

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 681.3

doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-6

## ИМПУЛЬСНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ ВРЕМЕНИ ПЕРЕЗАРЯДА МДП-СТРУКТУРЫ

Ф. А. Бобылев<sup>1</sup>, Д. А. Ташлинцев<sup>2</sup>, В. М. Чайковский<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> radiolokaci@yandex.ru, <sup>3</sup> rtech@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Задача выпуска быстродействующих полупроводниковых элементов неразрывно связана с применением МДП-структур (металл-диэлектрик-полупроводник), используемых в качестве основы для данных элементов, обладающих слабо выраженными релаксационными свойствами. *Материалы и методы.* Для измерения постоянной времени экспоненциальной составляющей импульсного напряжения используется метод «двух засечек», реализуемый с помощью управляемого аналого-цифрового преобразователя, входящего в состав микроконтроллера (МК). Текущие выборки, кроме самой первой, амплитуды напряжения экспоненциальной формы, получаемые на выходе аналого-цифрового преобразователя, после масштабирования с коэффициентом 2,72, сравниваются схемой совпадения кодов (ССК) с результатом первоначальной выборки. При совпадении сравниваемых кодов ССК формирует сигнал единичного уровня, переводящий триггер в нулевое состояние, находящийся до этого в единичном состоянии под воздействием сигнала первой выборки. В результате чего на выходе триггера будет сформирован интервал времени, равный по значению постоянной времени экспоненциального напряжения. *Результаты.* Построение измерителя на базе МК позволяет реализовать достаточно универсальный измеритель времени перезаряда МДП-структуры, напряжение реакции которой на внешнее импульсное воздействие будет иметь в своем составе экспоненциальную составляющую не спадающего вида, а нарастающего. Здесь также следует использовать метод «двух засечек», но при этом уже требуется рассматривать отношение последующей выборки амплитуды экспоненциальной составляющей входного напряжения к первоначальной выборке. *Выводы.* Использование в измерителе МК, содержащего в составе управляемый аналого-цифровой преобразователь, осуществляющий операции выборки через заданные промежутки времени, за счет уменьшения значения последних может осуществлять оценку значения постоянной времени экспоненциальной составляющей напряжения реакции МДП-структуры на внешнее воздействие, а значит, оценивать релаксационные свойства последней с высокой точностью.

**Ключевые слова:** МДП-структура, микроконтроллер, релаксационные свойства, схема совпадения кодов, управляемый аналого-цифровой преобразователь, выборка, триггер

**Для цитирования:** Бобылев Ф. А., Ташлинцев Д. А., Чайковский В. М. Импульсный измеритель на микроконтроллере времени перезаряда МДП-структуры // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 46–52. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-6

## PULSE METER ON THE MICROCONTROLLER OF THE RECHARGE TIME OF THE TIR STRUCTURE

F.A. Bobylev<sup>1</sup>, D.A. Tashlintsev<sup>2</sup>, V.M. Chaykovskiy<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> radiolokaci@yandex.ru, <sup>3</sup> rtech@pnzgu.ru

**Abstract. Background.** The task of producing high-speed semiconductor elements is inextricably linked with the use of MD structures used as the basis for these elements with weakly pronounced relaxation properties. *Materials and methods.* To measure the time constant of the exponential component of the pulse voltage, the «two-serif» method is used, implemented using a controlled ADC included in the microcontroller (MC). The current samples, except for the very first one, are the exponential voltage amplitudes obtained at the ADC output, after scaling by a factor of 2.72, the code matching scheme (CSC) is compared with the result of the initial sample. When the compared codes coincide, the SSC generates a single-level signal, which converts the trigger (Tg) to the zero state, which was previously in a single state under the influence of the signal of the first sample. As a result, a time interval equal in value to the time constant of the exponential voltage will be formed at the output of the Tg. *Results.* The construction of a meter based on MK makes it possible to implement a fairly universal meter of the recharge time of the TIR structure, the reaction voltage of which to an external impulse action will have an exponential component in its composition, not of a decreasing type, but of an established one. The «two-serif» method should also be used here, but it is already necessary to consider the ratio of the subsequent sampling of the amplitude of the exponential component of the input voltage to the initial sample. *Conclusions.* The use of an MC in a meter containing a controlled ADC that performs sampling operations at specified time intervals, by reducing the value of the latter, can estimate the value of the time constant of the exponential component of the stress of the reaction of the TIR structure to external influences, and therefore evaluate the relaxation properties of the latter, with high accuracy.

