

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

XIV Международная научно-практическая конференция

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

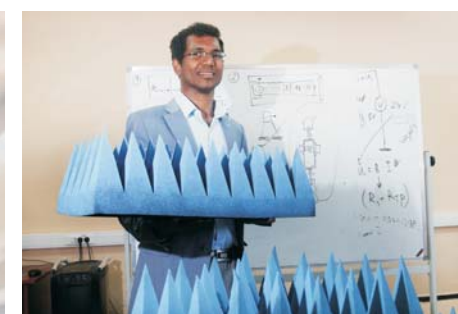
Материалы докладов

г. Томск

28–30 ноября 2018 г.

В двух частях

ЧАСТЬ 1



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

XIV Международная научно-практическая конференция

28–30 ноября 2018 г.

Материалы докладов

В двух частях

Часть 1

В-Спектр
Томск – 2018

УДК 621.37/39 + 681.3
ББК (Ж/О) 32.84.85.965
Э 45

Э 45 **Электронные средства и системы управления:** материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции (28–30 ноября 2018 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – 348 с.
ISBN 978-5-91191-401-1
ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)
ISBN 978-5-91191-403-5 (Ч. 2)

Сборник содержит материалы докладов, представленных на XIV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 28–30 ноября 2018 г.), по следующим направлениям: радиотехнические и телекоммуникационные системы; наноэлектроника СВЧ; нанотехнологии в электронике; антенны и микроволновые устройства СВЧ; нелинейная оптика; интеллектуальная силовая электроника и преобразовательная техника; плазменная электроника; биомедицинская электроника; автоматизация и оптимизация систем управления и обработка информации; интеллектуальные системы проектирования, автоматизация проектирования электронных устройств и систем; информационная безопасность; информационные технологии в управлении и принятии решений; информационные технологии в обучении; инновации в сфере электроники и управления; оптоэлектроника и фотоника; видеоинформационные технологии и цифровое телевидение.

Для студентов, преподавателей и специалистов, интересующихся проблемами систем управления.

УДК 621.37/39 + 681.3
ББК (Ж/О) 32.84.85.965

*Конференция проводится при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).
Проект № 18-07-20094*

*Часть статей секций 2–22 направлена для публикации
в журнале «Доклады ТУСУРа»*

ISBN 978-5-91191-401-1
ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)

© ТУСУР, 2018
© Коллектив авторов, 2018

СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «КЕЙСАЙТ ТЕКНОЛОДЖИЗ»



ООО «Кейсайт Текнолоджиз»
Россия, 115054, г. Москва,
Космодамианская наб., 52, стр. 3.

Тел.: 495 797 39 00
Факс: 495 797 39 02
www.keysight.ru

Keysight Technologies – мировой технологический лидер на рынке контрольно-измерительных решений для электронной, оборонной, аэрокосмической и телекоммуникационной промышленности.

Как самостоятельная компания Keysight Technologies была образована в 2014 г. в результате стратегического разделения компании Agilent Technologies, которая, в свою очередь, до 1999 г. входила в корпорацию Hewlett-Packard. Первый измерительный прибор под маркой Hewlett-Packard был выпущен более 75 лет назад.

В настоящий момент компания Keysight Technologies предоставляет самый широкий на рынке спектр лабораторных, модульных и портативных контрольно-измерительных приборов, в том числе оборудование для радиоизмерений (генераторы сигналов, анализаторы сигналов, анализаторы цепей), осциллографы и приборы общего назначения (мультиметры, источники питания, генераторы импульсов, системы сбора данных, логические анализаторы, ручные приборы), решения для тестирования телекоммуникаций, а также системы автоматизированного проектирования и моделирования электронных устройств.

В России приборы Keysight Technologies, ранее производимые под маркой Hewlett-Packard / Agilent, используются уже более 45 лет и по праву считаются наиболее точным и надежным контрольно-измерительным оборудованием на рынке.

