

УДК 62-83

Николай Евгеньевич Гнездов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: gnezdov@list.ru

Михаил Сергеевич Куленко

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: forestgummy@gmail.com

Сергей Константинович Лебедев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: zerg.lebedev@mail.ru

Алексей Руфимович Колганов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: alex_37@list.ru

Система обучения программированию и выбор микроконтроллеров для управления электроприводами

Авторское резюме

Состояние вопроса. Участие выпускников вузов в проектировании электроприводов подразумевает наличие у них знаний и навыков по разработке программного обеспечения микроконтроллеров, используемых в современных системах управления электроприводами. Публикации на эту тему затрагивают вопросы отдельных учебных курсов или методов обучения, а под лабораторными стендами подразумеваются отладочные платы. Зачастую также фрагментарно строится и учебный процесс. Для успешного освоения этого рода деятельности необходим системный подход к обучению студентов программированию микроконтроллеров систем управления электроприводами. В условиях ограничений со стороны производителей США, Японии и Европы актуальным является и выбор микроконтроллеров для обучения и создания систем управления электроприводами.

Материалы и методы. При разработке набора взаимосвязанных учебных курсов использован 20-летний опыт создания систем управления электроприводами. В качестве инструментов при создании специализированного лабораторного стенда использованы программные пакеты конструирования изделий, технологии металлообработки. При рассмотрении вопроса выбора микроконтроллеров использован метод сравнительного анализа.

Результаты. Описана многоуровневая (3-этапная) последовательность взаимосвязанных учебных курсов по обучению студентов программированию микроконтроллеров систем управления электроприводами. Показана эволюция содержания учебных курсов. Представлен авторский стенд, включающий кроме отладочной платы измерительное (мультиметр, осциллограф) и отладочное (конвертеры интерфейсов) оборудование, размещенное на специальной установке. Приведен обзор и выполнен анализ публикаций на эту тему, даны рекомендации по выбору микроконтроллеров систем управления электроприводами в текущей ситуации.

Выводы. Реализованный на кафедре системный подход к обучению студентов программированию микроконтроллеров систем управления электроприводами позволяет дать им квалификацию, необходимую для самостоятельного выполнения задач при проектировании современных систем управления электроприводами. Представленный лабораторный стенд обеспечивает удобство и безопасность работы со всем используемым в учебном процессе отладочным и измерительным оборудованием. Обзор и рекомендации по выбору микроконтроллеров отечественных и китайских производителей будут полезны разработчикам систем управления электроприводами.

Ключевые слова: системы управления электроприводами, микроконтроллеры, обучение программированию микроконтроллеров, конвертер интерфейсов, отладочные платы, лабораторный стенд

Nikolay Evgenyevich Gnezdov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Electric Drive and Automation of Industrial Units Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-09, e-mail: gnezdov@list.ru

Mikhail Sergeevich Kulenko

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Head of Electric Drive and Automation of Industrial Units Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-09, e-mail: forestgummy@gmail.com

Sergey Konstantinovich Lebedev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Electric Drive and Automation of Industrial Units Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-09, e-mail: zerg.lebedev@mail.ru

Alexey Rufimovich Kolganov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electric Drive and Automation of Industrial Units Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-09, e-mail: alex_37@list.ru

Software design training system and selection of microcontrollers for electric drive control

Abstract

Background. Ability of university graduates to design electric drives (ED) implies that they have knowledge and skills to develop software for microcontrollers (MC) used in modern electric drive control systems (ED CS). Studies on this topic touch upon the issues of particular training courses or teaching methods, and laboratory benches mean only debug boards. Often, education process is designed on a piecemeal basis. A systematic approach is required to teach students programming of microcontrollers of ED CS. In the context of restrictions of manufacturers from the USA, Japan and Europe, the selection of microcontroller for training and developing the ED CS is also topical.

Materials and methods. When developing the interrelated training courses, the authors have used 20 years of experience of design of ED CS. Product design software packages and metalworking technologies have been used as tools to develop a specialized laboratory bench. The method of comparative analysis is used when selecting microcontrollers.

Results. A multi-level (3-stage) model of interrelated training courses to teach students programming MC of ED CS is described. The evolution of the contents of training courses is shown. The author-developed bench is presented. It includes the debug board, measuring (multimeter, oscilloscope) and debugging (interface converters) equipment placed on a special unit. A review is given, an analysis of studies on these issues is carried out, and recommendations to select MC of ED CS in the current situation are given.

Conclusions. Implemented at the department, a systematic approach to teach students programming MC of ED CS gives them the qualifications necessary to independently perform tasks during the design of modern ED CS. The developed laboratory bench provides convenient and safety work with all debugging and measuring equipment used in the educational process. An overview and recommendations on the selection of MC of domestic and Chinese manufacturers will be useful for the developers of the electrical drive control systems.

Key words: electric drive control systems, micro-controllers, micro-controller programming training, interface converter, debug boards, laboratory bench

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.074-082

Введение. Одной из основных компетенций, которой должны обладать выпускники профиля «Электропривод и автоматика», является способность участвовать в проектировании электроприводов. Современные системы управления электроприводами (СУ ЭП) реализуют на базе специализированных микроконтроллеров (МК), обозначаемых мировыми производителями как Motor Control. Отличительными чертами таких МК являются высокопроизводительное ядро для расчета управления в режиме «реального времени» и набор дополнительных (периферийных) модулей для работы с датчиковой системой (АЦП и т.п.), драйверами силовых ключей (модули ШИМ) и для коммуникации с вышестоящим управляющим устройством (модули UART, CAN и т.п.). Причем периферийные модули должны иметь специфические для сферы электроприводов возможности: прерывание по событиям АЦП, модулей ШИМ, внешних сигналов; одновременный захват нескольких входов АЦП; аппаратная реализация «мертвого» времени; блокировка по внешним сигналам в модулях ШИМ и др.

