

## ПРИМЕНЕНИЕ В СИСТЕМАХ АВТОПИЛОТИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТА АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЭМУЛЯЦИИ ДВИГАТЕЛЯ И ТРАНСИМИССИИ

М.Ф. Садыков, А.В. Голенищев-Кутузов, Н.К. Андреев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

**Резюме:** На сегодняшний день ряд ведущих фирм работают над разработкой автопилотов. Авторы статьи предлагают дополнить систему автопилота системой контроля технического состояния автомобиля. Разработанный комплекс аппаратно-программного обеспечения позволяет работать с виртуальной математической моделью газового двигателя грузового автомобиля КамАЗ и может быть перенастроен под различные модификации газовых и дизельных двигателей. В то же время, с помощью этого комплекса есть возможность выявить скрытые дефекты системы управления и снизить трудоемкость процедуры калибровки. Аппаратное и программное обеспечение позволяют испытывать электронные блоки управления в стандартных и аварийных режимах работы датчиков и приводов, обеспечивая, тем самым, соответствие современным российским и международным требованиям к системам управления автомобилями.

**Ключевые слова:** аппаратно-программное обеспечение устройства, устройства для контроля технического состояния двигателя, состояния двигателя в составе системы автопилота.

**DOI:**10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-67-74

## HARDWARE AND SOFTWARE ENGINE EMULATION IN THE AUTOPILOT SYSTEMS

M.F. Sadykov, A.V. Golenishchev-Kutuzov, N.K. Andreev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Abstract.** Now a number of the leading firms work on creation of an automobile autopilot. The authors of the presented article offer to complement the system of an autopilot with the control system of the car technical condition. The developed hardware and software complex allows working with virtual mathematical model of the gas engine of the KamAZ truck and can be recustoized under different modifications of gas and diesel engines. At the same time by means of this complex there is an opportunity to reveal the latent defects of a control system and to reduce labor input of calibration procedures. The hardware and software allows testing electronic control units in standard and emergency operation modes of sensors and actuators, thereby providing compliance to the modern Russian and international requirements to control systems of cars.

**Keywords:** hardware and software devices, device to control technical condition of the engine, the condition of the engine as part of the autopilot system.

### **Введение**

На сегодняшний день ряд ведущих фирм работают над созданием автопилота для автомобиля. Предполагается, что такой автопилот должен быть оснащен набором специальных датчиков дистанционного действия, которые устанавливаются с каждой стороны перед и за автомобилем. Они контролируют все, что происходит в радиусе 4–5 метров от движущегося автомобиля. Кроме того, в его передней части установлены камера и радар. На борту имеется модуль *GPS*.

Информация с датчиков обрабатывается компьютерной системой, которая воссоздает общую картину, анализирует её и выдает сигналы на управление транспортными средствами. Современные системы управления способны к самообучению и вследствие этого постоянно самосовершенствуются [1]. Например, в 2014 году для всех новых автомобилей марки «Тесла» был разработан свой стандарт технологии автопилота. В октябре 2015 года было добавлено эфирное обновление программного обеспечения, что дало этим автомобилям возможность самостоятельно ориентироваться и парковаться на параллельной парковке. В режиме автопилота автомобилям по-прежнему требуется управление водителя, но автомобиль использует множество датчиков, в том числе направленный вперед радар, камеру с возможностью распознавания изображений и 360-градусный ультразвуковой датчик, чтобы ориентироваться на полосе движения и обнаружить другие транспортные средства [2].

Существует два основных способа тестирования программного обеспечения микроконтроллера. Первым, который используется на ранних этапах разработки программы, является симулятор. Симулятор – это программа, которая выполняется на компьютере общего назначения и имитирует набор инструкций микроконтроллера. Этот метод не позволяет тестировать устройства ввода-вывода. Наиболее полезным инструментом для тестирования и отладки является встроенный эмулятор. Эмулятор установлен в цепи вместо микроконтроллера и, в свою очередь, подключен к компьютеру общего назначения (ПК). Программа микроконтроллера может быть протестирована вместе с остальным оборудованием, с которым она будет работать. Персональный компьютер управляет системой и позволяет тестировать различные процедуры. На этапе разработки в программу могут быть легко внесены изменения.

Для решения подобных задач широко применяется комплекс *LABCAR*, который имеет высокую стоимость, особенно – программное обеспечение. Близость всех решений делает невозможным изменение аппаратного обеспечения под конкретный электронный блок. Указанный комплекс очень сложен в разработке и адаптирован под конкретные конфигурации электронного блока управления (ЭБУ) и двигателя внутреннего сгорания. Эмуляция нестандартного оборудования возможна только после обращения к специалистам фирм-разработчиков, а это очень дорого.