Российский офис компании Keysight Technologies предлагает своим клиентам локальную техническую и сервисную поддержку, техническую документацию на русском языке. Для серий малогабаритных осциллографов, генераторов сигналов и анализаторов спектра разработаны русскоязычные интерфейсы пользователя. На большинство приборов есть сертификаты об утверждении типа средств измерений. На постоянной основе ведется работа по включению в Госреестр новых приборов Keysight Technologies.

Среди крупнейших заказчиков Keysight Technologies в России ведущие научно-исследовательские институты, конструкторские бюро, вузы, крупнейшие операторы связи.

В 2012 г. компания Keysight Technologies открыла два дополнительных региональных офиса в России – в Приволжском и Сибирском федеральных округах. В 2013 г. дополнительный офис открыт в Ростове-на-Дону, в 2014 г. – в Санкт-Петербурге.

Информация о компании Keysight Technologies доступна в сети Интернет по адресу: www.keysight.ru

*Генеральный директор ООО «Кейсайт Текнолоджиз»
Смирнова Галина Владимировна*

СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «ЛЕКРОЙ РУС»



ООО «ЛеКрой РУС»
119071, г. Москва, 2-й Донской
проезд, д. 10, стр. 4, 2-й этаж

Тел.: 495 777-5591
Факс: 495 640-3023
<https://prist.ru/>

Компания «ПриСТ» основана в 1994 г. Сегодня АО «ПриСТ» один из крупнейших российских поставщиков приборов для электроизмерений, радиоизмерений и измерений параметров окружающей среды (<https://prist.ru/>).

В компании работает более 80 высококвалифицированных сотрудников, открыты представительства в Санкт-Петербурге и Екатеринбурге, имеется дилерская сеть по всей территории России, дилеры в Белоруссии и Казахстане.

Основные виды деятельности:

- Поставки измерительного оборудования.
- Технические консультации по подбору средств измерения и вариантам замен приборов, снятых с производства или морально устаревших.
- Услуги по поверке и калибровке СИ.
- Услуги по техническому обслуживанию СИ, включая закрытую калибровку.
- Услуги автоматизации процессов поверки и калибровки.
- Испытания для целей утверждения типа СИ.
- Сервисная поддержка, гарантийное и послегарантийное обслуживание.
- Предоставление СИ в арендное пользование.

Компания «ПриСТ» является эксклюзивным поставщиком на территории России и СНГ продукции таких компаний, как APPA, Center, Good Will Instrument, SEW, Tabor Electronics, Teledyne LeCroy и Wayne Kerr Electronics. Дистрибьюторские и партнерские соглашения связывают компанию со всемирно известными производителями: Anritsu, Fluke, Keysight, National Instruments, Rohde&Schwarz, Pendulum, Spectracom, TDK-Lambda, Pico Technology.

С 2004 г. АО «ПриСТ» представляет на российском рынке компанию LeCroy (с 2012 г. Teledyne LeCroy) – одного из мировых лидеров в разработке и производстве цифровых осциллографов. Осциллографы высочайшего класса помогают инженерам-конструкторам и учёным осуществлять наблюдение, измерение и анализ сигналов в электронных цепях и трактах различных устройств. Компания «Teledyne LeCroy» является одним из технологических лидеров на рынке цифровых осциллографов. Это подтверждают ее достижения, например, в 2013 г. компания представила многоканальную систему с полосой пропускания 100 ГГц в режиме реального времени. В том же 2013 г. были представлены осциллографы высокого разрешения (HDO) с 12-битным АЦП и полосой пропускания 1 ГГц. Семейство осциллографов HDO существенно изменило представление о точности измерений, доступной цифровым осциллографам. 2018 год ознаменовался выходом новой серии осциллографов высокого разрешения WavePro HDR, которая обеспечивает теперь высокоточные измерения в полосе до 8 ГГц. Кроме цифровых осциллографов, компания «Teledyne LeCroy» выпускает анализаторы протоколов. Это широкий класс приборов для тестирования устройств передачи данных как на физическом, так и на логическом уровне. В этой области «Teledyne LeCroy» также занимает лидирующие позиции и предоставляет решения для всех современных протоколов передачи последовательных данных (<http://lecroy-rus.ru/>).