Для квалифицированного использования МК в СУ ЭП студент должен знать основы циф-

ровой и микропроцессорной техники, уметь программировать на языках Си и Ассемблер [1, 2], знать структуру и особенности периферийных модулей нескольких МК типа Motor Control, иметь опыт их программирования.

Публикации на тему обучения программированию МК затрагивают вопросы конкретных учебных курсов [3, 4], предлагают проектные методы обучения [4, 5], варианты дистанционного взаимодействия с обучаемыми [4, 6]. Ниже представлен системный подход к обучению программированию МК именно студентов-электроприводчиков. Показана эволюция содержания учебных курсов. В литературе под лабораторными стендами при обучении программированию МК подразумевают, как правило, отладочные платы [3, 7–9]. Ниже представлен авторский стенд, включающий кроме отладочной платы измерительное (мультиметр, осциллограф) и отладочное (адаптеры интерфейсов) оборудование, размещенное на специальной установке.

До недавнего времени при выборе МК для СУ ЭП решение практически всегда принималось в пользу производителей США, Японии и Европы (Texas Instruments, Analog Device,

Freescalе, Microchip, Toshiba, Infineon, Nec) благодаря передовым характеристикам устройств, стабильному качеству, полному набору документации, средств программирования и отладки, доступности технической поддержки и при этом приемлемой цене. Однако в текущих условиях ограничения поставок следует рассматривать в первую очередь МК отечественных и китайских производителей. В связи с этим ниже предлагается описание и сравнительный анализ МК для СУ ЭП ряда российских и китайских производителей.

Материалы и методы. Учебные курсы.

Первый опыт обучения студентов программированию МК СУ ЭП в 2009 г. показал, что студенты не знают язык Си. Обучение в школе и университете в то время велось на Бейсике, Фортране и Паскале. Для инженера необходимо знание именно языка Си, поскольку программное обеспечение (ПО) для МК СУ ЭП разрабатывается на Си, ПО промышленных контроллеров – на специальном фирменном языке или Си, ПО промышленных и персональных компьютеров (операционные системы) – на Си, даже пользовательские S-функции в Matlabе пишут на языке Си.

Язык Си – специфический, со своим синтаксисом и терминологией. Необходимы определенные знания, практика, время, чтобы его освоить. Поэтому 1-й этап обучения программированию МК СУ ЭП – изучение языка Си – проводится в 5-м семестре (3-й год обучения) в рамках «Основ прикладного программирования». Также в этом курсе студенты знакомятся с основными принципами представления данных в вычислительных системах, разработки и функционирования ПО и Ассемблером.

2-й этап – обучение основам цифровой техники. Проводится в 6-м семестре (3-й год обучения) и состоит из двух частей:

- 1-я часть – курс «Электрические и электронные аппараты» (системы счисления, логика, мультиплексоры, шифраторы и т.д.);

- 2-я часть – курс «Микропроцессорные средства в электротехнике» (изучение архитектур МК, его структуры, ОЗУ, ПЗУ и работы с ними и т.п).

У студентов появляются знания о МК как системе: о составе, принципах работы составляющих и МК в целом.

3-й этап – обучение конкретным МК и реализации алгоритмов управления ЭП. Проводится в 7-м семестре (4-й год обучения). В рамках курса «Компьютерное и микропроцессорное управление в ЭП» студенты изучают аппаратную часть: особенности модулей АЦП, ШИМ, UART, SPI, CAN. После этого идет изучение способов и приемов программной реализации алгоритмов управления, фильтрации, организации системы защит, истории аварий, обмена информацией с другими МК. При становлении курса для изучения был выбран МК TMS320F28335 как

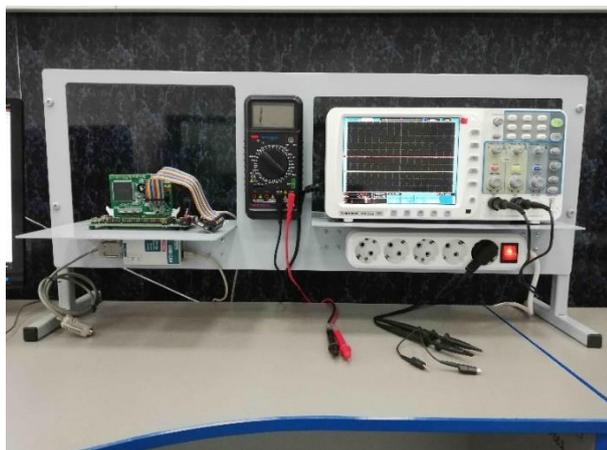
передовая модель наиболее популярной и эталонной в области МК СУ ЭП серии C2000 (производства Texas Instruments) [10]. В последние 5–7 лет в связи с появлением нового поколения МК серии C2000 и ростом популярности МК СУ ЭП на базе ядер ARM Cortex-M в изучение аппаратной части было добавлено рассмотрение периферийных модулей: TMS320F2837x и K1921BK01T (отечественного) [11]. В настоящее время курс модернизируется для ознакомления студентов с китайскими аналогами STM32 [12], в том числе с ядром RISC-V [13].

