

## Разработка системы тестирования электронных блоков управления сельскохозяйственной техники

Дмитрий Владимирович Назаренко<sup>1</sup>, Вадим Евгеньевич Большев<sup>2</sup>,  
Максим Александрович Мосяков<sup>3</sup>, Николай Георгиевич Кынев<sup>2</sup>, Евгений Андреевич Ивлиев<sup>1</sup>,  
Денис Дмитриевич Медведев<sup>1</sup>, Андрей Романович Пасечников<sup>1</sup>, Константин Андреевич Николаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия.

<sup>2</sup>ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия.

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

г. Москва, Россия

e-mail: vadimbolshev@gmail.com

**Аннотация.** Современные сельскохозяйственные транспортные средства содержат в своем составе большое количество компонентов, в составе которых имеются микроконтроллеры, реализующие различные алгоритмы, поэтому отклонения и неточности их работы естественным образом приводят к сбоям и ошибкам работы системы в целом. В настоящий момент у производителей сельскохозяйственной техники в арсенале имеются сравнительно простые системы и методы тестирования, не позволяющие выполнить глубокую проверку алгоритмов и составляющих их электронных компонентов, поэтому разработка комплексной системы тестирования электронных блоков является актуальной задачей. В статье описывается разработка и принцип работы системы тестирования для настройки, проверки и отладки логики работы существующих и перспективных (разрабатываемых) электронных блоков, в том числе блоков управления из состава бортовой системы управления сельскохозяйственной техники. В процессе работы использовались методы компьютерного моделирования, программирования и программные пакеты FreeCAD, САПР КОМПАС-3D v21 и SW4STM32. Для написания кода использовались языки программирования Python 3 и C/C++. Результатом исследования является разработка методики и изготовление опытного образца системы тестирования (программно-аппаратного комплекса), практическое использование которого показало его универсальность и многофункциональность. Разработанная система позволяет реализовать анализ реакции системы управления на заранее разработанные тестовые воздействия, диагностировать недоработки, поломки и сбои в работе устройства, как в штатных, так и аварийных условиях работы. Система также позволяет имитировать аварийные условия работы сельскохозяйственной техники и проверить устойчивость работы устройства управления в предельных и аварийных режимах.

**Ключевые слова:** тестирование; электронный блок; сельскохозяйственная техника; программно-аппаратный комплекс; контроль качества; поверка оборудования; стенд для тестирования.

**Для цитирования:** Назаренко Д. В., Большев В. Е., Мосяков М. А., Кынев Н. Г., Ивлиев Е. А., Медведев Д. Д., Пасечников А. Р., Николаев К. А. Разработка системы тестирования электронных блоков управления сельскохозяйственной техники // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 184–193. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp184-193>.

## AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

## Development of a system for testing electronic control units of agricultural machinery

Dmitry V. Nazarenko<sup>1</sup>, Vadim E. Bolshev<sup>2</sup>, Maxim A. Mosyakov<sup>3</sup>, Nikolay G. Kinev<sup>2</sup>,  
Evgeny A. Ivliev<sup>1</sup>, Denis D. Medvedev<sup>1</sup>, Andrey R. Pasechnikov<sup>1</sup>, Konstantin A. Nikolaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FSBEI HE «Don State Technical University», Rostov on Don, Russia

<sup>2</sup>FSBSI «Federal Scientific Agroengineering Center VIM», Moscow, Russia

<sup>3</sup>FGBOU VO «Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev», Moscow, Russia

e-mail: vadimbolshev@gmail.com





**Abstract.** Modern agricultural vehicles contain a large number of components, which include microcontrollers that implement various algorithms, so deviations and inaccuracies in their work naturally lead to failures and errors in the system as a whole. At the moment, manufacturers of agricultural machinery have in their arsenal relatively simple systems and testing methods that do not allow for a deep check of algorithms and their electronic components, so the development of a comprehensive system for testing electronic components is an urgent task. The article describes the development and operation of a testing system for setting up, testing and debugging the logic of the operation of existing and future (under development) electronic units, including control units from the on-board control system of agricultural machinery. In the process of work, methods of computer modeling, programming and software packages FreeCAD, CAD KOMPAS-3D v21 and SW4STM32 were used. The programming languages Python 3 and C/C++ were used to write the code. The result of the study is the development of a methodology and the manufacture of a prototype testing system (software and hardware complex), the practical use of which has shown its versatility and versatility. The developed system makes it possible to implement an analysis of the response of the control system to pre-designed test effects, to diagnose defects, breakdowns and malfunctions of the device, both in normal and emergency operating conditions. The system also allows you to simulate the emergency conditions of agricultural machinery and check the stability of the control device in limiting and emergency modes.

**Keywords:** testing; electronic unit; agricultural machinery; software and hardware complex; quality control; equipment verification; test stand

**For citation:** Nazarenko D. V., Bolshhev V. E., Mosyakov M. A., Kinev N. G., Ivliev E. A., Medvedev D. D., Pasechnikov A. R., Nikolaev K. A. Development of a system for testing electronic control units of agricultural machinery. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2023; (10): 184–193. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp184-193>.

**Введение.** Современные сельскохозяйственные транспортные средства содержат в своем составе сложные мехатронные системы и интеллектуальные исполнительные механизмы, представляющие собой объединение узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, к которым можно отнести многочисленные датчики, исполнительные механизмы, работающие под управлением центральных бортовых компьютеров [1, 2]. Разработка и серийное производство таких сложных систем требует тщательной проверки и тестирования как отдельных блоков, так и системы в целом [3, 4]. Сложные электронные системы зачастую содержат в своем составе алгоритмы самодиагностики, однако самодиагностика в большинстве случаев выполняет только базовые функции тестирования и не может обеспечить глубокую проверку всех систем, и малоэффективна на этапе разработки, модернизации и тестирования каждого устройства на конвейере в условиях серийного производства. На практике требуются дополнительные (внешние) системы тестирования для глубокого анализа качества выпускаемой продукции, ориентированные на использование в составе производственной линии.