9. Zhu M. Design and evaluation of feedforward active ripple filters / M. Zhu, D.J. Perreault, V. Caliskan et al. // IEEE Trans. Power Electron. – Mar. 2005. – Vol. 20, No. 2. – P. 276–285.
10. Chow A.C. Design and evaluation of a hybrid passive/active ripple filter with voltage injection / A.C. Chow, D.J. Perreault // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – Apr. 2003. – Vol. 39, No. 2. – P. 471–480.
11. Wang S. Characterization, evaluation and design of noise separator for conducted EMI noise diagnosis / S. Wang, F.C. Lee, W.G. Odendaal // IEEE Trans. Power Electron. – Jul. 2005. – Vol. 20, No. 4. – P. 974–982.
12. Затулов С. Модули фильтрации радиопомех и защиты от перенапряжений для питающих цепей постоянного и переменного тока / С. Затулов, А. Миронов, И. Твердов // Силовая электроника. – 2007. – № 14. – С. 56–59.
13. Luo F. Design of a hybrid busbar filter combining a transmission line filter and a one-turn inductor for DC-fed three-phase motor drive systems / F. Luo, A.C. Baisden, D. Boroyevich et al. // IEEE Trans. Power Electron. – 2013. – Vol. 28, No. 12. – P. 5588–5602.
14. Chen L.J. Implementation of a compact EMI filter array for 4G-LTE applications on LTCC / L.J. Chen, K.H. Lin // IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol. – Jun. 2015. – Vol. 5, No. 6. – P. 713–722.
15. Improved model of T-type LC EMI chip filters using new microstrip test fixture / A.B. Menicanin, M.S. Damnjanovic, L.D. Zivanov, O.S. Aleksic // IEEE Trans. Magn. – Oct. 2011. – Vol. 47, No. 10. – P. 3975–3978.
16. Series-connected grounding of common-mode EMI filter / H. Chen, P. Meng, J. Li, Z. Qian // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – Nov. 2010. – Vol. 52, No. 4. – P. 1066–1068.
17. Techniques for improving the high-frequency performance of the planar CM EMI filter / H.F. Huang, L.Y. Deng, B.J. Hu, G. Wei // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – Oct. 2013. – Vol. 55, No. 5. – P. 901–908.
18. Chen W. An experimental study of common and differential-mode active EMI filter compensation characteristics / W. Chen, W. Zhang, X. Yang et al. // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 2009. – Vol. 51, No. 3. – P. 683–691.
19. Murata Y. Analysis of parasitic couplings in EMI filters and coupling reduction methods. / Y. Murata, K. Takahashi, T. Kanamoto, M. Kubota // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – December 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 1880–1886.
20. Chen R. Improving the characteristics of integrated EMI filters by embedded conductive layers. / R. Chen, J.D.V. Wyk, S. Wang et al. // IEEE Trans. Power Electron. – 2005. – Vol. 20, No. 30. – P. 611–619.
21. Wolmarans P.J. Technology for integrated RF-EMI transmission line filters for integrated power electronic modules. / P.J. Wolmarans, J.D. Van Wyk, J.D.Jr. Van Wyk, et al. // IEEE Industry Applications Conf. 37th IAS Annual Meeting. – Pittsburgh, PA, USA. – 2002. – Vol. 3. – P. 1774–1780.
22. Power electronic interconnects: skin- and proximity effect-based frequency selective multipath propagation. / J.D.Jr. van Wyk, W.A. Cronje, J.D. van Wyk, et al. // IEEE Trans. Power Electron. – 2005. – Vol. 20, No. 3. – P. 600–610.
23. Ouyang Z. Overview of planar magnetic technology-fundamental properties / Z. Ouyang, M.A.E Andersen // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – Vol. 29, No. 9. – P. 4888–4900.
24. Brink E.A. Aspects of electromagnetic field distributions in multipath conductive structures: Dissertation, University of Witwatersrand. – Johannesburg, South Africa, 2011.
25. Brink E.A. Analytical approach for determining the frequency-dependent characteristics of multipath conductive structures / E.A. Brink, I.W. Hofsaier // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – Vol. 29, No. 11. – P. 5835–5845.
26. Biela J. Passive and active hybrid integrated EMI filters / J. Biela, A. Wirthmueller, R. Waespe et al. // IEEE Trans. Power Electron. – 2009. – Vol. 24, No. 5. – P. 1340–1349.
27. Jong E.D. Improving the thermal management of ACDC converters using integration technologies / E.D. Jong, J. Ferreira, P. Bauer // Proc. IEEE Industry Applications Conf. – Seattle, WA, USA. – October 2004. – Vol. 4. – P. 2315–2322.
28. Brink E.A. Analytical approach for determining the frequency-dependent characteristics of multipath conductive structures / E.A. Brink, I.W. Hofsaier // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – Vol. 29, No. 11. – P. 5835–5845.
29. Racasan A. Advances on parasitic capacitance reduction of EMI filters / A. Racasan, C. Munteanu, V. Topa et al. // Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series. – 2010. – No. 34.