Лабораторное оборудование. В 2010 г. кафедра ЭП и АУП (ИГЭУ) приняла участие в университетской программе Texas Instruments (TI): были получены 4 комплекта оборудования TMDSHVMTRPFCKIT (по сути, полноценный лабораторный преобразователь частоты (ПЧ) для управления двигателями до 750 Вт). Тогда же через университет были закуплены отладочные платы TE-TMS320F28335, TMDSDOCK28335, eZdsp28335, программаторы TMS320-JTAG-USB (производства Olimex), Blackhawk USB2000, конвертеры интерфейсов USB-RS232, USB-CAN 06A EXT Slavna. Позднее для TMDSHVMTRPFCKIT были приобретены двигатели различных типов: HVACIMTR (асинхронный), HVPMSMMTR (синхронный с постоянными магнитами), HVBLDCMTR (бесщеточный ДПП). В 2019 г. кафедра победила в конкурсе АО «НИИЭТ» и получила 8 комплектов отладочных наборов типа VectorCARD на базе отечественного МК K1921BK01T. В 2021 г. через ИГЭУ были закуплены отладочные платы на базе МК MSP430 и TMS320F28379.

Таким образом, на кафедре ЭП и АПУ сформирован набор отладочных средств разных уровней – от простых отладочных плат до лабораторного ЭП на базе микроконтроллеров TMS320F28335, TMS320F28379 и K1921BK01T. При этом единого, удобного лабораторного стенда для работы с платами, адаптерами, измерительными приборами не было. Каждый раз при проведении лабораторных или исследовательских работ приходилось собирать экспериментальную установку на столе. Кроме неудобства, это чревато механическим и электрическим повреждением отладочных плат.

В текущем году по инициативе и на средства сотрудников кафедры закончено изготовление 8 экземпляров лабораторного стенда для исследования контроллеров (ЛаСтИК) (см. рисунок). Стенд представляет собой вертикальную стальную панель, приподнятую над поверхностью стола на 80 мм на Т-образных опорах. На панели закреплены 2 горизонтальные полки для установки на них отладочной платы (слева) и осциллографа (справа). Горизонтальное расположение отладочной платы облегчает ее установку/снятие со стенда и диагностику осциллографом и мульти-

метром. Между полками посередине панели закреплён мультиметр, под левой полкой – USB-CAN адаптер интерфейсов, под правой полкой – розеточная колодка удлинителя ~220 В. JTAG-эмулятор не требует крепления на панели, поскольку подключается через короткий шлейф к отладочной плате. Полки имеют ряд отверстий для регулирования их выступа за поверхность панели, за счет этого достигается удобство работы с отладочными платами разных размеров.



Внешний вид лабораторного стенда

Выбор МК в условиях ограничений. Российские МК традиционно создавались на базе архитектуры MCS-51 (8051 Intel). Затем появились МК на базе ARM Cortex-M3 (аналоги STM32 от STMicroelectronics, Европа), но в них по-прежнему не было специальной периферии для ЭП, прежде всего модулей ШИМ. Примерно 10 лет назад «Миландр» и НИИЭТ занялись разработкой МК, специализированного для задач электропривода. На настоящий момент известно о 2 российских разработках МК для СУ ЭП:

1. K1921BK01T (НИИЭТ, г. Воронеж) [11]: на рынке с 2016 г., производительность примерно на уровне F2810 от TI (100 МГц), периферия (ШИМ) также близка к TI, есть 9 модулей ШИМ, 12 АЦП, 2 QEP, 2 CAN, 4 SPI, 4 UART, 2 I2C, 1 USB, Ethernet и др. Известны успешно реализованные на этом МК проекты, в том числе серийно выпускаемые.

Существует развитие данного МК (семейство МК) в виде K1921BK028 (улучшенный по периферии и в 2 раза по производительности BK01T) и K1921BK035 (упрощенный BK01T), в том числе в пластиковом корпусе: K1946BK028 и K1946BK035.

Место изготовления чипов – Тайвань, в настоящий момент производство для НИИЭТ приостановлено. Документация, варианты отладочных плат, программаторов, сред разработки и отладки, проект ПО и техническая поддержка есть на сайте НИИЭТ.

2. K1986BK01GI (Миландр, г. Зеленоград) [16]: по заявленным характеристикам, пожалуй,

лучший из российских вариантов (два ядра Cortex-M4F до 160 МГц + одно ядро Cortex-M0 до 130 МГц, 2 АЦП, 9 модулей ШИМ, 2 QEP, 2 CAN, CAN FD, 2 SSP, 1 I2C, 4 UART, USB 2.0, Ethernet и др.).

Однако, несмотря на анонсирование с 2016 г., на рынке его до сих пор нет. На момент написания статьи на сайте производителя указан срок серийных поставок – 2023 г.

Место изготовления чипов не сообщается, но, вероятно, Тайвань. Документация, отладочная плата, программатор, OpenOCD есть на сайте разработчика [16].

Китайские разработки МК для ЭП строятся в абсолютном большинстве случаев на ядрах ARM (поскольку можно приобрести лицензию на ядро) либо RISC-V (открытая архитектура). Особняком стоит фирма Hunan Jinxin Electronic Technology Co. (торговая марка Advancechip), которая выпускает МК серий ADP16, ADP32 и AVP32, являющиеся, по сути, копиями МК серии C2000 (производства Texas Instruments). И, хотя их работоспособность и способность заменять оригиналы от TI подтверждены, стабильность качества, долгосрочные надежность и доступность вызывают сомнения. К тому же их цена в разы превышает цену МК для ЭП на базе ARM. Advancechip ориентирована на внутренний (китайский) рынок, поскольку сайт и вся документация только на китайском языке и отсутствуют представительства вне Китая.

Все рассмотренные китайские разработки МК для ЭП ориентируются (копируют, совершенствуют) на МК STM32, поскольку это рационально для коммерческого успеха. STM32 очень популярны благодаря небольшой стоимости и неплохим характеристикам, и китайские МК стараются использовать эту популярность.