Авторы статьи предлагают калибровать и отлаживать систему автопилотирования аппаратно-программным комплексом, разработанным в Казанском государственном энергетическом университете совместно со специалистами завода «КамАЗ».

Описываемое устройство содержит электронные блоки и программы, имитирующие функции блоков и агрегатов автомобиля, включая также эмуляцию контролируемых датчиков, их сигналов и программ вождения. Наличие программ эмуляции позволяет проверить и протестировать работу электронных узлов и алгоритмы управления двигателем. Разработанное устройство предназначено для проведения предварительной настройки электронных таблиц, создающих характеристики силового двигателя, отработки реакций на возникающие неисправности и отклонения в работе системы управления, проверки алгоритмов этой системы. В то же время это позволяет системе выполнять самообучение и самосовершенствоваться в процессе накопления опыта.

Система эмуляции позволяет также эффективно проводить процесс калибровки, а значит при установке сложных систем избегать резкого увеличения затрат на калибровку.

Такие системы представляют собой набор стандартных инструментов для выполнения калибровки в автоматизированной среде. Разработанная система также может быть использована для проектирования ЭБУ.

Схема аппаратно-программного комплекса эмуляции работы ЭБУ и газового двигателя внутреннего сгорания (ГДВС) с контролем крутящего момента и адаптивным отключением цилиндров показана на рис. 1. Аппаратно-программный комплекс для эмуляции работы газового двигателя внутреннего сгорания состоит из персонального компьютера, устройства ввода/вывода и блока согласования электрических сигналов (рис. 2). Соответствующий блок используется для регулировки уровня сигнала ЭБУ с уровнем сигнала блока ввода/вывода, для защиты входных цепей блока ввода/вывода и для формирования дефектов устройств системы управления. Блок состоит из платы согласования приводов, платы согласования датчиков и платы координации запросов пользователя. Основная часть каналов ЭБУ подключается к входным/выходным платам через делители напряжения, обеспечивающие координацию уровней напряжения. Обеспечение требуемого значения внутреннего сопротивления датчика осуществляется путем установки соответствующей нагрузки в виде сопротивления.

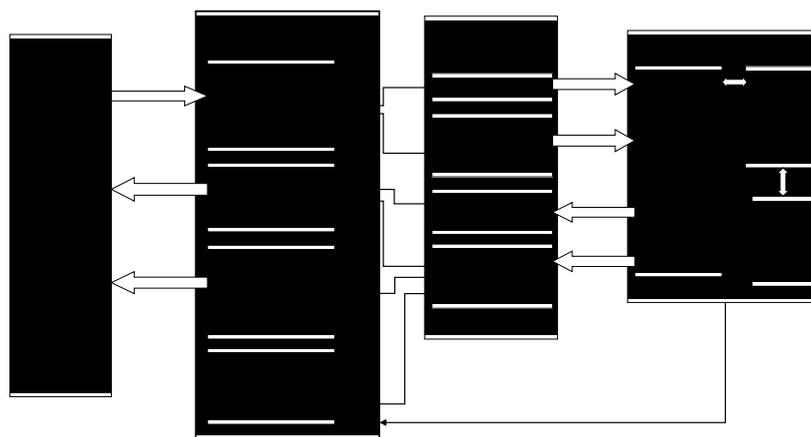


Рис. 1. Схема аппаратно-программной системы эмуляции работы ЭБУ и газового двигателя сгорания (ГСЭ) с контролем его крутящего момента и адаптивным выключением цилиндров



Рис.2. Внешний вид аппаратно-программного комплекса эмуляции работы ЭБУ и газового ДВС

## 2. Электронные элементы и программы, имитирующие функции блоков и сборок автомобилей

### 2.1. Разработка ЭБУ

В процессе разработки новых электронных блоков управления или модификаций существующих блоков возникает необходимость их проверки и тестирования правильности их алгоритмов управления. Можно выделить три этапа тестирования: *Mil*, *SIL* и *Hil* [3; 4].

Первый этап называется по стандарту *MIL* (модель в цикле), он состоит в создании опытного образца или модели устройства управления, которое должно быть разработано. Прототип ЭБУ смоделирован в программном обеспечении эмуляции. Чаще всего для этого применяются программные пакеты *NI LabVIEW* и *MATLAB Simulink*, в которых удобно управлять параметрами модели разработанного устройства. Это позволяет исключить ошибки на начальном этапе проектирования.