Современные сельскохозяйственные транспортные средства содержат в своем составе большое количество компонентов, в составе которых имеются микроконтроллеры, реализующие различные алгоритмы, поэтому отклонения и неточности их работы естественным образом приводят к сбоям и ошибкам работы системы в целом [5]. На настоящий момент в РФ у производителей сельскохозяйственной техники в арсенале имеются сравнительно простые системы и методы тестирования, не позволяющие выполнить глубокую проверку алгоритмов и составляющих их электронных компонентов [6, 7]. Зачастую для проверки используются приборы общего назначения, такие как мультиметры, осциллографы и генераторы сигналов, что не позволяет оперативно выполнить тщательную, комплексную проверку в условиях серийного производства. Важно отметить, что структура и состав системы тестирования в значительной степени определяется структурой самих тестируемых блоков, протоколами тестирования и глубиной проверки работоспособности устройства.

Существуют готовые системы тестирования, такие как системы, предлагаемые американской компанией National Instruments [8], обладающие таким недостатком как требование к значительной адаптации к постоянно меняющейся линейке выпускаемой продукции, включающей в себя наличие технической поддержки со стороны производителя, что затруднено в связи с санкциями, наложенными на РФ. Также данные системы тестирования обладают высокой стоимостью как приобретения оборудования в санкционных условиях, так и обслуживания. Стоимость даже самых примитивных продуктов National Instruments, таких как NI USB-6003, является стала неоправданной. Применение проприетарного программного обеспечения (например, LABVIEW) так же накладывает свои ограничения на его использование из-за лицензионных ограничений. Продук-



ты National Instruments традиционно ориентированы на использование в среде Windows, включая сопутствующее ПО от Microsoft, поддержка которой в РФ прекращена с марта 2022.

Поэтому разработка комплексной системы тестирования электронных блоков на основе технических решений и компонентов, доступных на территории РФ, является актуальной задачей как для сельскохозяйственной промышленности, так и электронной промышленности в целом. Важным фактором, разработки системы тестирования является развитие электронной промышленности, которая является приоритетным направлением развития в России.

Цель исследований – разработка комплексной системы тестирования электронных блоков управления из состава бортовой системы управления сельскохозяйственной техники.

**Методика исследований.** В процессе разработки системы тестирования использованы методы компьютерного моделирования, программирования и пакеты программных средств FreeCAD, САПР КОМПАС-3D v21 и SW4STM32. При моделировании конструкции системы тестирования электронных блоков, учитывались технические требования к создаваемой продукции. Все модули подключаются к персональному компьютеру через порт USB. Состав и количество модулей может варьироваться в зависимости от задачи тестирования, но, в соответствии с требованиями решаемых задач и условий эксплуатации были ограничены, и составляют: не более 60 каналов аналого-цифровых преобразователей «АЦП», не более 60 каналов цифро-аналоговых преобразователей «ЦАП», не более 30 каналов «Нагрузки верхнего ключа» и не более 30 каналов «Нагрузки нижнего ключа». Температурный диапазон работы всех модулей: «коммерческий» (0...70 °С). Программное обеспечение для персонального компьютера написано на языке программирования Python 3. Технические требования к модулю «АЦП» – входное напряжение от нуля до 36 В, частота выборок АЦП: до 5000 выборок в секунду с буферизацией до 1000 выборок, разрядность АЦП: не менее 10. Технические требования к модулю «ЦАП» – выходное напряжение от нуля до 36 В, выходной ток до 1 Ампера, выходной сигнал широтно-импульсной модуляции (ШИМ) частотой до 20 кГц, выходной периодический сигнал произвольной формы до 10 кГц. Технические требования к модулю «Нагрузки верхних ключей» и модулю «Нагрузки нижних ключей» – обеспечение тока нагрузки 2 А (на нагрузочном резисторе 12 Ом при напряжении питания 24 В, ток нагрузки не стабилизируется), максимальное напряжение на нагрузочном резисторе модулей нагрузки: 36 В.

**Результаты исследований.** Система тестирования электронных блоков предназначена для настройки, проверки и отладки логики работы существующих и перспективных (разрабатываемых) электронных блоков управления из состава бортовой системы управления сельскохозяйственной техники.

Стенд представляет собой программно-аппаратный комплекс.

Аппаратная часть стенда реализует генерацию тестовых электрических сигналов, подаваемых на входы тестируемого электронного блока; реализацию тестовых электрических нагрузок выходов тестируемого электронного блока; оцифровку выходных сигналов тестируемого блока с целью их отображения, записи и дальнейшего анализа.

Программная часть стенда реализует интерфейс с пользователем на экране ПК; программное задание тестовых сигналов;

считывание оцифрованных сигналов отклика тестируемого блока на тестовые сигналы.

Общая структура стенда представлена на рис. 1. Структура системы является конфигурируемой и расширяемой в зависимости от задачи тестирования и типа тестируемого модуля.

На рис. 1 в центре выделено «Тестируемое устройство», выше которого на рисунке изображены платы АЦП/ЦАП для тестирования входов, выходов и логики работы тестируемого устройства, а ниже показаны резисторы нагрузки с цепями коммутации и управления через RS-485/GPIO для испытания нагрузочной способности выходных каскадов. Все компоненты связаны в единую сеть RS-485 и подключаются к ПК. Для питания компонентов схемы используются два источника питания, 36 В для силовых цепей и 5 В для цепей питания микроконтроллера и логических схем. Связь аппаратной части стенда с ПК осуществляется посредством шины RS-485 через преобразователь USB / RS-485. Программно этот интерфейс реализован с применением открытого протокола Modbus RTU. Применение шины RS-485 с протоколом Modbus позволяет изменять количество и состав применяемых в системе тестирования модулей таких как модули АЦП, ЦАП и модули нагрузки. При необходимости система может быть дополнена модулями необходимыми для тестирования. Сеть Modbus реализует масштабируемую систему адресации, которая позволяет обеспечить доступ к каждому модулю по его

индивидуальному адресу. Адрес Modbus каждого модуля задается при конфигурации системы тестирования на этапе ее комплектования. Комплектация системы тестирования определяется требуемым числом ходов и выходов для тестирования, а также методами их тестирования.

