhov, A.N. Blokhin

**AUTOMATION OF MANAGEMENT ELECTROMECHANICAL
TRANSDUCER LOAD STAND**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

The article is devoted to problems of development and implementation of control algorithms electromechanical test of bench load for mechanical semiautomatic and automatic (robotic) vehicle transmissions. It demonstrated the effectiveness of the control system based on programmable logic controller.

Key words: test bench; transmission; electromechanical systems; programmable logic controller; touch panel.