Собко Александр Александрович
Аспирант каф. ТУ, м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУР
Эл. почта: alexfreetibet@gmail.com

УДК 004.414

А.А. Собко, А.В. Осинцев

Лабораторный макет датчика тока и напряжения на отечественном микроконтроллере K1986BE92Q1

Предложен лабораторный макет датчика для измерения тока и напряжения в силовой шине электропитания на основе отечественного микроконтроллера серии 1986BE9х. Представлена разработанная схема лабораторного макета датчика тока и напряжения, предназначенного для тестирования алгоритмов и отладки программного кода микроконтроллера, и может быть применима к силовой шине электропитания постоянного тока. Разработанный код выполняет обработку сигналов тока и напряжения двумя независимыми аналого-цифровыми преобразователями микроконтроллера. Вычисленные показания тока и напряжения передаются по интерфейсу универсального асинхронного приемопередатчика на персональный компьютер, либо на другое вычислительное устройство посредством прямого доступа к памяти, что снижает вычислительные затраты микроконтроллера.

Ключевые слова: датчик тока, датчик напряжения, макет, программное обеспечение, АЦП, микроконтроллер.

Важной частью современных приборов и промышленного оборудования является система электропитания, реализуемая средствами силовой электроники. Большая часть прецизионной электроники нуждается в контроле питающего напряжения. Некачественные параметры электроэнергии источников питания приводят к снижению качества работы и выходу из строя дорогостоящего оборудования. С целью контроля качества электропитания и отслеживания определенных параметров электроэнергии источников питания широко применяются аналоговые датчики тока и напряжения, сигнал с которых поступает в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) микроконтроллера (МК). Существует множество различных схем типовых датчиков тока и напряжения [1, 2]. Они различаются точностью, методом реализации, пределами измеряемой амплитуды. В то же время возможность обеспечения заданных требований к параметрам системы электропитания в значительной степени зависит от эффективности применяемых алгоритмов управления, параметров АЦП, характеристик операционного усилителя и паразитных параметров схемы.

Вопросы, связанные с разработкой комбинированных датчиков тока и напряжения, решаются в работах с применением схемотехнического анализа решения и результатов численного моделирования [2]. Экспериментальные макеты для систем измерения напряжения рассматриваются в [3, 4]. Описан лабораторный макет датчика тока и напряжения, в основу которого положена традиционная схема для измерения тока в отрицательном полюсе нагрузки [1]. Макет предназначен для экспериментальных исследований систем управления, в частности, для (разработки, моделирования) новых алгоритмов на базе отечественного МК K1986BE92Q1 с ядром Cortex-M3 [5].