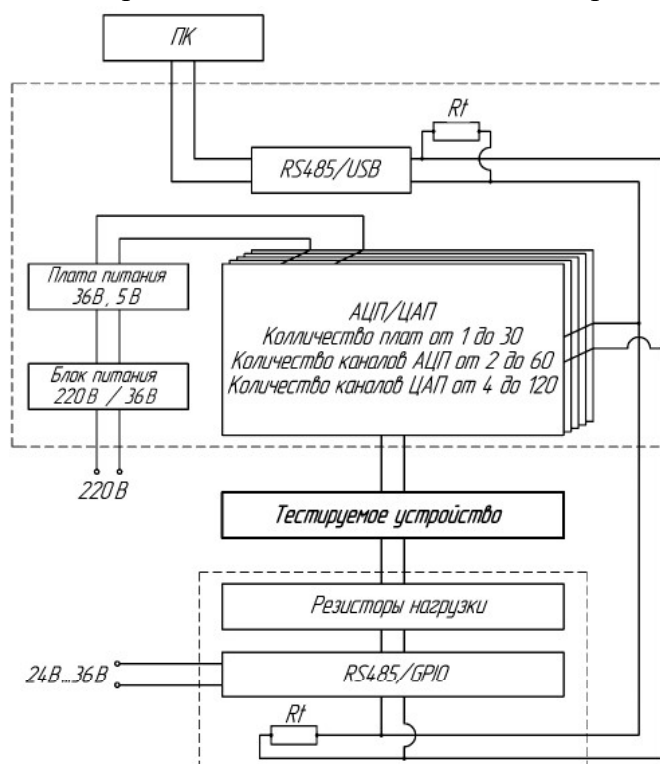


Рис. 1. Общая структура системы тестирования

Программная часть является открытой и реализована на языке Python 3. Применение данного языка программирования обеспечивает совместимость работы программного обеспечения на персональных компьютерах как зарубежного, так и отечественного производства, работающих под управлением различных операционных систем с поддержкой Python 3. Применение открытого исходного кода на языке Python 3 позволяет выполнять расширение функционала программы для ручного, полуавтоматического и полностью автоматизированного задания входных воздействий, и сбора выходных оцифрованных сигналов тестируемых блоков с целью проверки их на допустимые значения в заданных пределах. Такой анализ позволяет получить вывод о пригодности, либо непригодности тестируемого электронного блока как на этапе разработки, так и при серийном производстве. В процессе разработки стенда тестирования программного обеспечения выполнялось на ПК работающих под управлением операционных систем Windows и Linux. Возможно использование ПК на базе операционной систем MacOS, но на этапе разработки проверка работоспособности в составе таких ПК не выполнялась.

Стенд содержит в своем составе модуль аналоговых входов, именуемый в дальнейшем «модулем АЦП», модуль аналоговых выходов, именуемый в дальнейшем «модулем ЦАП» и модули проверки выходных силовых ключей тестируемых блоков управления, именуемых «модули нагрузки». Сигналы на аналоговых входах могут быть оцифрованы и загружены в персональный компьютер для анализа. Силовые аналоговые выходы формируют периодические аналоговые сигналы сложной, заранее заданной формы напряжением до 32 В при токе до 1 А, эти сигналы эмулируют сигналы реальных датчиков. Нагрузки эмулируют реальные нагрузки исполнительных элементов током до двух Ампер и необходимы для проверки силовых выходных каскадов электронного блока управления транспортного средства. Оцифрованные сигналы отклика тестируемого устройства передаются для анализа в персональный компьютер.

Структура системы является конфигурируемой и расширяемой в зависимости от задачи тестирования и типа тестируемого модуля. Количество модулей каждого типа изменяется в зависимости от задачи тестирования и типа тестируемого модуля. Такая структура важна для адаптации системы тестирования для новых и перспективных электронных блоков. Все модули объединены в сеть RS-485 / Modbus, которая через адаптер USB / RS-485 подключается к персональному





компьютеру через порт USB. В состав стенда входят тестовые программы на языке Python 3, демонстрирующих функции модулей. Программы тестирования разрабатываются отдельно в зависимости от типа структуры тестируемых электронных модулей и алгоритмов их тестирования.

Схема электрическая принципиальная, а также топология печатной платы модуля АЦП, ЦАП и цифровых портов GPIO (general-purpose input/output) для управления нагрузками верхнего и нижнего ключей разработаны в KiCAD EDA - кросс-платформенной САПР (системы автоматизированного проектирования) с открытым исходным кодом (сайт проекта [kicad.org](http://kicad.org)), и конструктивно выполнены на одной плате размером 100 x 145 мм, имеющей обозначение ID6812. Внешний вид этой платы представлен на рисунке 2, а, общая блок-схема на рис. 2, б.

