

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БОРТОВЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ: РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM FOR ON-BOARD ELECTRONIC DEVICES: DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE INNOVATIVE TECHNOLOGY

С. Н. Поддубко,

Генеральный директор ГНУ «Объединенный институт машиностроения» НАН, канд. техн. наук, г. Минск, Республика Беларусь

А. В. Белевич,

начальник научно-технического центра ГНУ «Объединенный институт машиностроения» НАН, г. Минск, Республика Беларусь

В. И. Луцкий,

заведующий лабораторией ГНУ «Объединенный институт машиностроения» НАН, г. Минск, Республика Беларусь

С. И. Шестопалов,

научный сотрудник ГНУ «Объединенный институт машиностроения» НАН, г. Минск, Республика Беларусь

М. М. Татур,

профессор УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», д-р техн. наук, профессор, г. Минск, Республика Беларусь

А. Г. Савчиц,

Главный конструктор — Начальник управления главного конструктора автоматизированных систем, телематики и мехатроники ОАО «МАЗ» — управляющей компании холдинга «БЕЛЛАВТОМАЗ», г. Минск, Республика Беларусь

S. Poddubko,

General Director of the State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Belarus”, Candidate of Engineering Sciences, Minsk, Republic of Belarus

A. Belevich,

Chief of the R&D Center “Electromechanical and Hybrid Power Units of Mobile Machines” in the State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Republic of Belarus

V. Lutsky,

Head of the Laboratory of the State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Republic of Belarus

S. Shestopalov,

Research Officer of the State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Republic of Belarus

M. Tatur,

Professor of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Doctor of Technical Sciences, Professor, Minsk, Republic of Belarus

A. Savchits,

Chief Designer — Head of the Chief Designer Department Automated Systems, Telematics and Mechatronics of the JSC “MAZ” — the Managing Company of the Holding “BELAVTOMAZ”, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 20.12.2022.

В статье представлен мировой опыт в области применения распределенных систем управления бортовыми электронными устройствами и достижения белорусских организаций в разработке аналогичной технологии на основе оригинальных электронных микромодулей. Технология представлена в четырех уровнях: микропроцессора, встроенной системы, мехатронного узла и распределенной системы управления в целом на борту автотракторного средства. Отмечены потенциальные возможности технологии, придающие машине новые качества. Названы проблемы, которые, по мнению авторов, препятствуют активному внедрению данной технологии в машиностроительную отрасль Республики Беларусь.

The article presents the world experience in the field of application of distributed control systems for on-board electronic devices and the achievements of Belarusian organizations in the development of a similar technology based on original electronic micromodules. The technology is presented at four levels: a microprocessor, an embedded system, a mechatronic unit and a distributed control system as a whole on board an automotive vehicle. The potential possibilities of the technology that give the machine new qualities are noted. The problems that, according to the authors, hinder the active implementation of this technology in the machine-building industry of the Republic of Belarus are named.

Ключевые слова: распределенная система управления, бортовое электронное устройство, микропроцессор, микромодуль, мехатронный узел, интеллектуальная периферия.

Key words: distributed control system, on-board electronic device, microprocessor, micromodule, mechatronic unit, intelligent peripherals.

Ведение. Современный автомобиль представляет собой сложную систему, в которой тесно переплетены функции механических агрегатов, мехатронных и компьютерных (программно-аппаратных) устройств, и с каждым годом доля и сложность бортовой автоэлектроники увеличивается. На смену непосредственным проводным соединениям, подключающим датчики и исполнительные устройства к органам управления, в том числе к встроенным бортовым компьютерам, пришли компьютерные средства телекоммуникаций, которые позволяют по одной шине управлять большим числом кнопок, джойстиков, световых приборов, электродвигателей и других оконечных устройств, число которых на борту может составлять десятки и сотни. Очевидно, что такие технологии позволяют значительно сокращать электрическую проводку, а в целом — повышают технологичность и надежность техники, выводя ее на качественно новый уровень. Уже сейчас название специальности «Автоэлектрик» не в полной мере соответствует требуемому уровню квалификации для технического обслуживания бортовой электроники, так как, помимо проверки целостности электрических цепей и работоспособности электрических приборов, данный специалист должен владеть знаниями в области микропроцессорной техники и инфокоммуникационных технологий.