Рассмотрим 7 китайских компаний разработчиков МК:

- GigaDevice: 3-я в мире по объемам продаж в сегменте микросхем энергонезависимой памяти. С 2013 г. производит МК серии GD32 с ядром Cortex-M3, позднее – Cortex-M4 и с 2019 г. (одна из первых в мире) – с ядром RISC-V [17].

Компания fabless размещает производство «на стороне», но контролирует его качество и сконцентрирована на инженерной работе, все МК – собственной разработки, по ряду характеристик лучше прототипов от STM. Ведет активное патентование своих разработок. МК и даже сайт внешне очень похожи на STM.

Документация на английском языке, средства разработки и отладки указаны в большом количестве на специальном сайте технической поддержки (<http://www.gd32mcu.com/en/product/risc>). Отзывы на форумах хорошие, разобраться и работать можно. Есть официальный дистрибьютор в России. Для использования можно рассмотреть модели GD32F470xx (ядро ARM Cortex-M4) и GD32VF103xx (ядро RISC-V);

- Sino Wealth: примерно втрое меньше, чем GigaDevice. Существует с 1994 г., основная продукция – микроконтроллеры. Обладает более 250 патентами в своей области. МК на базе ARM Cortex-M3 выпустила в 2013 г., так же как и GigaDevice. Вероятно, также fabless.

Документация на английском есть на сайте, но не по всем моделям. Есть библиотеки Keil Driver, ProWriter (ПО программатора), CMSIS и SINOWEALTH Motor Workbench (ПО для управления электродвигателями). Информации о рекомендуемых средах разработки, эмуляторах JTAG и отладочных платах найти не удалось.

МК для ЭП включают линейку на базе ядра 8051 (6 моделей) и ARM (5 моделей) [18]. Для использования имеет смысл рассмотреть модели SH33F2801 и SH33F2811 (ядро ARM Star – по набору инструкций совместимо с Cortex-M4F);

- WCH (торговая марка WinChipHead): менее известная китайская компания Nanjing Qinheng Microelectronics Co. Существует с 2004 г., занимается разработкой микросхем интерфейсов связи и МК на базе ядер 8051, ARM Cortex-M3 и RISC-V [19]. Состав и набор периферии также очень похожи (унифицированы) с STM32. Похожа на GigaDevice (упор на собственную разработку, активное участие в сообществах RISC-V и китайских разработчиков МК), только в меньшем масштабе.

Документация на английском есть на сайте. Есть разделы сайта со ссылкой на рекомендуемую среду разработки ПО, драйверы, но на китайском языке.

Для использования можно рассмотреть модели CH32F203VCT6 (ядро ARM Cortex-M3) и CH32V307VCT6 (ядро RISC-V);

- MindMotion: основана в 2011 г., выпускает аналоги STM32 на базе ARM Cortex-M0, M3 и ARM China Star MC-1 [20]. По стилю похожа на GigaDevice, но гораздо меньше: кроме МК, других микросхем в ассортименте нет; 80 % МК на базе Cortex-M0, в том числе вся серия MM32SPINxx, которую они позиционируют как motor applications.

Документация, среда разработки ПО, средства отладки и примеры есть на сайте фирмы [20].

По характеристикам представляют интерес MM32F103RBT6 (ARM Cortex-M3) и MM32F5287L9PV (ARM China Star MC-1);

- CKS: China Key System Co. Основана в 2008 г., по масштабам примерно раза в 1,5–2 больше GigaDevice. Работает во многих областях электроники, обладает собственным производством. Является подразделением государственной корпорации China Electronics Technology Group Corporation (более 80 000 сотрудников), которая с 2020 г. находится под санкциями США.

Есть трудности с доступом из России и Европы на сайты компании [21]. Дилеров и постоян-

ных продавцов МК CKS в России нет. Для использования могут быть интересны модели CKS32F407VGT6 и CKS32F407IGT6;

- Artery Technology: основана в 2016 г., офисы расположены в Чунцине, Шэньчжэне, Сучжоу и на Тайване. Ориентирована на разработку (85 % сотрудников), производство, вероятно, на Тайване.

Линейка продукции включает только МК на базе ядер ARM Cortex-M4 и одну модель – на Cortex-M0 с пониженным энергопотреблением [22]. МК Artery выделяются среди конкурентов в разы большей тактовой частотой – до 288 МГц, вероятно благодаря использованию технического процесса 55 нм. Набор и характеристики периферийных модулей примерно как у других китайских МК.

Документация, собственная среда разработки, пакеты ПО для Keil, IAR, Jlink, средства отладки и примеры ПО есть на сайте [22]. Для использования можно рассмотреть модели AT32F407VGT7 и AT32F437ZMT7 (оба на ARM Cortex-M4F);

- Geehy Semiconductor – дочерняя компания Apex Microelectronix, входящей в Ninestar Corporation, основанную в 2000 г. Geehy располагает 4 R&D центрами в Шухае, Шанхае, Ханьчжоу и США с более чем 300 сотрудниками.

В линейке продукции присутствуют МК – аналоги STM и микросхемы для IoT. МК – в основном на базе ядер ARM Cortex-M0+ и Cortex-M3, на базе Cortex-M4 только две модели: 405 и 407 [23]. По характеристикам очень близки к МК от CKS.

Документация, пакеты ПО (SDK), средства отладки есть на сайте [23]. Для использования можно рассмотреть APM32F407VGT6 и APM32F407IGT6 (оба на ARM Cortex-M4F).

Характеристики выбранных для рассмотрения МК представлены в таблице.