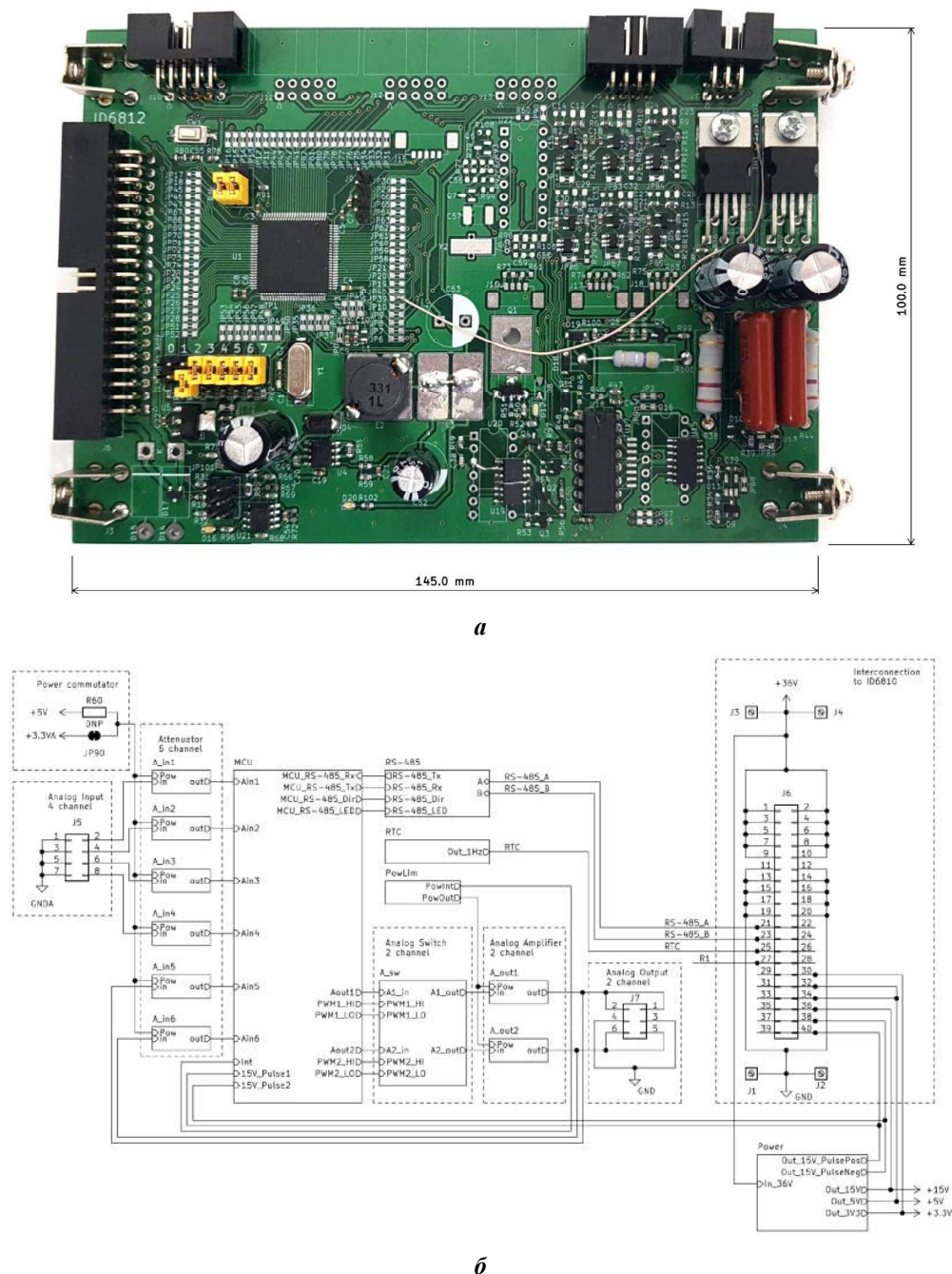


Рис. 2. Плата ID6812: а – модель внешнего вида платы, б – блок-схема платы

На момент разработки и изготовления печатных плат для проекта многие компоненты иностранного (преимущественно европейского и американского) производства оказались на ранке РФ недоступны, сроки их доставки и цены возросли или оказались неопределенными. В данных условиях для успешного выполнения проекта были проанализированы и заложены только доступные на рынке РФ электронные компоненты российского и китайского производства. Перебои с поставками компонентов диктовали требование быстрой взаимозаменяемости компонентов, поэтому топология печатной платы разработана с избытком и ориентирована на замену компонентов от разных производителей. Часть компонентов

различных производителей имеют разные посадочные места, потому на плате предусмотрены посадочные места для альтернативных компонентов при их замене на полные, либо функциональные аналоги. Такая стратегия позволила изготовить прототип без задержек в условиях неопределенности на рынке электронных компонентов РФ. Возникшие ограничения в поставках электронных компонентов привели к смене компонентов европейского и американского производства на доступные компоненты производства России, Белоруссии и Китая. Также нестабильные поставки вынужденно потребовали внесения некоторой избыточности в схемотехнику плат, изменения их топологии и конструкции с целью быстрой замены одних компонентов другими, доступными для закупок.

Основой ID6812 был выбран микроконтроллер STM32F103VET6 европейского производителя STMicroelectronics [9], который оказался недоступен на рынке РФ и был заменен аналогичным микроконтроллером GD32F103VET6 китайского производителя GigaDevice Semiconductor [10]. Программное обеспечение контроллера выполнено на языке программирования C/C++, реализует функции сетевого протокола Modbus и обеспечивает необходимые режимы работы АЦП, ЦАП, таймеров генерации ШИМ и портов общего назначения GPIO (general-purpose input/output). Обмен данными по RS-485 / Modbus RTU реализован с применением UART (universal asynchronous receiver / transmitter) микроконтроллера GD32F103VET6.

В схеме также применены некоторые компоненты российского производства (производители Интеграл [11] и Кремний Эл [12]), такие как аналоговые ключи 561КТ3 вместо CD4066, микросхема импульсного стабилизатора напряжения K1156EY5AT вместо MC33063/MC34063. Применены транзисторы отечественного производства КТ972, КТ228А9 и КТ229А9 вместо BC807 и BC817 производителя Nexperia [13].