На втором этапе *SIL* (программное обеспечение в цикле) отлаженный алгоритм функционирования ЭБУ программируется как внешняя подключенная библиотека на алгоритмическом языке высокого уровня. Остальная виртуальная система моделируется с помощью пакетов *LabVIEW* и *Simulink*. На данном этапе отладка программируемого алгоритма осуществляется на языке C.

На третьем этапе *Hil* (аппаратное обеспечение в цикле) разработанный алгоритм зашивается в микроконтроллер. Это означает, что разработанное устройство реализуется в виде физически существующего пакета управления и проводится его проверка. Осуществляется тестирование взаимодействия ЭБУ с двигателем и другим оборудованием в режиме реального времени. Проводятся стендовые испытания на реальном двигателе внутреннего сгорания или на специальных эмуляторах, которые получили распространение в последнее время.

Проверка параметров, формируемых моделями аппаратно-программной системы и полученных на стендовых испытаниях реального двигателя, показала, что отклонение не превышает 5% (рис. 3.)

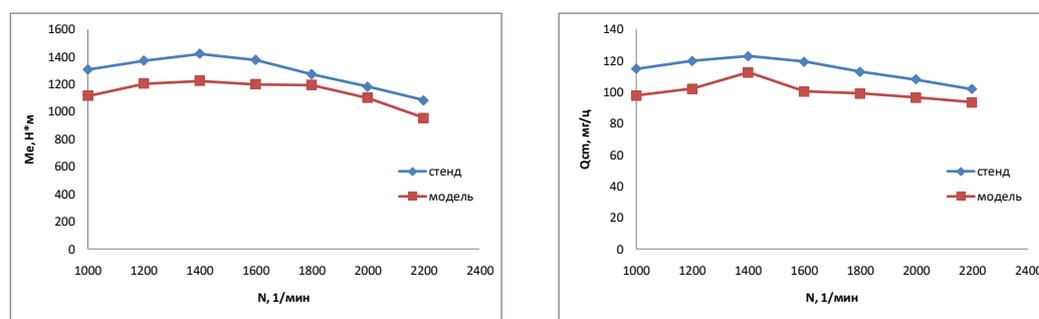


Рис. 3. Сравнение по параметрам крутящего момента и цикловой топливopодачи

Наряду с набором стандартных испытаний, следует ввести требования к современному ЭБУ согласно стандарту *ISO 26262*. Согласно ему, один ЭБУ должен обеспечить безопасную работу двигателя в условиях отказа важнейших датчиков и исполнительных механизмов. В существующей линейке средств разработки ЭБУ можно выделить программно-аппаратную эмуляцию работы двигателя внутреннего сгорания.

### 2.2. Элементы ЭБУ

Аппаратные модели выполняются в виде электронных устройств, имитирующих поведение двигателя грузовика в зависимости от входных значений ЭБУ и количества других параметров изменения настроек мощности, включая эмуляцию дефектов и параметров окружающей среды. Эмуляция производится, например, микропроцессорной

системой с параметрами конкретного двигателя для различных режимов поведения, обозначенных калибровочной картой с учетом влияния окружающей среды, функционирующей в режиме реального времени. Есть также комплексы, которые содержат в составе электродвигатель с переменным механическим моментом торможения.

Для временной шкалы одного рабочего цикла двигателя элементы блока ЭБУ можно подразделить на группы с быстро меняющимися параметрами и довольно медленно меняющимися параметрами.

Высокоскоростными элементами являются катушки зажигания, топливный дозатор, привод положения затвора дроссельной заслонки, датчик положения коленчатого вала, фазовый датчик, датчики давления и датчики температуры воздуха в коллекторе. Остальные устройства, такие как датчики давления и датчики температуры газа в цилиндре, положение педали газа и измеритель температуры охлаждающей жидкости, относятся к числу довольно медленных элементов управления.

Современный двигатель комплектуется набором датчиков и исполнительных механизмов, которыми управляет блок управления. Поэтому аппаратура комплекса должна содержать блок официального утверждения электрических сигналов и блок цифрового входа-выхода – АЦП/ЦАП. Программное обеспечение считывает и отправляет данные на платы АЦП, ЦАП и цифровые каналы. Аналоговые сигналы, полученные от реального блока управления через АЦП, преобразуются в цифровой код, который используется для дальнейшего применения в виртуальных моделях датчиков и приводов. Параметры, определенные в модели двигательного цикла, преобразуются виртуальными моделями датчиков в цифровые сигналы и передаются через ЦАП в реальном электронном блоке управления. Данные, не требующие преобразования в аналоговую форму, передаются непосредственно по цифровым каналам ввода/вывода.