Измерение силы тока в силовых цепях является необходимым условием надежного функционирования, так как точные измерения необходимы для осуществления контроля и защиты. Специализированные датчики также применяются для определения разбаланса токов, мониторинга и диагностики цепей, запуска схем защиты, обнаружения отказов электрооборудования и аварийных состояний различных типов нагрузки. Существует множество методов измерения тока, однако в промышленности наиболее широко применяются резистивный на основе эффекта Холла и трансформатора тока. Последний может быть использован только в цепях переменного тока [1]. Резистивные датчики отличаются низкой стоимостью, линейностью и точностью измеряемой величины. Однако измерения с их помощью, вносят потери в цепь измерения, отсутствует гальваническая развязка, ограничена полоса пропускания за счет паразитной индуктивности резисторов. А также возникает саморазогрев и термоЭДС, снижающие точность измерения при больших токах. Для усиления напряжения, падающего на шунтирующем резисторе, необходим дифференци-

альный усилитель или компаратор, обладающий достаточным коэффициентом ослабления синфазного сигнала (КОСС), особенно вблизи высоких питающих напряжений.

Ведется разработка лабораторного макета датчика тока и напряжения силовой шины электропитания (СШЭП) постоянного тока. В качестве вычислительного устройства используется отечественный МК K1986BE92Q1. Данный МК выполнен на базе ядра Cortex-M3. Особенности реализации данного МК выделяют его среди аналогов.

Таким образом, возникает потребность в разработке лабораторного макета датчика тока и напряжения, используя отечественную электронную компонентную базу (ЭКБ), что снизит зависимость от зарубежной ЭКБ.

Цель работы – разработать лабораторный макет датчика тока (до 30 А) и напряжения (до 110 В), используя отечественный МК K1986BE92Q1.

Аппаратная часть

В схеме (рис. 1) использован вариант измерения тока в отрицательном полюсе нагрузки. Такой способ имеет преимущества, связанные с возможностью использования операционных усилителей (ОУ), предназначенных для работы с однополярным питанием. При этом выбор ОУ определяется от требуемой точностью, которая в основном зависит от смещения нуля, температурного дрейфа и погрешности установки усиления ОУ. Недостатком является ненулевое значение минимального выходного напряжения усилителя, что вносит погрешность преобразования в начале шкалы измерения. Для исключения этого недостатка требуется двуполярное питание усилителя, однако это усложнит схему и её питание. Используемая схема измерения тока и напряжения (см. рис. 1) отличается наличием на входе ОУ, синфазного дросселя Др1, предназначенного для повышения КОСС. Схема предусматривает возможность настройки коэффициента отрицательной обратной связи (ООС) ОУ резистором R5.

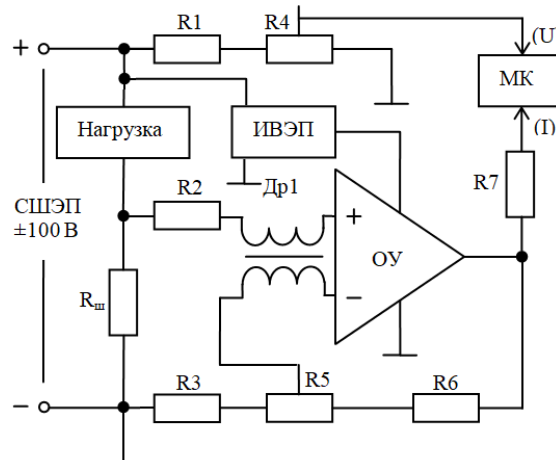


Рис. 1. Схема измерителя тока и напряжения для лабораторного макета

Для измерения напряжения присутствует делитель напряжения (R1, R4) с возможностью под-

стройки коэффициента деления, в зависимости от которого меняется уровень напряжения, поступающего на вход АЦП МК, что необходимо для точной настройки датчика напряжения. Измерение тока производится в отрицательном полюсе нагрузки посредством измерения падения напряжения на токоизмерительном резисторе $R_{ш} = 0,1$ Ом с последующим усилением полученного значения и передачей на вход АЦП МК через $R7$. Для проверки работоспособности схемы на макетной плате собран прототип измерителя.