При попытке разместить заказ для изготовления печатных плат у популярного производителя JLCPCB.com [14] (Китай) оказалось, что он перестал работать с российскими заказчиками, в результате печатные платы были заказаны и изготовлены на московском предприятии «Резонит» [15].

Плата ID6812 имеет разъемы для подключения двух каналов ЦАП, четырех каналов АЦП и 16 каналов для управления ключами коммутации нагрузки верхнего и/или нижнего ключей. Структура модулей АЦП и ЦАП представлена на рис. 3, а и б, соответственно, модулей «Нагрузки верхнего ключа» и нижнего ключа – на рис. 3, в и г.

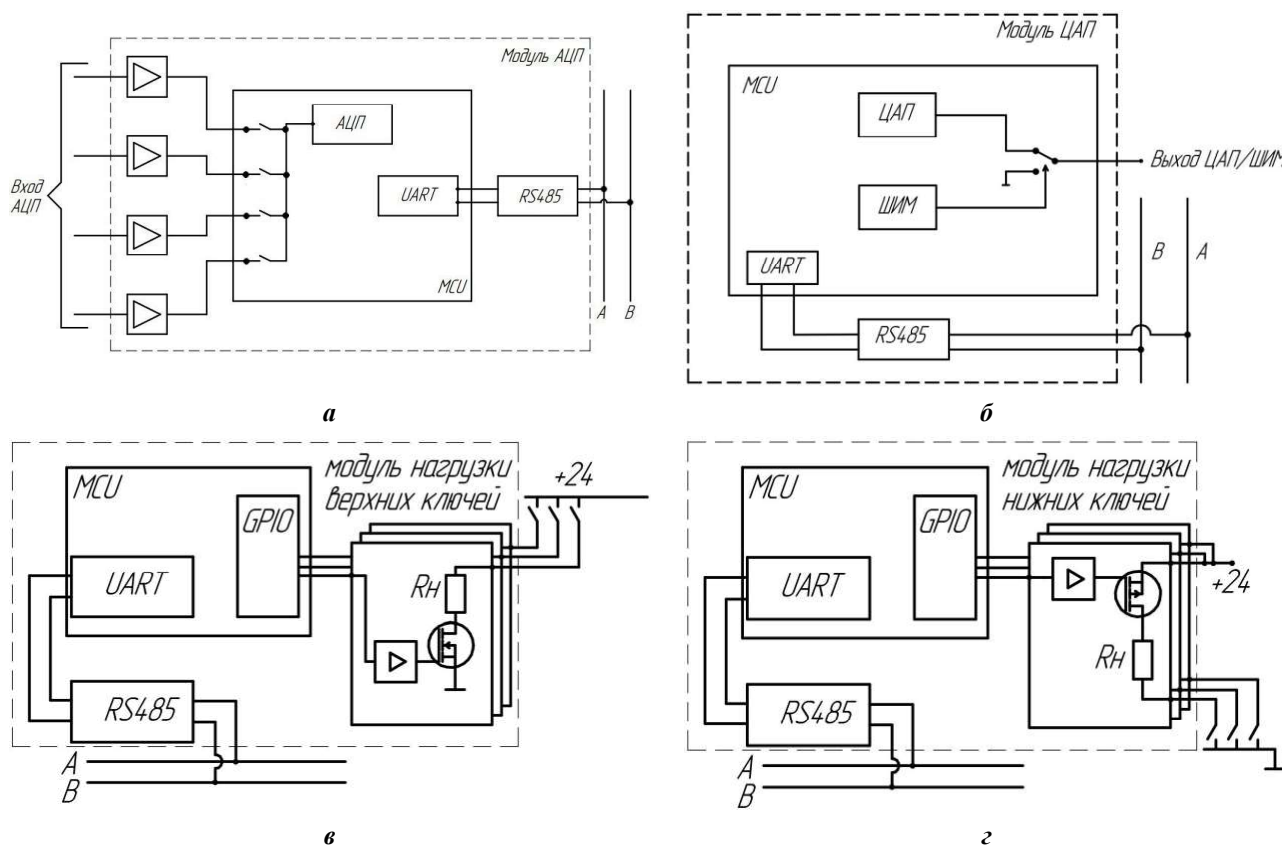


Рис. 3. Блок-схемы модулей системы тестирования: а – модуль «АЦП», б – модуль «ЦАП», в – модуль «Нагрузки верхнего ключа», г – модуль «Нагрузки нижнего ключа»





Модули АЦП и ЦАП размещаются на плате ID6812. Каждый модуль АЦП имеет шесть аналоговых входов (четыре для оцифровки сигналов от тестируемого модуля и два для мониторинга состояния двух каналов ЦАП). Общее количество аналоговых входов до 60 расширяется путем наращивания таких же модулей АЦП.

Каждый модуль ЦАП имеет два аналоговых выхода. Модуль может обеспечить выходной сигнал от ЦАП (переменное напряжение заданной формы до 10 кГц) или ШИМ (Широтно-импульсная модуляция) напряжением, амплитуда которого задается через ЦАП. Огибающая (форма выходного сигнала) переменного напряжения на выходе модуля формируется путем вывода данных через ЦАП с частотой до 10 кГц из буфера, размер которого задается пользователем до 1000 отсчетов, сами отчеты также задаются пользователем и загружаются в модуль перед началом тестирования по сети RS-485 / Modbus через адаптер USB / RS-485.

Модули «Нагрузки верхнего ключа» и «Нагрузки нижнего ключа» размещаются на плате ID6813. Плата ID6813 содержит четыре ключа для нагрузок верхнего ключа и четыре для нагрузок нижнего ключа, после разделения платы имеют обозначенные ID6813L и ID6813H соответственно. Каждый модуль нагрузки верхнего или нижнего ключа имеет 30 выходов для подключения нагрузочных резисторов. Нагрузочные резисторы размещаются на радиаторе в корпусе с принудительной вентиляцией. Подключение и отключение нагрузок выполняется программно через сеть RS-485 / Modbus и адаптер USB / RS-485.