Чтобы каждое электрическое устройство могло выдавать либо принимать данные (или команды) по сетевому каналу связи, оно должно иметь специальный микроконтроллер сопряжения, который будет наделяться адресом и работать по программе обмена данными по сети со строго определенным протоколом. Функции взаимодействия с периферийными устройствами также строго распределены по терминальным (периферийным) микроконтроллерам. В теории существует много разновидностей архитектур построения распределенных систем управления [1], но в контексте нашей работы достаточно привести простейший, одноуровневый, вариант (рис. 1).

На рис. 1 бортовой процессор — это вычислитель, может быть, микроконтроллер или микро-ЭВМ, который обладает необходимыми вычислительными ресурсами и локальным сетевым каналом связи. ТМ — сетевой терминальный (периферийный) микроконтроллер, осуществляющий непосредственное взаимодействие с периферийными устройствами (датчиками и исполнительными механизмами). Особенность такой архитектуры системы управления состоит в том, что бортовой процессор не имеет непосредственных электрических связей с периферией, а связь осуществляется посредством сетевого канала. Очевидно, что терминальный микроконтроллер, помимо телекоммуникационных функций, может выполнять часть задач обработки информации; тем самым общая задача управления будет распределена по всем микропроцессорам.

В мировом автотракторостроении существуют отраслевые стандарты, в том числе на средства и форматы приема — передачи данных на борту. В данном случае речь идет о CAN-шине, которая применяется ведущими компаниями. Однако стандартизация средств бортовой телекоммуникации не решает проблему внедрения новых инфокоммуникационных технологий в отечественный автотранспорт. Существующая практика внедрения, как правило, представлена в виде завершенных импортных агрегатов с сопутствующими электронными компонентами и закрытым программным обеспечением. Здесь можно называть большой перечень компаний-поставщиков, наиболее известными из которых являются Bosch, Siemens, Wabco и др. Есть пример и белорусской компании: «НГК Силовые Компоненты» — разработчик бортовых автоматизированных распределенных систем управления автотехники, электротранспорта и промышленного оборудования [2]. Естественно, при внедрении импортных комплектующих агрегатов вопросы концептуального, архитектурного проектирования бортовой электроники отечественных машин остаются открытыми, а сопровождение и развитие таких технических решений попросту невозможно. Чтобы представить степень сложности проблемы, достаточно проследить многоуровневую технологическую цепочку от разработки и изготовления компонентов современной автоэлектроники до внедрения (рис. 2).

Первый уровень относится к отрасли микроэлектроники. Однако уже на этом этапе проектирования предстоит предусмотреть все (или основные) варианты развития, чтобы сделать обоснованный выбор определенного типа микропроцессора (со всей его инфраструктурой, библиотеками, средой разработки) в качестве элементной базы, на котором будет строиться вся система бортовой мехатроники и телекоммуникации.

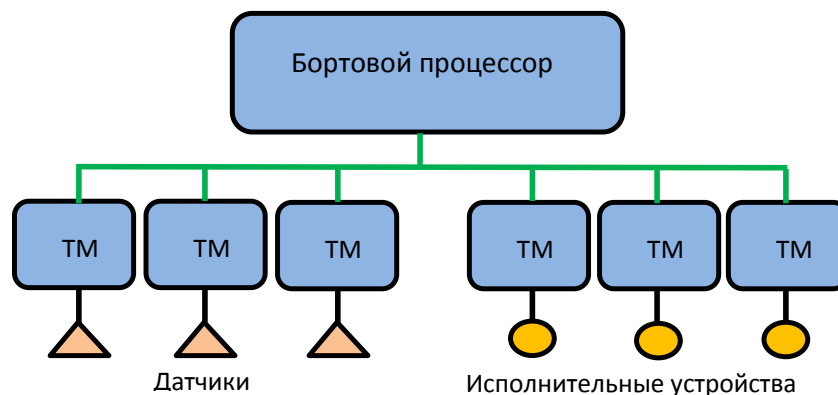


Рис. 1. Упрощенная структурная схема распределенной системы управления периферийными устройствами

Источник: разработка авторов.