Структурная схема лабораторного макета приведена на рис. 2. Измеренный аналоговый сигнал с датчика тока и напряжения обрабатывается соответствующим блоком АЦП1 и АЦП2. В блоках «Расчет I», и «Расчет U» рассчитываются преобразованные данные с учетом коэффициентов калибровки и корректировки параметров измеряемого тока и напряжения. Рассчитанные данные передаются по интерфейсу универсального асинхронного приемопередатчика (УАПП), используя блок прямого доступа к памяти (ПДП), который выполняет функцию передачи данных, не затрачивая вычислительные ресурсы МК (процессорное время ядра МК). Созданный прототип показал возможность измерения постоянного напряжения до 40 В и тока до 10 А.

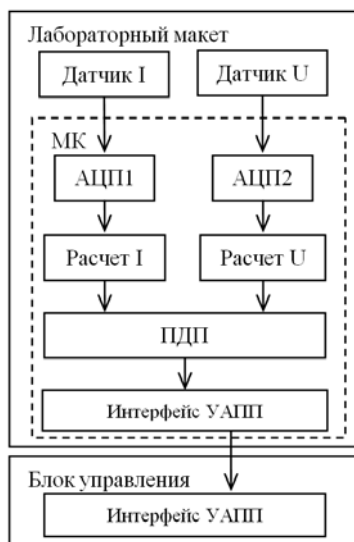


Рис. 2. Структура лабораторного макета

Программная часть

Выполнено сравнение отечественного МК K1986BE92Q1 характеристик и зарубежного аналога МК STM32F103C8 (таблица).

Характеристики МК

МК	F_{clk} , МГц	ADC, бит	Flash, Кб
K1986BE92Q1	80	12	32
STM32F103C8	72	12	64

Оба МК имеют ядро Cortex-M3 и обладают схожими аппаратными характеристиками. Операцию (функцию) преобразования сигналов (обработку данных) с датчиков тока и напряжения выполняет МК K1986BE92Q1. Выход датчика тока подключен к

АЦП1 канал ADC_CH_2, а выход датчика напряжения подключен к АЦП2, канал ADC_CH_3.

Программный код написан и отлажен в среде «Keil uVision 5» с использованием официальных библиотек CMSIS и SPL. В выбранных МК для преобразования в АЦП требуется не менее 28 тактов синхронизации F_{CLK} . В качестве синхросигнала может быть выбрана частота процессора CPU_CLK либо частота тактирования ADC_CLK, формируемая в блоке «Сигналы тактовой частоты». Максимальная частота F_{CLK} для блока АЦП не может превышать 14 МГц.

В целях снижения энергопотребления МК и уменьшения объема кода часто используют один блок АЦП для преобразования сигналов с двух и более каналов посредством мультиплексора. Поочередный опрос преобразования аналогового сигнала нескольких каналов АЦП приводит к частичному пропуску измеряемых данных. Пока обрабатываются данные с одного канала АЦП, данные, поступающие на другой канал АЦП, не учитываются. При разработке программного кода были задействованы два блока АЦП, что позволяет настроить дополнительные параметры работы для каждого канала в отдельности, например, задать верхний и нижний пороги значений амплитуды преобразованного сигнала и в случае их превышения своевременно обработать это исключение.

В качестве исходных данных в коде программы задаются коэффициенты делителя напряжения и датчика тока, используемые при вычислении. В качестве платы прототипа для быстрой отладки и тестирования алгоритма выбрана плата Arduino Mega. После проверки корректности работы алгоритма на платформе Arduino он был реализован под МК K1986BE92Q1 и STM32F103C8 (рис. 3).