Внешний вид системы тестирования представлен на рис. 4, на котором отмечены модуль «АЦП/ЦАП» и модуль «Нагрузки верхнего ключа» и модуль «Нагрузки нижнего ключа».

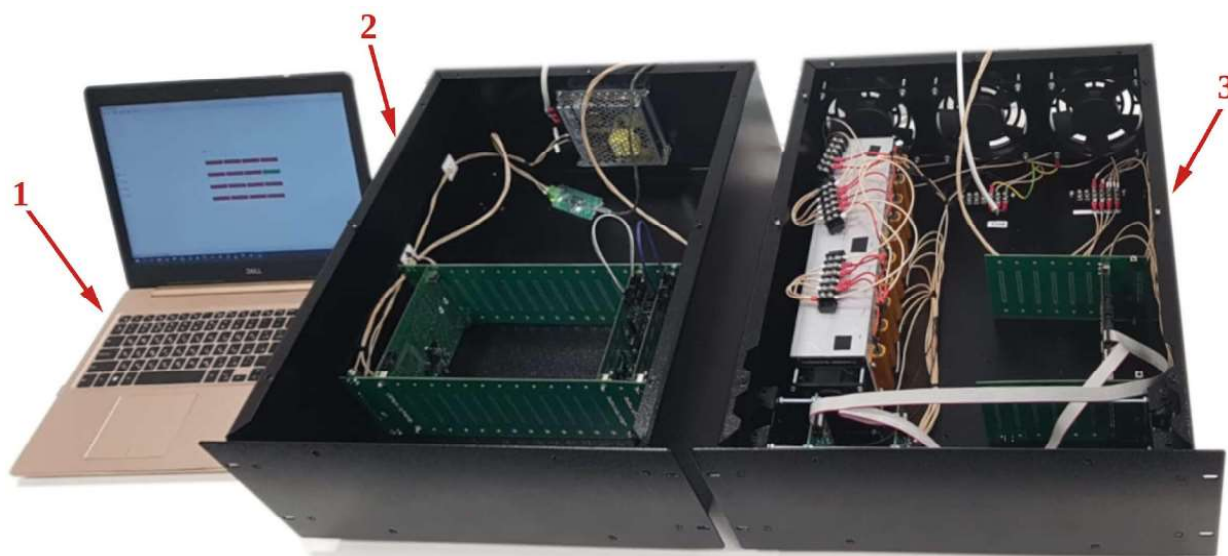


Рис. 4. Внешний вид системы тестирования: 1 – персональный компьютер, 2 – модуль «АЦП/ЦАП», 3 – модуль «Нагрузки верхнего ключа» и модуль «Нагрузки нижнего ключа»

На разработанном стенде были протестированы блоки управления комбайна БУ-1201, применяемые в сельскохозяйственной технике российского производства. Практическое использование стенда продемонстрировало выполнение заявленных функций в полном объеме. На рис. 5 представлен внешний вид одного из окон графического интерфейса, на котором можно видеть управляющие элементы интерфейса и данные результатов тестирования в виде графиков.

Кроме тестирования модулей систем управления, для которых стенд и разрабатывался, проводилось тестирование таких электронных блоков производства КНР, как модули реле, модули питания и выпрямительные блоки. По результатам тестирования были быстро выявлены и удалены некачественные, либо поврежденные при доставке из КНР в Россию модули, что в значительной степени позволяет повысить качество выпускаемой продукции и снизить время на пусконаладочные работы. Такое применение стенда оказалось еще одним перспективным направлением использования системы тестирования, так как поставляемые компоненты могут

быть недостаточно хорошо упакованы или протестированы при производстве. Использование стенда для тестирования электронных блоков демонстрирует его универсальность и востребованность в современных условиях.