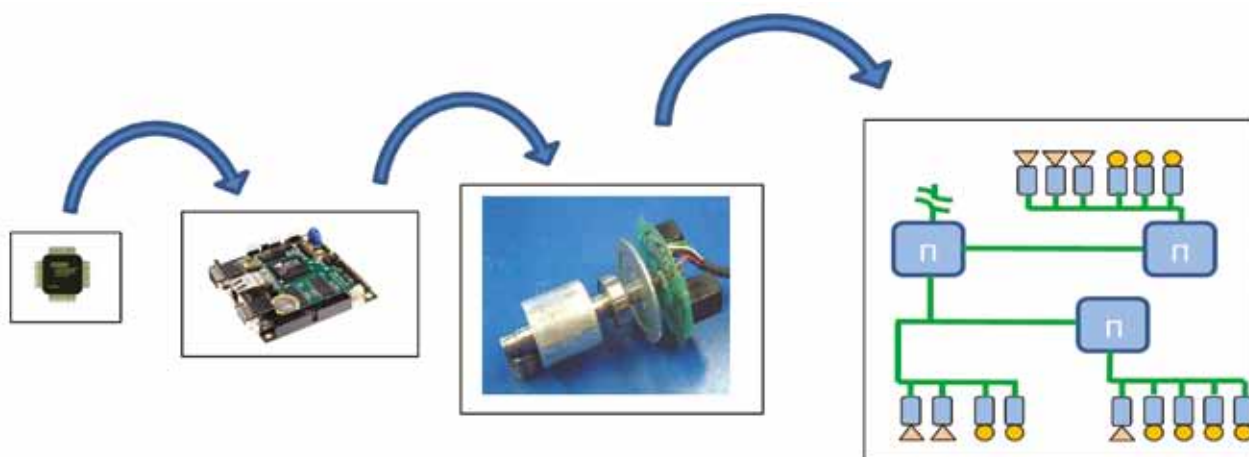


Рис. 2. Четыре уровня технологической цепочки внедрения распределенной системы управления бортовой электроникой:
 1-й уровень — «Микропроцессор»; 2-й уровень — «Встроенная система» (Embedded System);
 3-й уровень — «Завершенный мехатронный узел»; 4-й уровень — «Общая система управления машиной»

Источник: разработка авторов.

На втором уровне проектирования для выбранного типа микропроцессора необходимо разработать схемотехнику, так называемую «обвязку» в виде дополнительных ключей, элементов питания, интерфейсов и т. п., плату, на которой все будет смонтировано, а также конструктивные детали (корпус, разъемы и крепления). Как показывает опыт, несмотря на унификацию микроконтроллеров и телекоммуникационной шины, встроенная система уникальна для каждого вида периферийного устройства.

На третьем уровне периферийное устройство соединяется с встроенной системой управления и является завершенным комплектующим изделием для завода — производителя автотракторной техники. Каждый вид такого изделия (датчика, рычага, педали, кнопки, клапана, сервомотора, светодиода и т. д.) имеет свое назначение, уникальные технические параметры и способы получения информации либо способы управления. Это означает, что для каждого узла должна быть разработана своя прикладная программа снятия информации и конвертации в стандартизированный формат CAN-шины либо конвертации команд, приходящих по шине в сигналы непосредственного управления.

Четвертый уровень знаменует финальное внедрение комплектующих в бортовую систему управления машины. Для этого мехатронный узел должен иметь возможность быть механически, электрически и информационно интегрированным в общую систему управления в соответствии с принятыми стандартами, концепцией и архитектурой.