Результаты. После прохождения вышеуказанной последовательности взаимосвязанных курсов студент готов к самостоятельной реализации какого-либо проекта микроконтроллерной СУ ЭП. Например, в выпускной работе бакалавра студент не только синтезирует, моделирует, но и реализует свою систему в МК. Таким образом, выпускники-бакалавры получают достаточную квалификацию для удовлетворения потребностей работодателей – наших заказчиков. Большого за 4 года ожидать не стоит. В перспективе надо стремиться к тому, чтобы в одной из курсовых работ (по СУ ЭП или ТЭП) выполнялась реализация алгоритмов в МК.

В магистратуре используется более гибкий и индивидуальный подход. В курсе «Автоматизация научных исследований и прикладное программирование в ЭП» студенты знакомятся с возможностями Matlab по автоматической конвертации моделей Simulink в программный код, его загрузке и отладке в МК [14, 15].

Характеристики микроконтроллеров для управления электроприводами

| Микроконтроллер | Ядро | Частота, MHz/ производительность, DMIPS | Flash, КВ | RAM, КВ | GPIO | ADC каналы/ разряд-ты/ быстр-е, Msps | PWM, кана- лов | QEP (или GPTmr) | UART | SPI | CAN | I2C | usb | Ether- net | Корпус |
|-------------------|---------------|---|-----------------------|------------|------|---|----------------------|-----------------------|------|-----|------------------------|-----|-----|---------------|--------------------------|
| TMS320F28335 | TI DSP | 150 / 150 | 512 | 68 | 88 | 16 / 12 / 12,5 | 6x2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | нет | нет | LQFP-176 |
| NI31T | K1921BK01T | Cortex-M4F | 1000 | 192 | 120 | 24 / 12 / 1,4 | 9x2 | 2 | 4 | 4 | 2 (1 TwinCAN) | 2 | 1 | 1 | 4406.208-1 (LQFP-208) |
| | K1946BK028 | Cortex-M4F + TMU, LAU | 2000 | 512 | 192 | 48 / 12 / 2 | 10x2 | 4 | 6 | 4 | 2 (1 TwinCAN) | 2 | нет | 1 | PBGA400 |
| | K1946BK035 | Cortex-M4F | 100 / 125 | 16 | 32 | 4 / 12 / 2 | 3x2 | 1 | 2 | 1 | 2 (1 TwinCAN) | 1 | нет | нет | MK5162.48 |
| | K1986BK01GI | 2xCortex-M4F + Cortex-M0 + TMU, CRC | 160 (M4F) 130 (M0) | 256 | 96 | 25 / 12 | 9x2 | 2 | 4 | 2 | 2 CAN 2.0b + CAN FD | 1 | 1 | 1 | BGA144 |
| STMicro- Lanap | STM32F303VE | Cortex-M4F | 512 | 80 | 78 | 39 / 12 / 5 | 6x2 | 3 | 6 | 4 | 1 | 3 | 1 | 1 | LQFP100/ TFBGA100 |
| | STM32G484VE | Cortex-M4F | 512 | 128 | 86 | 39 / 12 / 4 | 6x2 | 4 | 5 | 4 | 3 (CAN FD) | 4 | 1 | 1 | LQFP100/ TFBGA100 |
| Giga Device | GD32F470ZKT6 | Cortex-M4F | 3072 | 256 | 114 | 24 / 12 / 2,6 | 6x2 | 8x16bit, 2x32bit | 8 | 6 | 2 | 3 | 1 | 1 | LQFP144 |
| | GD32VF103VBT6 | RISC-V | 128 | 32 | 80 | 16 / 12 / 1 | 3x2 | 1x16bit | 5 | 3 | 2 | 2 | 1 | нет | LQFP100 |
| Sino Wealth | SH33F2801 | ARM Star + TMU, CRC | 128 | 16 | 45 | 16 / 12 / 2 | 3x2 | 1x32bit | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | TQFP48 / LQFP32 |
| | SH33F2811 | ARM Star + TMU, CRC | 128 | 16 | 47 | 16 / 12 / 2 | 3x2 | 1x32bit | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | QFN56L / LQFP64L |
| WCH | CH32F203VCT6 | Cortex-M3 | 256 | 64 | 80 | 16 / 12 | 4x2 | 4x16bit | 8 | 3 | 1 | 2 | 1 | нет | LQFP-100 |
| | CH32V307VCT6 | RISC-V | 256 | 64 | 80 | 16 / 12 | 4x2 | 4x16bit | 8 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | LQFP-100 |
| Mind Motion | MM32F103RBT6 | Cortex-M3 | 128 | 20 | 51 | 16 / 12 / 1 | 4x2 | 3x16bit | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | нет | LQFP-64 |
| | MM32F5287L9PV | ARM China Star MC-1 + TMU, CRC | 2304 | 192 | 110 | 21 / 12 / 3 | 8x2 | 2x16bit, 2x32bit | 7 | 3 | 2 FlexCAN | 2 | 1 | 1 | LQFP-144 |
| CKS | CKS32F407VGT6 | Cortex-M4F | 1024 | 192 | 82 | 16 / 12 | 6x2 | 8x16bit, 2x32bit | 4+2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | LQFP100 |
| | CKS32F407IGT6 | Cortex-M4F | 1024 | 192 | 140 | 24 / 12 | 6x2 | 8x16bit, 2x32bit | 4+2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | LQFP176 |
| Artery | AT32F407VGT7 | Cortex-M4F | 1024 | 224 | 80 | 16 / 12 | 6x2 | 8x16bit, 2x32bit | 4 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | LQFP100 |
| | AT32F437ZMT7 | Cortex-M4F | 4032 | 512 | 116 | 24 / 12 / 5,33 | 6x3 | 8x16bit, 2x32bit | 4 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 | LQFP144 |
| Geely | APM32F407VGT6 | Cortex-M4F | 1024 | 192 | 82 | 24 / 12 | 6x2 | 8x16bit, 2x32bit | 4+2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | LQFP100 |
| | APM32F407IGT6 | Cortex-M4F | 1024 | 192 | 140 | 24 / 12 | 6x2 | 8x16bit, 2x32bit | 4+2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | LQFP176 |

С помощью автоматической конвертации моделей в программный код или других способов студентам предлагается реализовать хотя бы часть синтезируемых в магистерской работе алгоритмов в МК для оценки их эффективности, оптимизации, работоспособности в режиме «реального времени». При этом существует широкий спектр возможностей вплоть до создания макета ЭП с оригинальными алгоритмами управления.