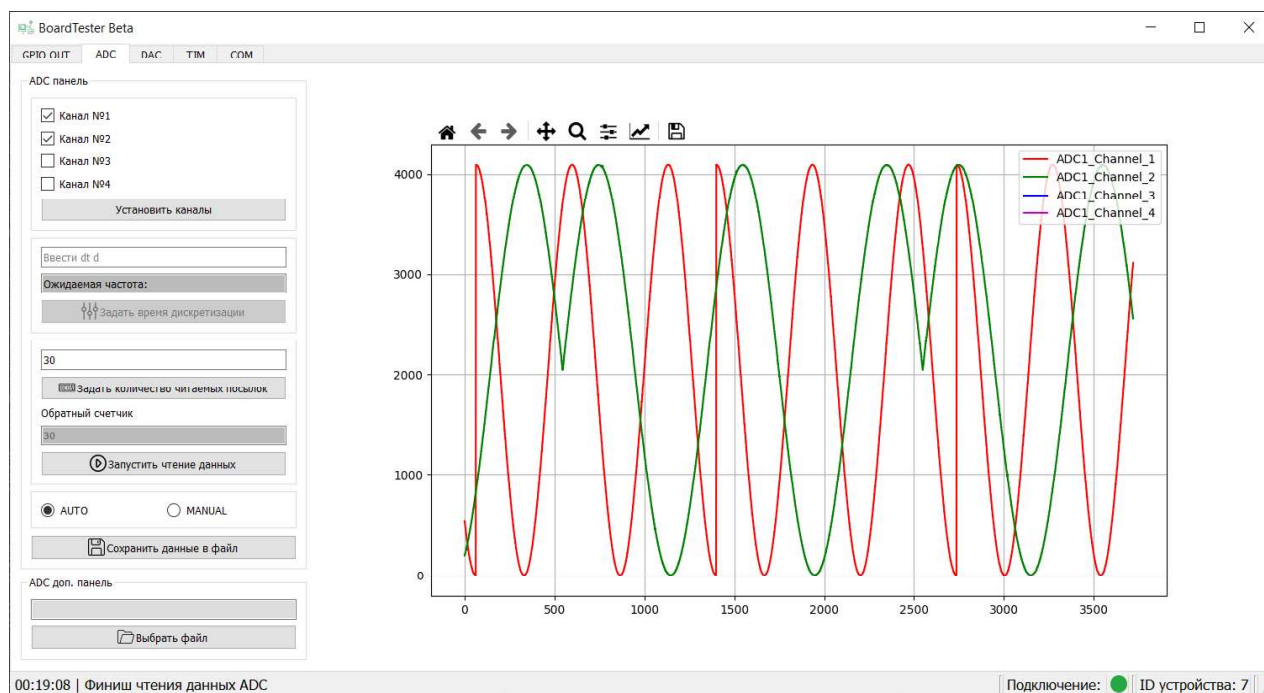


Рис. 5. Внешний вид графического интерфейса программы

Таким образом, стенд может выполнять проверку работоспособности электронных устройств как в ручном, так и в автоматизированном режиме по заранее разработанным протоколам тестирования с генерацией отчета о выполненном тестировании. В системе изначально заложена возможность изменения структуры и масштабирования в зависимости от типа тестируемого модуля или блока. Система тестирования позволяет выполнить проверку каждого модуля или устройства с любым уровнем сложности проверки, от простой экспресс-диагностики до глубокой, возможно длительной по времени, проверки каждого составляющего компонента с возможностью записи сигналов тестирования и сигналов отклика для дальнейшего анализа. Дополнительно к существующим электрическим методам тестирования могут добавляться и иные, например, климатические и вибрационные.

Применительно к тестированию бортовых систем управления автомобильной и сельскохозяйственной техники [16–20], работа стенда основана на генерации заранее запрограммированных тестовых сигналов воздействия для штатных и аварийных режимов работы, имитирующих реальные сигналы от датчиков в составе транспортного средства и анализа вырабатываемых тестируемой системой сигналов в ответ на эти тестовые воздействия. Анализ выходных сигналов бортовой системы управления, как отклик на заранее заданные тестовые воздействия позволяет протестировать электронное устройство во многочисленных режимах работы и убедиться в правильности выполнения заложенных алгоритмов управления. Анализ полученных сигналов от тестируемой бортовой системы управления в совокупности с имитационными сигналами, генерируемыми стендом, позволяет реализовать анализ реакции системы управления, диагностировать недоработки, поломки и сбои в работе устройства, как в штатных, так и аварийных условиях работы устройства. Стенд также позволяет имитировать аварийные условия работы сельскохозяйственной техники и проверить работу устройства управления в предельных и аварийных режимах.

Стенд ориентирован на использование как разработчиками, так и в составе производственной линии. Для ускорения тестирования в случае работы в составе производственной линии процесс максимально автоматизирован, в результате работы тестовых скриптов формируется файл отчета и результирующий вывод о прохождении теста. Файл отчета представляет собой текстовый файл,





в котором указываются номера тестов и их статус. В случае если какой-либо тест не пройден, весь тест останавливается и генерируемый файл отчета передается инженерам для дальнейшего анализа и устранения проблемы.

Применение таких автоматизированных систем тестирования позволяет не только сэкономить время, но также повысить надежность производимой продукции, что в конечном итоге позволяет снижать общую себестоимость включая стоимость на его наладку и дальнейшее обслуживание.

**Заключение.** Разработана, изготовлена и испытана система тестирования электронных блоков управления сельскохозяйственной техники, показана его конструкция и описано функциональное назначение. Предлагаемый стенд выполняет тестирование бортовых систем управления автомобильной и сельскохозяйственной техники как в ручном, так и автоматизированном режиме, позволяет выполнять задачи тестирования как на этапе разработки, так и серийного производства. В системе заложена возможность изменения его структуры и масштабирования путем изменения количества и типов составляющих его блоков в зависимости от типа тестируемого модуля или системы. В ходе работы изготовленного опытного прототипа, выполнено экспериментальное тестирование электронных блоков. Практическое использование стенда показало его универсальность и multifunctionality.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thomasson J.A. et al. Autonomous technologies in agricultural equipment: a review of the state of the art. American Society of Agricultural and Biological Engineers St. Joseph, MI, USA, 2019.
2. Kim J., Kim S., Ju C., Son H.I. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications // Ieee Access. IEEE, 2019. Vol. 7. P. 105100–105115.
3. Guo D., Zhong M., Ji H., Liu Y., Yang R. A hybrid feature model and deep learning based fault diagnosis for unmanned aerial vehicle sensors // Neurocomputing. Elsevier, 2018. Vol. 319. P. 155–163.
4. Гришин М.В., Кулько А.П. Алгоритм для диагностирования автомобильных двигателей // Научный журнал NovaInfo. NovaInfo, 2017. Vol. 67. P. 56–60.
5. Gupta N. et al. Economic IoT strategy: the future technology for health monitoring and diagnostic of agriculture vehicles // J Intell Manuf. Springer Nature BV. 2021. Vol. 32. No. 4. P. 1117–1128.
6. Пастухов А.Г. Совершенствование методов испытаний агрегатов трансмиссий сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2008. № 1.
7. Галимова Е.Ю. Система поддержки принятия решений при выборе способа тестирования программных систем. Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2022.
8. Engineer Ambitiously – NI. URL: <https://www.ni.com/ru-ru.html> (accessed: 07.07.2023).
9. STM32F103VE - Mainstream Performance line, Arm Cortex-M3 MCU with 512 Kbytes of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN – STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103ve.html> (accessed: 25.05.2023).
10. GD32F103VET6-Arm Cortex-M3-GigaDevice Semiconductor Inc.. URL: <https://www.gigadevice.com/product/mcu/arm-cortex-m3/gd32f103vet6> (accessed: 25.05.2023).
11. Интегралю Высокие технологии для лучшей жизни. URL: <https://integral.by/> (accessed: 25.05.2023).
12. АО “ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ” - Главная. URL: <https://group-kremny.ru/> (accessed: 25.05.2023).
13. Nexperia: Essential Semiconductors. URL: <https://www.nexperia.com/> (accessed: 25.05.2023).
14. PCB Prototype & PCB Fabrication Manufacturer – JLCPCB. URL: <https://jlcpcb.com/> (accessed: 25.05.2023).
15. Печатные платы – РЕЗОНИТ – Производство и монтаж печатных плат. URL: <https://rezonit.ru/> (accessed: 25.05.2023).
16. Гольяпин В.Я., Мишуров Н.П., Федоренко В.Ф., Голубев И.Г., Балабанов В.И., Петухов Д.А. Цифровые технологии для обследования состояния земель сельскохозяйственного назначения беспилотными летательными аппаратами. Аналитический обзор. М., 2020.
17. Гольяпин В.Я., Мишуров Н.П., Федоренко В.Ф., Соловьев С.А., Балабанов В.И., Алдошин Н.В. Инновационные технологии и сельскохозяйственная техника за рубежом. Аналитический обзор. М., 2020.
18. Балабанов В.И., Ищенко С.А., Романенкова М.С. Перспективы внедрения элементов технологий «Интернета вещей» в растениеводстве // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2019. № 4 (92). С. 13–18.
19. Зволинский В.Н., Мосяков М.А., Семичев С.В. Обеспеченность технологий обработки почвы интеллектуальными средствами и методами контроля // Аграрный вестник Верхневолжья. 2020. № 1 (30). С. 103–113.