Даже из поверхностного анализа становится понятным, что разработка (и производство) на каждом из указанных уровней тесно взаимосвязаны, но осуществляются различными компаниями и даже в различных промышленных отраслях. В настоящий момент данная технология не позволяет сторонним игрокам рынка автоэлектроники самостоятельно входить в данную цепочку либо использовать чьи-либо наработки без предоставления лицензий и открытия протоколов и ключей. Остается лишь возможность приобретать завершенные (продуктовые) решения и использовать их как «черные ящики», например импортные системы ABS, EPS, ADAS, Common Rail и т. п.

Таким образом, тотальная компьютеризация машин кардинально отличает весь процесс жизненного цикла современной автоэлектроники, включая разработку, снабжение комплектующими, изготовление и техническое обслуживание автотракторной техники. Попросту говоря, по сравнению с традиционной (устаревающей), в новой технологии невозможно закупать произвольные световые приборы, клапаны, концевые выключатели, сервомоторы и другие комплектующие у «случайных» производителей и применять их по своему усмотрению в разрабатываемой электрической схеме автомобиля, потому как все это будет несовместимо.

Опыт отечественных разработок в области распределенных систем управления бортовой электроникой. Последние два десятилетия отечественная наука и промышленность в целом если не определяли технологические тренды, то по крайней мере пытались не отставать в данной IT-области. Причем исследования и разработки велись как в направлениях расширения сфер применения распределенных микропроцессорных систем, так и в направлении глубокой миниатюризации. Основной вклад на данном этапе внесли организации ОАО «Интеграл» и ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси». В ходе выполнения работ по ряду заданий государственных научно-технических программ последовательно разрабатывалась концепция и техническая база единой программно-аппаратной платформы для создания бортовых распределенных систем управления мехатронными периферийными устройствами.

Еще в 2009 г. ОАО «Интеграл» совместно с РУП «НПП Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» разработали систему распределенного управления микроклиматом для животноводческих помещений. Были изготовлены, смонтированы и введены в эксплуатацию 4 единицы изделий на фермах агрокомбината «Восход» (рис. 3, а). Была изготовлена и введена в эксплуатацию аналогичная система управления микроклиматом на птицефабрике «Новая Заря» (рис. 3, б). Была разработана система распределенного управления освещением птицеводческих помещений с возможностью индивидуального управления каждой лампой (рис. 3, в).

На тот момент это были первые и единственные отечественные системы с инновационной распределенной архитектурой в сфере автоматизации технологических процессов в сельском хозяйстве.

Далее, в 2013–2015 гг., распределенная архитектура системы управления мехатроникой была апробирована в ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» на опытных образцах мобильного робототехнического комплекса на базе мини-трактора «Беларус» в рамках проекта НИОКР 270-1-17 Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь и показала очевидные преимущества (рис. 4) [3, 4].

Данные образцы стали первым в нашей стране опытом роботизации серийной автотракторной техники, прошли опытную эксплуатацию в Республиканском отряде специального назначения МЧС и получили заключение специалистов о направлениях дальнейшего совершенствования.



Рис. 3. Рекламные буклеты распределенных систем управления: а — микроклиматом животноводческого помещения; б — микроклиматом птицеводческого помещения; в — освещением птицефабрики



Рис. 4. Опытные образцы мобильных робототехнических комплексов на базе мини-трактора «Беларус» с распределенной системой управления бортовой мехатроникой

Электронные блоки, непосредственно взаимодействующие с датчиками и исполнительными устройствами («встроенные системы», согласно рис. 2), имели корпусное исполнение, что естественно подталкивало инженерную мысль в направлении дальнейшей миниатюризации.