Представленный лабораторный стенд (см. рисунок) обеспечивает удобство и безопасность работы с отладочной платой и необходимыми адаптерами и измерительным оборудованием. Весь набор оборудования расположен на уровне глаз человека, сидящего за столом. Оборудование не мешает работе с компьютером, установленным на том же столе: исключены возможности случайного касания отладочной платы при движении рук, например при работе с компьютерной мышью или с измерительным оборудованием. Разработаны техническая документация на стенд, методическое и программное обеспечение для лабораторных работ. Стенды и все отладочное оборудование расположены в отдельной аудитории – лаборатории микроконтроллерных средств в ЭП.

Анализ рынка отечественных и китайских МК для СУ ЭП позволяет сделать следующие выводы:

- ключевым является вопрос доступности: в случае отечественных МК это возможность производства в Тайване или в другом месте, в случае китайских МК – возможность регулярных поставок в Россию (вопрос требует проработки в каждом конкретном случае);

- среди китайских вариантов, учитывая производительность, периферию и наличие средств разработки и отладки, следует ориентироваться на Artery, Giga Device, Geehy, MindMotion, Sino Wealth (именно в таком приоритете);

- использовать МК от Advancechip рационально краткосрочно для замены TMS в текущих проектах в случае сложностей с их доступностью. В долгосрочной перспективе и в новых проектах следует выбирать МК на основе ядра ARM в силу их меньшей стоимости, высоких технических характеристик и большого разнообразия;

- преимуществами МК от НИИЭТ являются: схожесть его периферийных модулей с аналогичными в МК TI, доступность средств отладки и технической поддержки. Все это минимизирует сроки и облегчает разработку ПО. Однако невозможность производства чипов на Тайване остро ставит вопрос доступности этих МК.

Выводы. Описанное выше многоуровневое (3-этапное) обучение студентов программированию МК для управления электроприводами позволяет дать выпускникам достаточную квалификацию для выполнения самостоятельных

задач при проектировании СУ ЭП. Представленный лабораторный стенд для исследования контроллеров включает, кроме отладочных плат, измерительное и отладочное оборудование, смонтированное на специальной установке. Стенд обеспечивает удобство и безопасность работы. Все представленные результаты используются в учебном процессе кафедры ЭП и АПУ ИГЭУ.

Приведенный обзор МК отечественных и китайских производителей помогает при их выборе для обучения и разработок в условиях ограничений со стороны производителей США, Японии и Европы. Требуется своевременная модернизация учебных курсов для учета технических и экономических изменений в сфере МК СУ ЭП. Обеспечить это позволяет привлечение к педагогической деятельности специалистов, которые профессионально занимаются разработкой СУ ЭП.

Список литературы

1. **Встраиваемые** высокопроизводительные цифровые системы управления. Практический курс разработки и отладки программного обеспечения сигнальных микроконтроллеров TMS320x28xxx в интегрированной среде Code Composer Studio: учеб. пособие / А.С. Анучин, Д.И. Алямкин, А.В. Дроздов, В.Ф. Козаченко; под общ. ред. В.Ф. Козаченко. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 270 с.

2. **Практический** курс микропроцессорной техники на базе процессорных ядер ARM-Cortex-M3/M4/M4F: учеб. пособие [Электронный ресурс] / В.Ф. Козаченко, А.С. Анучин, Д.И. Алямкин и др.; под общ. ред. В.Ф. Козаченко. – М.: Изд-во МЭИ, 2019. – Режим доступа: <https://motorcontrol.ru/publications/books/>, свободный (дата обращения 02.10.2023).

3. **Попов С.А., Абдрахманов В.Х.** Обзор существующих решений и разработка собственных учебных курсов и стендов по программированию микроконтроллеров PIC16, STM32, Arduino // Инженерное образование в контексте будущих промышленных революций – СИНЕРГИЯ-2020: сб. науч. ст. междунар. сетевой науч.-практ. конф., г. Казань, 3 сентября – 4 декабря 2020 г. – Казань: Казан. нац. исслед. технол. ун-т, 2020. – С. 199–208. – EDN AIUUCR.

4. **Уваров С.С., Лызлов С.С., Катина М.В.** Гибкие аппаратно-программные средства для практических занятий по дисциплине «Микропроцессорные устройства систем управления» // Автоматика на транспорте. – 2022. – Т. 8, № 2. – С. 218–226.

5. **Соснин А.С., Емельянов А.А.** Применение проектного метода обучения в изучении программирования микроконтроллеров // Наука. Информатизация. Технологии. Образование: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., г. Екатеринбург, 26 февраля – 2 марта 2018 г. – Екатеринбург: Российский гос. проф.-пед. университет, 2018. – С. 383–388. – EDN WDIMJF.

6. **Сивков В.С.** Организация лабораторных работ по программированию микроконтроллеров в условиях дистанционного обучения // IX Российская науч.-метод. конф. проф.-преп. состава, науч. сотрудников и асп., г. Самара, 5–8 апреля 2021 г. – Самара:

Поволжский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2021. – С. 84–85.