В режиме работы двигателя датчики генерируют выходные сигналы для ЭБУ заданных уровней, которые не всегда поддерживаются платами ввода-вывода. Таким образом, схемы, предназначенные для эмуляции и согласования каждого датчика и привода, для сбора ЭБУ со сложной эмуляцией двигателя внутреннего сгорания должны обеспечивать параметры с учетом потребляемого тока, значения сопротивления и напряжения питания. Выходные контуры оснащаются релейными контактами для моделирования чрезвычайных ситуаций в виде обрыва или короткого замыкания в электрической цепи моделируемого устройства.

### 3. Внедрение устройства

Платформа *PXI* является основой аппаратного и программного обеспечения эмуляции работы двигателя. В шасси *PXI* установлен главный контроллер, обеспечивающий функционирование всех платформ и дополнительных модулей. *PXI* – платформа на базе персонального компьютера для автоматизации систем и измерений. *PXI* шасси объединяет *PCI* шины в модульном исполнении (компактный *PCI*). Основными преимуществами являются небольшая задержка и высокая пропускная способность до 132 Мбит/с при использовании связи через шину *PCI*. В аппаратном и программном обеспечении используется высокопроизводительный встроенный *Ni PXIe-835* контроллер, который базируется на процессоре *Intel Core i7-3610QE* для *PXI Express-System*. Вход аналоговой и цифровой информации в аппаратно-программную систему осуществляется с помощью высокоскоростной многофункциональной платы *NI-PXI-6251*, которая оптимизирована для точных измерений на высоких скоростях дискретизации. Поскольку входные и выходные порты контроллера интегрированы, все активные слоты шасси доступны для модулей измерений и управления. Такая конструкция контроллера минимизирует трудности интеграции и исключает необходимость дополнительных плат для большого количества соединительных связей.

Таким образом, шасси в формате *PXI* обеспечивает питание, охлаждение и производительность контроллера и модулей расширения через шины *PCI* и шину *PCI-Экспресс*. Выбранная конфигурация позволяет одновременно передавать большие объемы данных по входным/выходным каналам на контроллер оперативной памяти, а также выполнять запись и обработку полученных данных.

Рассмотрим некоторые примеры плат, выполняющих специальные функции.

Определение параметров системы впрыска топлива осуществляется с помощью платы с *NI* в формате *PXI-6602*. Плата содержит универсальный счетчик/таймер для измерения времени. В дополнение к функциям таймера, плата включает в себя *TTL-CMOS* цифровые порты ввода/вывода, которые могут быть легко отрегулированы для передачи и приема данных.

Точный контроль временных параметров системы зажигания реализован с использованием программируемых логических плат *NI* в формате *PXI-7952R*. Это плата высокой производительности, реконфигурируемая, программируемая с помощью программного обеспечения *LabVIEW* для ПЛИС. Архитектура программируемых логических интегральных схем (*FPGA*) оптимизирована для более быстрых и эффективных циклов выполнения в *LabVIEW FPGA* и позволяет выполнять несколько операций в одном цикле.

Цепи согласования сигналов датчиков и исполнительных устройств интегрированы в блок эмуляции и согласования, который устанавливается в *PXI*. Разработанный блок для согласования входных и выходных сигналов позволяет подключить аппаратную систему к стандартному разъему блока управления (ЭБУ), а также осуществляет эмуляцию дефектов в электрических цепях, датчиках и исполнительных механизмах.

Модель программируемого двигателя может быть построена на базе библиотек, содержащихся в программных комплексах в среде *Simulink*, *LabVIEW* и *GT-POWER*, *TESIS*, *DINAware*, *SimulationX*, *DIESEL-PK*, *STAR-CD*, *WAVE* или с помощью совместимых библиотек от разработчиков контрольно-измерительных приборов или автомобильных производителей. Соединенные блоки моделирования других частей транспортного средства и настройки мощности также являются частью инструментов разработки. Блок эмуляции двигателя осуществляется в виде программного комплекса на базе персонального компьютера, функционирующего в режиме реального времени. Схема виртуальной модели газового двигателя показана на рис. 4. Связь с ЭБУ осуществляется через платы расширения, подключаемые с помощью стандартных протоколов [5].

Одним из важнейших датчиков электронной системы управления двигателем является датчик положения коленчатого вала. Особенностью датчика является широкий диапазон вариаций амплитуды переменного напряжения на выводах. Минимальная амплитуда сигнала переменного напряжения на частоте вращения синхронизатора 20 Гц не менее 0,2 В. Максимальная амплитуда сигнала на частоте вращения синхронизатора 6000 Гц не превышает 250 В. Регулировка ЭБУ с помощью канала, который соединяет датчик положения коленчатого вала с блоком ввода/вывода осуществляется по схеме, выполненной на интегральном усилителе мощности *TDA230*. Выходная цепь снабжена релейными контактами, создающими имитацию аварийных ситуаций разрыва и короткого замыкания в электрической цепи датчика.