В 2016–2020 гг. ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» совместно с ОАО «Интеграл» выполнил задания 1.5 и 3.3 программы Союзного государства «Разработка нового поколения электронных компонентов для систем управления и безопасности автотранспортных средств специального и двойного назначения», шифр «Автоэлектроника»:

- Задание 1.5 ОКР «Разработка функционально полного набора интеллектуальных, высокоинтегрированных электронных модулей и программных средств, поддерживающих создание распределенных систем управления с интеллектуальной периферией автоматическими коробками передач мобильных машин»;
- Задание 3.3 ОКР «Разработка высокоинтегрированных адаптеров сервисных исполнительных устройств мобильных машин, обеспечивающих их работу в составе бортовых распределенных информационно-управляющих систем».

В ходе выполняемых работ ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» предложил концепцию и архитектуру распределенной системы управления, выполнил разработку схемотехники семейства микромодулей и прикладных библиотек для разработки прикладного программного обеспечения. ОАО «Интеграл» обеспечило приобретение полупроводниковых пластин с интегрально реализованными микроконтроллерами STM, разрезание кристаллов, разварку кристаллов и формирование гибридных микросборок с необходимой электронной «обвязкой», что обеспечило минимально возможный при данной технологии размер микромодулей. Внешний вид модулей показан на рис. 5. По сути, микромодуль стал выполнять роль встроенной системы, то есть второго уровня согласно схеме технологической цепочки на рис. 2.

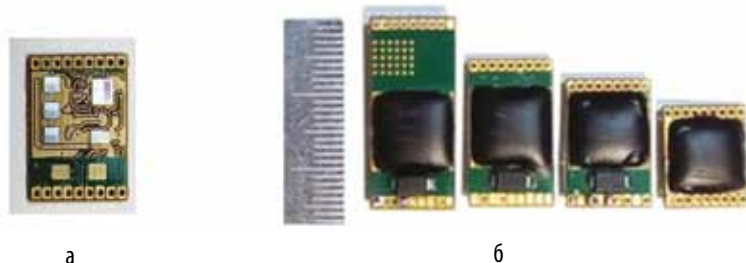


Рис. 5. Внешний вид микромодулей: а — размещение кристаллов в микромодуле; б — функционально полный набор микромодулей

Источник: разработка авторов.

В результате исполнения программы были заложены основы уникальной отечественной технологии с высокой степенью локализации (с минимально возможной импортной комплектацией) и отвечающей мировым тенденциям развития бортовой электроники. Суть технологии заключается в производстве микромодулей на базе микропроцессорного ядра STM8, предназначенных для встраивания в периферийные

бортовые устройства, и построение на их основе полноценных распределенных систем управления с интеллектуальной периферией. Термин «интеллектуальная периферия» в данном случае означал, что габариты позволили легко встраивать микромодули в корпуса уже выпускающихся изделий (датчиков, исполнительных устройств) либо монтировать микромодули в разъем или кабель. Терминальный микропроцессор позволял распределить и параллельно реализовать функции аналого-цифрового преобразования, фильтрации сигнала, регулятора, диагностики и др. непосредственно на периферийном устройстве [5]. Все модули поддерживали сетевой канал связи по CAN-шине.

Первая апробация разработки интеллектуальной периферии на базе микромодулей проходила в ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» на экспериментальном электромобиле «Мишка», в котором была комплексно реализована оригинальная концепция распределенного управления электрооборудованием. В ходе работ периферийные устройства — джойстик, фары, фонари, педаль, подрулевой переключатель и другие мехатронные устройства — были оснащены встроенными терминальными микромодулями с обеспечением обмена по каналу CAN. Для каждого устройства было разработано прикладное программное обеспечение, позволяющее работать в общей системе распределенного управления (рис. 6).

На момент завершения программы «Автоэлектроника» на базе таких модулей для бортовой системы автомобиля МАЗ были разработаны и изготовлены следующие образцы устройств: интеллектуальное устройство управления и диагностического контроля вентилятора отопителя; интеллектуальное устройство управления и диагностического контроля электропневматического клапана для технологических узлов машины; интеллектуальный датчик скорости движения автомобиля с реализацией функционала спидометра; интеллектуальный датчик разрежения воздуха в коллекторе ДВС; интеллектуальный датчик температуры; шлюз для FMS-связи; интеллектуальный джойстик для управления зеркалами заднего вида; интеллектуальное устройство управления стеклоподъемником; интеллектуальное устройство управления замком двери (рис. 7). Разработка этих устройств осуществлена путем модернизации существующих «нецифровых» устройств, которые серийно выпускаются в Республике Беларусь.