7. **Разработка** лабораторного стенда для обучения студентов программированию микроконтроллеров / А.В. Волков, С.А. Шиков, Р.Р. Биктякова, Т.А. Захватова // Материалы XXIII науч.-практ. конф. молодых ученых, асп. и студ. Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, г. Саранск, 21–28 мая 2019 г. – Саранск: Изд-во МГУ им. Н.П. Огарева, 2019. – С. 363–367.

8. **Груненко Н.В., Шевченко А.В., Акимов Д.М.** Разработка учебного стенда на основе отладочного набора STK500 // Труды междунар. симпозиума «Надежность и качество». Т. 1. – Пенза: ПГУ, 2018. – С. 312–314.

9. **Пат.** на полезную модель № 103652 U1 Российская Федерация, МПК G09B 23/18. Лабораторный блок для изучения микроконтроллеров / М.Д. Китайгородский, Д.М. Сельков: № 2010127759/12: заявл. 05.07.2010; опубл. 20.04.2011.

10. **C2000** real-time control MCUs – Products [Электронный ресурс] / Texas Instruments. – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: <http://www.ti.com/microcontrollers/c2000-real-time-control-mcus/products.html>, свободный (дата обращения 28.06.2022).

11. **Микроконтроллеры 32 бит** [Электронный ресурс] / НИИЭТ. – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: <https://niiet.ru/product-category/civil/civil-microcont-32-bit/>, свободный (дата обращения 28.06.2022).

12. **STM32** 32-bit Arm Cortex MCUs [Электронный ресурс] / STMicroelectronics. – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>, свободный (дата обращения 28.06.2022).

13. **RISC-V** Материал из Википедии [Электронный ресурс] / Wikipedia. – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RISC-V>, свободный (дата обращения 28.06.2022).

14. **Модельно-ориентированное** проектирование в основе обучения программированию микроконтроллеров / В.Ю. Балыбердин, В.А. Бузов, Д.И. Оглоблин, К.В. Соломатина // Вопросы педагогики. – 2018. – № 6-1. – С. 25–30.

15. **Гнездов Н.Е.** Микропроцессорное моделирование электромехатронных систем: учеб.-метод. пособие / Н.Е. Гнездов; Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2012. – 76 с.

16. **K1986BK01GI** (ОКР «Электросила 2.0») [Электронный ресурс] / «Миландр». – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protssory/32_razryadnye_mikrokontrollery/k1986vk01gi/, свободный (дата обращения 28.06.2022).

17. **GD32** Microcontrollers [Электронный ресурс] / GigaDevice. – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: <https://www.gigadevice.com/products/microcontrollers/gd32/>, свободный (дата обращения 28.06.2022).

18. **Product** Information [Электронный ресурс] / Sinowall. – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: https://en.sinowall.com/product?type_id=15&a_v_type=1, свободный (дата обращения 28.06.2022).

19. **32-bit General Purpose MCUs** [Электронный ресурс] / Nanjing Qinheng Microelectronics Co. – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: <http://special.wch.cn/en/mcu/>, свободный (дата обращения 28.06.2022).

20. **MM32SPIN** [Электронный ресурс] / MindMotion. – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: <https://www.mindmotion.com.cn/en/products/mm32mcu/mm32spin/>, свободный (дата обращения 28.06.2022).

21. **CKS** Microcontrollers [Электронный ресурс] / CKS. – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: <http://www.cksmcu.com/en/index.html>, свободный (дата обращения 28.06.2022).

22. **About AT32 MCU** [Электронный ресурс] / Artery Technology. – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: <https://www.arterychip.com/en/product/index.jsp?t=1657204047690>, свободный (дата обращения 28.06.2022).

23. **APM32F405/407** [Электронный ресурс] / Geehy Semiconductors. – Электрон. текстовые и графические дан. – Режим доступа: <https://geehy.com/apm32?id=49>, свободный (дата обращения 28.06.2022).

References

1. Anuchin, A.S., Alyamkin, D.I., Drozdov, A.V., Tarasov, A.S. *Vstraivaemye vysokoproizvoditel'nye tsifrovye sistemy upravleniya. Prakticheskiy kurs razrabotki i otladki programmnoy obespecheniya signal'nykh mikrokontrollerov TMS320x28xxx v integrirovannoy srede Code Composer Studio* [Embedded high performance digital control systems. Prakt. course of development and debugging of software for signal microcontrollers TMS320x28xxx in the integrated environment Code Composer Studio]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2010. 270 p.
2. Kozachenko, V.F., Anuchin, A.S., Alyamkin, D.I., Zharkov, A.A., Lashkevich, M.M., Savkin, D.I., Shpak, D.M. *Prakticheskiy kurs mikroprotsessornoy tekhniki na baze protsessornykh yader ARM-Cortex-M3/M4/M4F* [Practical course of microprocessor technology based on ARM-Cortex-M3/M4/M4F processor cores: tutorial]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2019. 542 p. Available at: <https://motorcontrol.ru/publications/books/>, svobodnyy (data obrashcheniya 02.10.2023).
3. Popov, S.A., Abdrakhmanov, V.Kh. *Obzor sushchestvuyushchikh resheniy i razrabotka sobstvennykh uchebnykh kursov i stendov po programmirovaniyu mikrokontrollerov PIC16, STM32, Arduino* [Review of existing solutions and development of our own training courses and stands for programming microcontrollers PIC16, STM32, Arduino]. *Sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy setevoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Inzhenernoe obrazovanie v kontekste budushchikh promyshlennykh revolyutsiy – SINERGIYa-2020», g. Kazan', 3 sentyabrya – 4 dekabrya 2020 g.* [Proceedings of international network scientific-practical conference “Engineering education in the context of future industrial revolutions - SYNERGY 2020”, Kazan, September 3 – December 4, 2020]. Kazan': Kazanskiy natsional'nyy issledovatel'skiy tekhnologicheskii universitet, 2020, pp. 199–208. EDN AIUUCR.
4. Uvarov, S.S., Lyzlov, S.S., Katina, M.V. *Gibkie apparatno-programmnye sredstva dlya prakticheskikh zanyatiy po distsipline «Mikroprotsessornye ustroystva sistem upravleniya»* [Flexible hardware and software for

practical classes in the discipline “microprocessor devices of control systems”. *Avtomatika na transporte*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 218–226.