**Keywords:** TIR structure, microcontroller, relaxation properties, code matching scheme, controlled ADC, sampling, trigger

**For citation:** Bobylev F.A., Tashlintsev D.A., Chaykovskiy V.M. Pulse meter on the microcontroller of the recharge time of the tir structure. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):46–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-6

### Введение

В ходе исследования электрофизических свойств МДП-структур (рис. 1, а) одними из важнейших ее параметров, определяющими частотные свойства различных элементов, изготавливаемых на базе данной структуры, являются ее релаксационные свойства, проявляемые структурой в области ее пространственного заряда, поэтому оценка данных свойств весьма важна и имеет огромное значение при разработке технологии производства элементов полупроводниковой техники. В свою очередь, эти свойства определяются скоростью перезаряда в данной области поверхностных состояний полупроводниковой части структуры. При этом скорость процесса перезаряда, по сути, является постоянной времени  $\tau = RC_2$  перезаряда всей МДП-структуры, строение которой и ее эквивалентная схема соответственно приведены на рис. 1, а, б [1, 2].

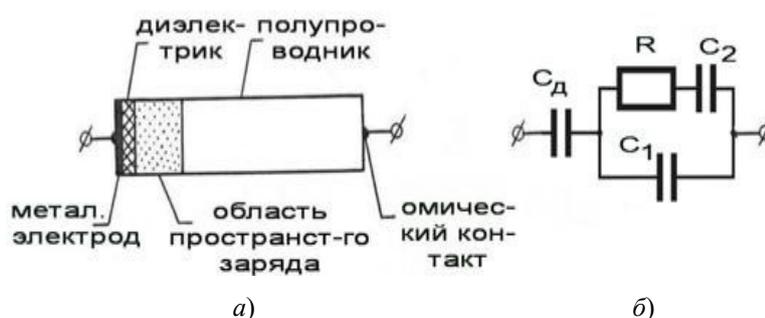


Рис. 1. Скорость процесса перезаряда:  
а – МДП-структура; б – эквивалентная схема

Согласно строению структуры ее эквивалентная схема непременно должна иметь емкости  $C_d$  и  $C_1$ , обусловленные как диэлектрическим слоем, так и полупроводниковым, а также  $R$ ,  $C_2$  характеризующие релаксационные свойства области пространственного заряда структуры.

Методика оценки параметров МДП-структуры к настоящему времени достаточно хорошо развита [3], причем с более углубленной оценкой значений характерных свойств структуры. Достигается это тем, что реакция последней на внешнее воздействие измерительным сигналом в виде скачка напряжения отображается усложненной эквивалентной схемой, более подробно отражающей те или иные свойства структуры. Работа устройств, предложенных и подробно рассмотренных в работе [3], в основном базируется на использовании ряда аналоговых операций над сигналом реакции МДП-структуры, помещенной в измерительную схему (ИС), на сигнал внешнего импульсного воздействия, что позволяет по значению постоянной времени переходного процесса в ИС судить о релаксационных свойствах МДП-структуры.

Предлагается оценку времени релаксации области пространственного заряда структуры осуществлять с помощью импульсного измерителя, реализованного на базе микроконтроллера МК.