Полученный практический опыт позволяет утверждать, что использование полученных микромодулей при проектировании распределенных систем управления с интеллектуальной периферией в несколько раз ускоряет процесс разработки и применим для широкой линейки датчиков и исполнительных механизмов, применяемых на борту автомобиля.

Одним из последних результатов апробации технологии стал проект по роботизации трактора «Беларус 3521». Разработанная «с нуля» подсистема управления движением (СУД) на схеме (рис. 8, а)

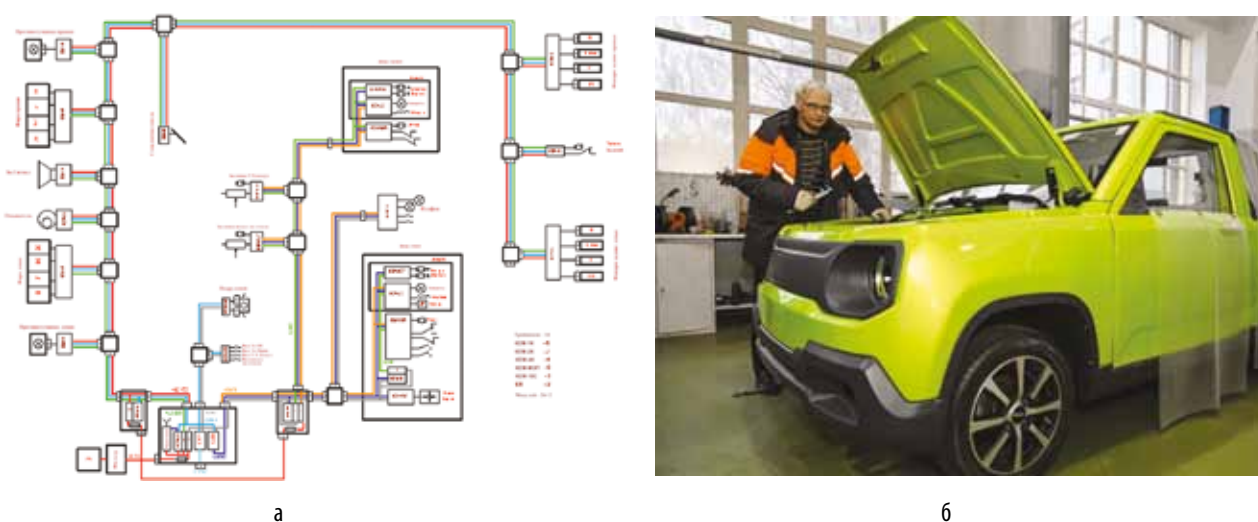


Рис. 6. Экспериментальная апробация микромодулей в электромобиле «Мишка»: а — структурная схема распределенной системы управления электрооборудованием; б — внешний вид экспериментального электромобиля

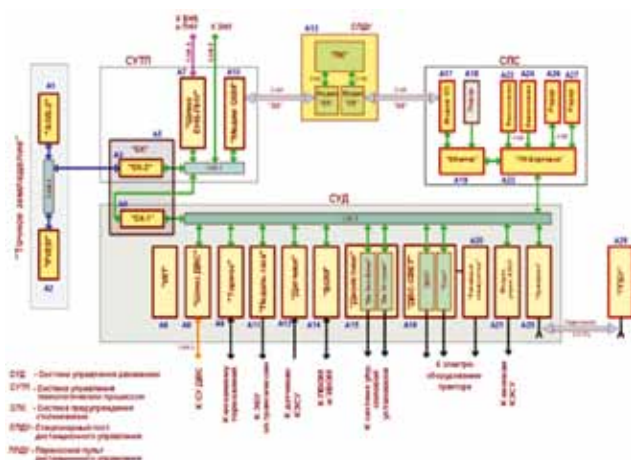


Рис. 7. Опытные образцы интеллектуальных устройств для существующей распределенной бортовой системы автомобиля МАЗ, разработанных с использованием микромодулей и серийно выпускаемых в Республике Беларусь датчиков и механизмов