5. Sosnin, A.S., Emel'yanov, A.A. *Primenenie proektnogo metoda obucheniya v izuchenii programmirovaniya mikrokontrollerov* [Application of the project teaching method in the study of microcontroller programming]. *Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka. Informatizatsiya. Tekhnologii. Obrazovanie»*, g. Ekaterinburg, 26 fevralya – 2 marta 2018 g. [Proceedings of XI International scientific and practical conference “Science. Informatization. Technology. Education”, Ekaterinburg, February, 26 – March, 2 2018]. Ekaterinburg: Rossiyskiy gosudarstvennyy professional'no-pedagogicheskiy universitet, 2018, pp. 383–388. EDN WDIMJF.

6. Sivkov, V.S. *Organizatsiya laboratornykh rabot po programmirovaniyu mikrokontrollerov v usloviyakh distantsionnogo obucheniya* [Organization of laboratory work on programming microcontrollers in the context of distance learning]. *IX Rossiyskaya nauchno-metodicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov*, g. Samara, 5–8 aprelya 2021 g. [IX Russian scientific and methodological conference of the teaching staff, researchers and graduate students, Samara, 5–8 April, 2021]. Samara: Povolzhskiy gosudarstvennyy universitet telekommunikatsiy i informatiki, 2021, pp. 84–85.

7. Volkov, A.V., Shikov, S.A., Biktyakova, R.R., Zakhvatova, T.A. *Razrabotka laboratornogo stenda dlya obucheniya studentov programmirovaniyu mikrokontrollerov* [Development of a laboratory stand for teaching students programming microcontrollers]. *Materialy XXIII nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov Natsional'nogo issledovatel'skogo Mordovskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.P. Ogareva*, g. Saransk, 21–28 maya 2019 g. [Proceedings of XXIII scientific and practical conference of young scientists, graduate students and students of the National Research Mordovian State University, Saransk, 21–28 May, 2019]. Saransk: Izdatel'stvo MGU im. N.P. Ogareva, 2019, pp. 363–367.

8. Grunenkov, N.V., Shevchenko, A.V., Akimov, D.M. *Razrabotka uchebnogo stenda na osnove otladochnogo nabora STK500* [Development of a training stand based on the STK500 debug kit]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*. T. 1 [International Symposium “Reliability and quality”. Vol. 1]. Penza, 2018, pp. 312–314.

9. Kitaygorodskiy, M.D., Sel'kov, D.M. *Laboratornyy blok dlya izucheniya mikrokontrollerov* [Laboratory

block for studying microcontrollers]. Patent RF, no. 103652, 2011.

10. C2000 real-time control MCUs – Products. Texas Instruments. Available at: <http://www.ti.com/microcontrollers/c2000-real-time-control-mcus/products.html>, (Date of appeal 28.06.2022).

11. 32-bit microcontrollers, NIIET. Available at: <https://niiet.ru/product-category/civil/civil-microcont-32-bit/>, (Date of appeal 28.06.2022).

12. STM32 32-bit Arm Cortex MCUs. STMicroelectronics. Available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>, (Date of appeal 28.06.2022).

13. RISC-V Material from Wikipedia. Wikipedia. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RISC-V>, (Date of appeal 28.06.2022).

14. Balyberdin, V.Yu., Buzov, V.A., Ogloblin, D.I., Solomatina, K.V. *Model'no-orientirovannoe proektirovanie v osnove obucheniya programmirovaniyu mikrokontrollerov* [Model-Based Design at the heart of learning to program microcontrollers]. *Voprosy pedagogiki*, 2018, no. 6-1, pp. 25–30.

15. Gnezdov, N.E. *Mikroprotsessornoe modelirovanie elektromekhatronnykh sistem* [Microprocessor simulation of electromechatronic systems]. Ivanovo, 2012. 76 p.

16. K1986BK01GI (development work «Elektrosila 2.0»). “Milandr”. Available at: https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protsessory/32_razryadnye_mikrokontrollery/k1986vk01gi/, (Date of appeal 28.06.2022).

17. GD32 Microcontrollers. GigaDevice. Available at: <https://www.gigadevice.com/products/microcontrollers/gd32/>, (Date of appeal 28.06.2022).

18. Product Information. Sino Wealth. Available at: https://en.sinowealth.com/product?type_id=15&a_v_type=1, (Date of appeal 28.06.2022).

19. 32-bit General Purpose MCUs. Nanjing Qin-heng Microelectronics Co. Available at: <http://special.wch.cn/en/mcu/>, (Date of appeal 28.06.2022).

20. MM32SPIN. MindMotion. Available at: <https://www.mindmotion.com.cn/en/products/mm32mcu/mm32spin/>, (Date of appeal 28.06.2022).

21. CKS Microcontrollers. CKS. Available at: <http://www.cksmcu.com/en/index.html>, (Date of appeal 28.06.2022).

22. About AT32 MCU. Artery Technology. Available at: <https://www.arterychip.com/en/product/index.jsp?t=1657204047690>, (Date of appeal 28.06.2022)

23. APM32F405/407. Geehy Semiconductors. Available at: <https://geehy.com/apm32?id=49>, (Date of appeal 28.06.2022).