### Постановка задачи

В основе предлагаемого импульсного измерителя лежит один из приемов инвариантного измерения параметров электрических цепей, когда каждому параметру цепи соответствует амплитуда той или иной составляющей сложного импульсного напряжения [4]. Метод «двух засечек» был предложен А. И. Мартяшиным и был хорошо развит в различных работах многочисленных учеников его научной школы. Суть метода заключается в том, что выходное напряжение ИС в зависимости от характера ее построения будет иметь в своем составе импульсную составляющую в виде спадающей экспоненты (рис. 2), являющейся входным напряжением измерителя  $U_{вх}(t)$ , и как только отношение амплитуд, сделанных двух выборок экспоненциального напряжения, совпадет со значением основания натурального логарифма  $e = 2,72$ , то длительность интервала времени между моментами производства данных выборок входного напряжения, считается равной значению постоянной времени экспоненциальной составляющей входного напряжения.

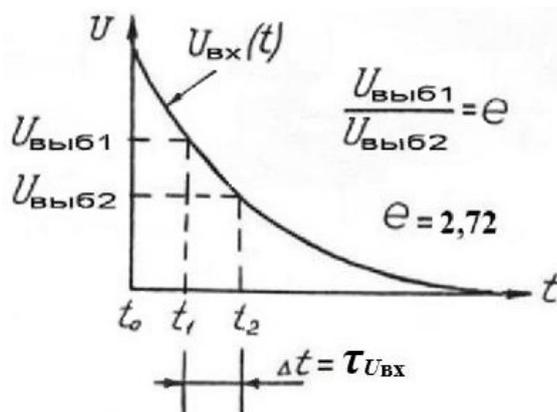


Рис. 2. Вид спадающей экспоненты

Теперь вся задача сводится к организации у напряжения  $U_{вх}(t)$  этих двух выборок, особенно последующих после первой, которые следует проводить до тех пор, пока отношение амплитуды первой выборки к амплитуде последующей не станет равняться основанию натурального логарифма, с последующей подачей на выход интервала времени, получившегося между моментами проведения этих выборок и формируемого триггером.

### Решение задачи

Для упрощения решения данной задачи предлагается значение амплитуды каждой выборки, последующей за первой и представляющей собой кодовую комбинацию, пропускать через масштабный преобразователь, умножающий данное кодовое представление амплитуды напряжения выборки на коэффициент 2,72. Необходимо подчеркнуть, что начало измерения происходит по отношению момента времени  $t_0$  с неким запаздыванием, специально устанавливаемым программным путем и равным 0,5 мкс. Затем полученный результат в виде измененной кодовой последовательности поступает на один из входов схемы сравнения кодов, на другой вход которой постоянно поступает кодовая комбинация с выхода аналого-цифрового преобразователя (АЦП), получаемая после обработки амплитуды первой выборки входного напряжения. Как только схема сравнения кодов зафиксирует момент их равенства, она сформирует сигнал, меняющий состояние триггера на противоположное, находящегося под действием сигнала первой выборки входного напряжения в единичном состоянии. Данное изменение состояний триггера формирует на выходе интервал времени, равный значению постоянной времени входного напряжения  $U_{вх}(t)$ , определяемого релаксационными свойствами МДП-структуры.

Следует заметить, что в зависимости от характера построения ИС, в которой осуществляется воздействие импульсным сигналом на МДП-структуру, реакция последней может иметь вид как спадающей экспоненты вида  $U_{вх}(t) = U_0 e^{-t/\tau}$  (рис. 2), так и возрастающей экспоненты вида  $U_{вх}(t) = U_0(1 - e^{-t/\tau})$  (рис. 3) [3].

При этом характер работы измерителя, согласно ранее описанному алгоритму, немного изменится, а именно: ССК уже будет сравнивать кодовую комбинацию значения последующей выборки амплитуды входного напряжения с кодовой комбинацией первой выборки (рис. 3), прошедшей через масштабный преобразователь, масштабирующий данное кодовое представление амплитуды напряжения выборки на коэффициент 2,72, а остальная работа измерителя не меняется. Данное изменение алгоритма работы измерителя происходит путем перевода переключателя (П) из одного положения в другое, а именно: из положения «Спад.» в положение «Возр.» либо наоборот.