содержит 12 электронных модулей, которые обеспечили автоматизацию периферийных узлов трактора, необходимых для решения данной задачи. Трудоемкость разработки, программирования и изготовления образца СУД составил 4 специалиста в течении 3 месяцев.

Экспериментальный образец беспилотного трактора продемонстрирован в мае 2021 г. в день 75-летия Минского тракторного завода (рис. 8, б).

Таким образом, можно констатировать, что в нашей стране созданы и апробированы основы технологии, включающие высокоинтегрированную элементную базу и специальное программное обеспечение, объединенные общей концепцией построения распределенных систем управления бортовыми мехатронными устройствами. Продукция, создаваемая по данной технологии, востребована как отечественной промышленностью, так и в ближнем зарубежье. Прямых аналогов на постсоветском пространстве пока нет.



а



б

Рис. 8. Экспериментальная апробация микромодулей в разработке распределенной бортовой системы беспилотного трактора: а — структурная схема распределенной системы управления; б — внешний вид роботизированного трактора «Беларус 3521i»

О проблемах внедрения инновационной технологии. Как указывалось выше, в роли производителя микромодулей сетевых компонентов выступил ОАО «Интеграл», а в роли разработчика научной концепции распределенной микропроцессорной архитектуры и вариантов применения в конкретных (экспериментальных) изделиях — ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси». В роли потенциальных потребителей электронных компонентов, очевидно, должны выступать производители комплектующих (датчиков, исполнительных устройств со встроенными микромодулями), то есть заводы «Экран», «Измеритель», «ВЗЭП» и др., в роли конечных потребителей — заводы-автопроизводители: ОАО «МАЗ», ОАО «Амкодор», ОАО «МТЗ», ОАО «Гомсельмаш» и др. Таким образом, организационная схема разработки, производства и внедрения в промышленных масштабах выглядит, как показано на рис. 9.

Объективно, внедрение распределенной системы управления бортовой электроникой требует кардинального изменения, модернизации подходов к проектированию, производству и эксплуатации электронной части автотранспортного средства. Понятно, что такие инновации входят в противоречие с существующей, так называемой «агрегативной», практикой внедрения технических новшеств, которая в настоящее время сводится к приобретению завершенных (как правило, импортных) компонентов с оригинальной электроникой.

В 2020 г. завершилась программа «Автоэлектроника», неоднократно сменялось руководство предприятий, министерств и ведомств. Менялась экономическая ситуация и вслед за ней — отношения с российскими партнерами по программе. Работы по внедрению были остановлены.

В дополнение к указанным причинам негативное влияние оказали другие объективные и субъективные обстоятельства:

- изменились условия поставки полупроводниковых пластин с микропроцессорным ядром STM8, ОАО «Интеграл» не имеет гарантированного (на уровне госзаказа) потребителя своей продукции и не заинтересован в дальнейшем инициативном выпуске электронных микромодулей;



Рис. 9. Организационная схема производства и промышленного внедрения микромодулей

Источник: разработка авторов.

– разработка, производство и внедрение осуществляется как минимум в четырех сегментах организаций, принадлежащим различным отраслям и ведомствам, каждое из которых имеет свои корпоративные ограничения и интересы.

В итоге отечественное автотракторостроение остается на прежних концептуальных позициях (и на прежнем уровне) разработки и внедрения инновационных систем автоэлектроники. В сложившейся ситуации получить гарантированный заказ или даже «протокол о намерениях» потенциального потребителя для инициирования ОКР не представляется реальным и выходит за рамки ответственности отдельно взятой организации.