## REFERENCES

1. Thomasson J.A., Baillie C.P., Antille D.L., Lobsey C.R., McCarthy C.L. Autonomous technologies in agricultural equipment: a review of the state of the art. MI, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers St. Joseph, 2019.
2. Kim J., Kim S., Ju C., Son H.I. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE Access*. 2019; 7:105100–105115. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932119>.
3. Guo D., Zhong M., Ji H., Liu Y., Yang R. A hybrid feature model and deep learning based fault diagnosis for unmanned aerial vehicle sensors. *Neurocomputing, Elsevier*. 2018; 319:155–163. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.08.046>.
4. Grishin M.V., Kulko A.P. A Algorithm for diagnosing automobile engines. *Scientific journal NovaInfo. NovaInfo*. 2017;67: 56–60.
5. Gupta N., Gupta S., Khosravy M., Dey N., Joshi N., Crespo R.G., Patel N. Economic IoT strategy: the future technology for health monitoring and diagnostic of agriculture vehicles. *Journal of Intelligent Manufacturing. Springer Nature*. 2021; 4(32): 1117–1128. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01610-0>.
6. Pastukhov A.G. Improving testing methods for transmission units of agricultural machinery. *Agroengineering*. 2008;1: 111–113.
7. Galimova E.Yu. Decision support system when choosing a method for testing software systems. Astrakhan: Astrakhan State Technical University, 2022.
8. Engineer Ambitiously - NI. URL: <https://www.ni.com/ru-ru.html> (accessed: 07.07.2023).
9. STM32F103VE - Mainstream Performance line, Arm Cortex-M3 MCU with 512 Kbytes of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN – STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103ve.html> (accessed: 25.05.2023).
10. GD32F103VET6-Arm Cortex-M3-GigaDevice Semiconductor Inc. URL: <https://www.gigadevice.com/product/mcu/arm-cortex-m3/gd32f103vet6> (accessed: 25.05.2023).
11. Integral | High technology for a better life [Electronic resource]. URL: <https://integral.by/> (accessed: 25.05.2023).
12. JSC “GRUPPA KREMNIY EL”. URL: <https://group-kremny.ru/> (accessed: 25.05.2023).
13. Nexperia: Essential Semiconductors. URL: <https://www.nexperia.com/> (accessed: 25.05.2023).
14. PCB Prototype & PCB Fabrication Manufacturer - JLCPCB. URL: <https://jlcpcb.com/> (accessed: 25.05.2023).
15. Printed circuit boards – REZONIT – Manufacture and installation of printed circuit boards. URL: <https://rezonit.ru/> (accessed: 25.05.2023).
16. Goltypin V.Ya., Mishurov N.P., Fedorenko V.F., Golubev I.G., Balabanov V.I., Petukhov D.A. Digital technologies for surveying the condition of agricultural lands using unmanned aerial vehicles. Analytical review. Moscow, 2020.
17. Goltypin V.Ya., Mishurov N.P., Fedorenko V.F., Solovov S.A., Balabanov V.I., Aldoshin N.V. Innovative technologies and agricultural machinery abroad. Analytical review. Moscow, 2020.
18. Balabanov V.I., Ishchenko S.A., Romanenkova M.S. Prospects for introducing elements of Internet of Things technologies in crop production. *Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin”*. 2019;4 (92): 13–18.
19. Zvolinsky V.N., Mosyakov M.A., Semichev S.V. Provision of soil treatment technologies with intellectual means and control methods. *Agrarian Bulletin of the Verkhnevolzhye*. 2020;1 (30): 103–113.
20. Khalansky V.M., Balabanov V.I., Oknin B.S., Wolf A.N., Smirnov V.P., Mekhedov M.A., Berezovsky E.V., Buksman V.E. Mechanization of crop production. Moscow, 2014.

Статья поступила в редакцию 10.06.2023; одобрена после рецензирования 20.07.2023; принята к публикации 30.07.2023.  
The article was submitted 10.06.2023; approved after reviewing 20.07.2023; accepted for publication 30.07.2023.