Разработка программного кода по составленному алгоритму состояла из идентичных этапов, в частности, процедура инициализации АЦП и настройка каналов на практике не отличаются, поскольку разработчики МК K1986BE92Q1 адаптировали библиотеки от производителя STM32, изменив названия некоторых функциональных блоков периферии МК. Одной из особенностей работы АЦП у всей линейки МК 1986BE9x является то, что регистр ADCx_RESULT помимо результата преобразования АЦП в 16–20 битах, содержит номер канала АЦП, с которого поступили данные. Чтобы получить только результат преобразования без номера канала, рекомендуется применить маску $ADC1_RESULT \& 0x0000FFFF$. После данной операции данные готовы для передачи в блок управления для их последующей обработки посредством одного из интерфейсов передачи данных, поддерживаемых МК.

На рис. 4 представлен фрагмент кода, заполненная структура ADC_InitTypeDef, для настройки АЦП в STM32F103C8, используя библиотеку CMSIS.

В библиотеке CMSIS МК K1986BE92Q1 за настройку АЦП отвечают две структуры: ADC_InitTypeDef и ADCx_InitTypeDef (рис. 5).

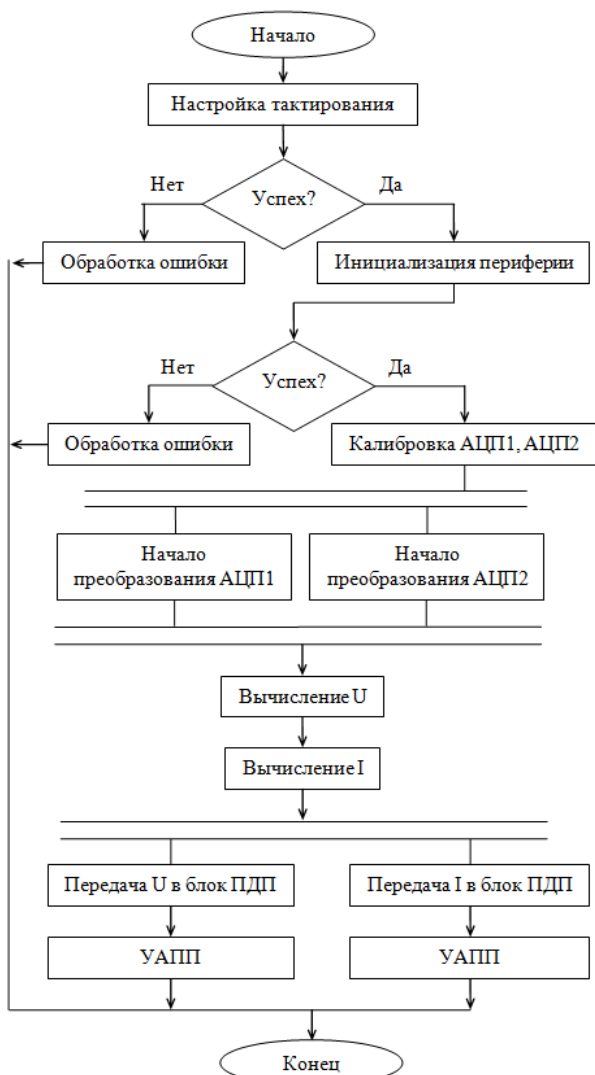


Рис. 3. Алгоритм работы программы МК

```

/* настройка АЦП 1 STM32F103C8 */
ADC_InitStructure.ADC_Mode = ADC_Mode_Independent;
ADC_InitStructure.ADC_ScanConvMode = DISABLE;
ADC_InitStructure.ADC_ContinuousConvMode = ENABLE;
ADC_InitStructure.ADC_ExternalTrigConv = ADC_ExternalTrigConv_None;
ADC_InitStructure.ADC_DataAlign = ADC_DataAlign_Right;
ADC_InitStructure.ADC_NbrOfChannel = 1;
    
```