Заключение. Производство микромодулей, комплектующих периферийных устройств с использованием микромодулей, а также бортовых распределенных систем управления мехатроникой в конечных изделиях автотракторной техники находятся в рамках современных требований по обеспечению импортозамещения, экспортно ориентированного производства и научно-технологической безопасности [6].

В Республике Беларусь пройден большой путь научных исследований и получены уникальные результаты в области технологии построения и применения распределенных систем управления бортовой мехатроникой. Основные положения о необходимости и важности этого направления были сформулированы более 15 лет тому назад в Государственной программе развития радиоэлектронной промышленности Республики Беларусь на 2006–2010 гг. [7]. В рамках программы «Автоэлектроника» ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» разработал схмотехнику, а ОАО «ИНТЕГРАЛ» отработало технологию изготовления электронных микромодулей, специализированных для применения в распределенных бортовых системах управления периферийными устройствами.

Минимальные размеры модулей позволяют встраивать их в корпуса датчиков, световых приборов и других исполнительных устройств или располагать их в кабеле или разъеме в непосредственной близости от устройства. Применение микромодулей в процессе создания систем управления периферийными мехатронными устройствами в несколько раз ускоряет процесс разработки и внедрения, выводит конечные изделия (автотракторную технику) на новый качественный уровень, отвечающий современным трендам в отрасли.

Условия для успешного и динамичного развития данного направления включают:

- организацию серийного производства микромодулей с сокращением стоимости для конечных потребителей;
- наличие стратегии модернизации: с появлением новых видов и поколений электронных компонентов, с соблюдением преемственности — поддержки новыми техническими решениями архитектуры и базового ПО, разработанного для предыдущих поколений;
- создание инфраструктуры внедрения (программно-аппаратные средства разработчика: КИТ, библиотеки стандартных программ, онлайн-доступ к технической документации для широкого круга пользователей, торговая сеть свободного доступа потребителей к приобретению микромодулей, обучение в профильных вузах, реклама и т. п.).

Имеющийся опыт и научно-технический задел позволяют утверждать, что совместными усилиями ученых, квалифицированных специалистов предприятий — производителей автоэлектронных компонентов, при заинтересованности и участии конечных потребителей автоэлектроники в Республике Беларусь, можно за полгода-год осуществить модернизацию технологии и наладить серийный выпуск микромодулей и интеллектуальных периферийных устройств, создать основы инфраструктуры для динамичного развития. Для этого необходимо найти механизмы эффективного решения организационных проблем внедрения данной инновационной технологии в отрасли.

Литература:

1. Цветков, В. Я. Распределенное управление / В. Я. Цветков // Современные технологии управления. — 2017. — № 4 (76) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://sovman.ru/article/7602>. — Дата доступа: 15.11.2022.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

2. Бортовая автоматизированная распределенная система управления с рабочим местом водителя [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://nhc.by/catalog/bortovaya-raspredelennaya-sistema-upravleniya>. — Дата доступа: 20.11.2022.

3. Татур, М. М. Отечественный мобильный робот для тушения пожаров особой сложности: от концепции к опытному образцу / М. М. Татур // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2015. — № 1(37). — С. 133–140.

4. Патент на полезную модель № 11056 «Универсальный мобильный робототехнический комплекс». — Дата подачи: 23.07.2015. — Дата регистрации: 15.02.2016 // Авторы: Белевич А. В., Станкевич Е. А., Татур М. М., Одинец Д. Н.

5. Кулагин, В. П. Проблемы параллельных вычислений / В. П. Кулагин // Перспективы науки и образования. — 2016. — № 1. — С. 7–11.

6. Шлычков, С. В. Научно-технологическая сфера национальной безопасности Республики Беларусь: методологические аспекты обеспечения / С. В. Шлычков // Новости науки и технологий. — 2022. — № 3(62). — С. 3–10.

7. Государственная программа развития радиоэлектронной промышленности Республики Беларусь на 2006–2010 гг. (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 20.12.2005 № 1493).