Описанный аппаратно-программный комплекс позволяет работать не только с виртуальной математической моделью газового двигателя КамАЗ, но и может быть перенастроен под различные модификации газовых и дизельных двигателей. С помощью этого комплекса можно обнаружить скрытые дефекты системы управления и программного обеспечения, а также значительно повысить точность управления и снизить трудоемкость калибровочных работ. Описанные устройства и программы могут быть использованы также для разработки и отладки новых автомобильных систем управления и контроля состояния.



Рис. 4. Блок-схема виртуальной модели газового двигателя

### Заключение

Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет работать с виртуальной математической моделью газового двигателя грузового автомобиля КамАЗ и может быть перенастроен под различные модификации газовых и дизельных двигателей. В то же время, с помощью этого комплекса есть возможность выявить скрытые дефекты системы управления и снизить трудоемкость процедуры калибровки. Аппаратное и программное обеспечение позволяет испытывать электронные блоки управления в стандартных и аварийных режимах работы датчиков и исполнительных механизмов, обеспечивая тем самым соответствие современным российским и международным требованиям к системам управления автомобилями.

### Литература

1. Golson, J., Bohn, Dieter (2016-10-19). «All new Tesla cars now have hardware for 'full self-driving capabilities'». The Verge. Retrieved 2016-10-22.
2. Fuehrer, Th., Hugel, R., Hartwich, F., Weiler, H.: «FlexRay – the communication system for future control systems in vehicles» SAE paper 2003-01-0110, Detroit, 2003.
3. K.E. Nisz, P.T. Oth, D.F. Oldor, T.K.Ulcsar, 2011. Vehicle dynamics based ABS ECU testing on a real time HIL simulator. Hungarian Journ. of Industrial Chemistry. Veszprem, 39(1): 57-62. University of Pannonia, Institute of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering. 8200 Veszprem, Eguyetem u. 10., Hungary.
4. Eckard Bringmann, Andreas Kramer, 2008. International Conference on Software Testing, Verification, and Validation. Model Based Testing of Automotive Systems, PikeTec GmbH, Germany.
5. Садыков М.Ф., Гараев В.М., Муратаев И.А., Ярославский Д.А., Гайнутдинов А.Р. Аппаратно-программный эмулятор ДВС с графическим программированием алгоритма // Вестник Казанского технологического университета. 2014. С. 293–294.

### Авторы публикации

**Садыков Марат Фердинантович** – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: sadykov@kgeu.ru.

**Голенищев-Кутузов Александр Вадимович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Андреев Николай Кузьмич** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

### References

1. Golson, J., Bohn, Dieter (2016-10-19). “All new Tesla cars now have hardware for 'full self-driving capabilities'”. The Verge. Retrieved 2016-10-22.
2. Fuehrer, Th., Hugel, R., Hartwich, F., Weiler, H.: “FlexRay – the communication system for future control systems in vehicles” SAE paper 2003-01-0110, Detroit, 2003.
3. K.E. Nisz, P.T. Oth, D.F. Oldor, T.K.Ulcsar, 2011. Vehicle dynamics based ABS ECU testing on a real time HIL simulator. Hungarian Journ. of Industrial Chemistry. Veszprem, 39(1): 57-62. University of Pannonia, Institute of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering. 8200 Veszprem, Egyetem u. 10., Hungary.
4. Eckard Bringmann, Andreas Kramer, 2008. International Conference on Software Test-ing, Verification, and Validation. Model Based Testing of Automotive Systems, PikeTec GmbH, Germany.
5. Sadykov M.F., Garaev V.M., Murataev I.A., YAroslavskiy D.A., Gaynutdinov A.R. Apparato-programmnyy emulyator DVS s graficheskim programmirovaniem algoritma. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. P. 293–294.

### Authors of the publication

**Marat F. Sadykov** – Cand. of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Theoretical bases of electrical engineering» of Kazan State Power Engineering University (KSPEU). E-mail: sadykov@kgeu.ru.

**Alexandr V. Golenishchev-Kutuzov**– Dr. of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of «Industrial Electronics and Lighting Engineering» of KSPU.

**Nikolay K. Andreev** – Dr. of technical Sciences, Professor at the Department of «Instrumentation and Automatic Electric Drive» of KSPU.

*Поступила в редакцию*

*26 февраля 2018 г.*