Рис. 4. Структура ADC_InitTypeDef для STM32

```

/* настройка канала ADC_CH_ADC2 и ADC1 */
ADCx_StructInit(&sADCx);
sADCx.ADC_ClockSource = ADC_CLOCK_SOURCE_CPU;
sADCx.ADC_SamplingMode = ADC_SAMPLING_MODE_CICLIC_CONV;
sADCx.ADC_ChannelSwitching = ADC_CH_SWITCHING_Disable;
sADCx.ADC_ChannelNumber = ADC_CH_ADC2;
sADCx.ADC_Channels = 0;
sADCx.ADC_LevelControl = ADC_LEVEL_CONTROL_Disable;
sADCx.ADC_LowLevel = 0;
sADCx.ADC_HighLevel = 0;
sADCx.ADC_VRefSource = ADC_VREF_SOURCE_INTERNAL;
sADCx.ADC_IntVRefSource = ADC_INT_VREF_SOURCE_INEXACT;
sADCx.ADC_Prescaler = ADC_CLK_div_512;
sADCx.ADC_DelayGo = 7;
ADC1_Init(&sADCx);
ADC1_Cmd(ENABLE);

/* настройка АЦП */
sADC.ADC_SynchronousMode = ADC_SyncMode_Independent;
sADC.ADC_StartDelay = 0;
sADC.ADC_IntVRefTrimming = 1;
ADC_Init(&sADC);
    
```

Рис. 5. Структура ADCx_StructInit

Таким образом, разработана схема и выполнена сборка лабораторного макета датчика тока и напряжения, а также реализован алгоритм расчета напряжения и тока. Разработано тестовое ПО в среде «Keil uVision 5». Выполнено тестирование ПО и выполнены контрольные измерения тока и напряжения лабораторным макетом на МК STM32F103C8, отладочном комплекте МК K1986VE92QI компании АО «ПКК Миландр» и LDM-BB-K1986VE92QI компании «LDM-SYSTEMS».

В статье рассматривается лабораторный макет датчика тока и напряжения, разработанный для использования в составе силовой шины электропитания. Представлена разработанная схема лабораторного макета датчика тока и напряжения, предназначенного для тестирования алгоритмов и апробации программного кода для микроконтроллерного устройства, применимого к модулям силовой шины электропитания и климатической экранированной ТЕМ-камеры. Разработанное ПО обеспечивает настройку двух блоков АЦП микроконтроллера и выполняют обработку сигналов с датчика тока и напряжения, лабораторного макета. Результаты обработки двух АЦП передаются по УАПП, не затрачивая вычислительные ресурсы микроконтроллера, что достигается за счет использования прямого доступа к памяти. Результаты измерений передаются по интерфейсу УАПП на ПК либо на другое вычислительное устройство, поддерживающее интерфейс УАПП, либо устройство виртуального СОМ-порта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

Литература

1. Данилов А. Современные промышленные датчики тока // Современная электроника. – 2004. – № 10. – С. 26–35.
2. Гончаров Р.А. Методы повышения точности измерения малых токов / Р.А. Гончаров, Н.В. Штгель // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 1, № 13. – С. 448–450.
3. Якимов Р.И. Стенд для экспериментальных исследований систем управления преобразователем Кука / Р.И. Якимов, Е.А. Аксенов // Сб. науч. тр. Новосиб. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 4(86). – С. 131–143.
4. Шульга Р.Н. Измерение токов и напряжений на высоком потенциале с помощью цифровых датчиков / Р.Н. Шульга, К.А. Змиева и др. // Электричество. – М. – 2012. – № 12. – С. 13–17.
5. K1986VE92QI [Электронный ресурс]. – URL: https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protessory/32_razryadnye_mikrokontrollery/1986ve9kh_yadro_arm_cort_ex_m3/k1986ve92qi/#main_tab

Собко Александр Александрович
 Аспирант, м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРа
 Эл. почта: alexfreetibet@gmail.com

Осинцев Артем Викторович
 Аспирант, м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРа
 Эл. почта: kubenet@gmail.com