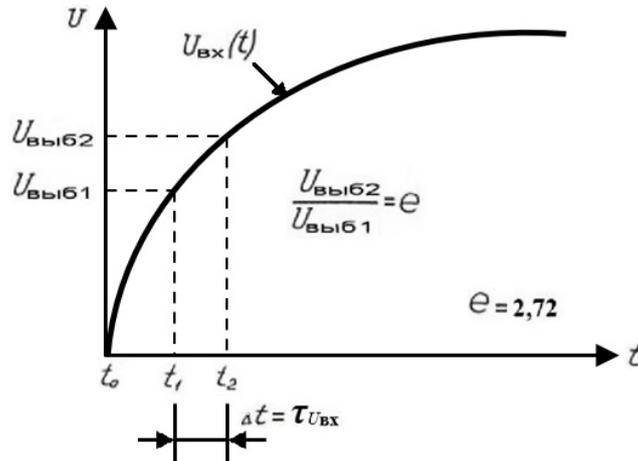


Рис. 3. Вид возрастающей экспоненты

На рис. 4 приведена структура алгоритма работы микроконтроллера, реализующего описанную выше методику, а на рис. 5 – принципиальная электрическая схема измерителя.

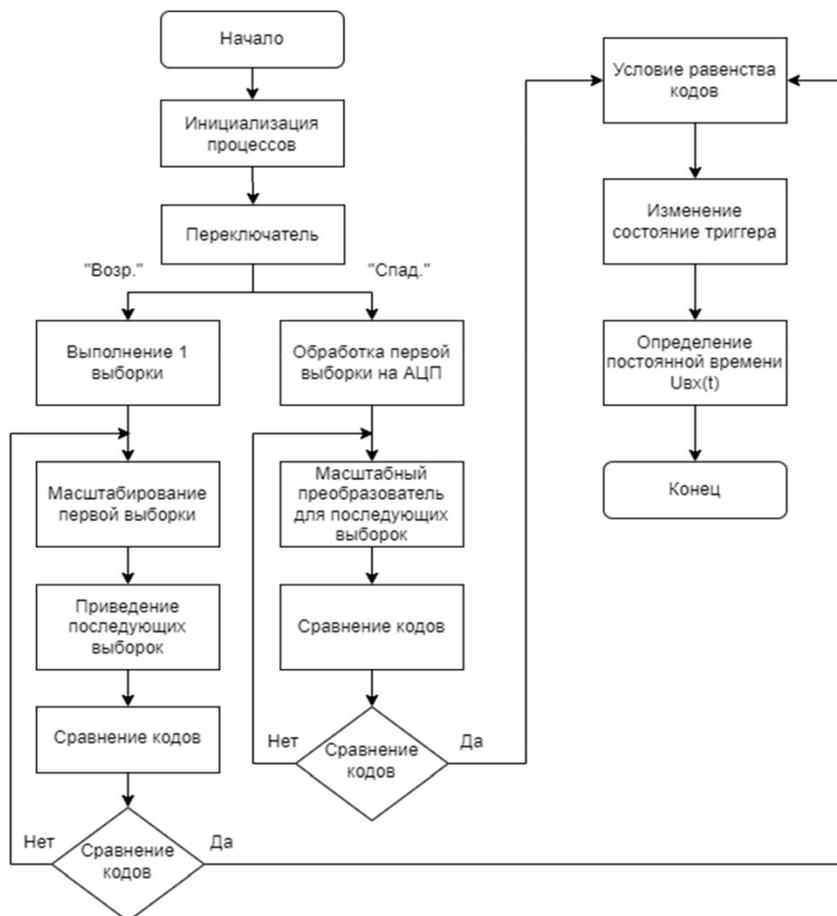


Рис. 4. Блок-схема алгоритма работы измерителя

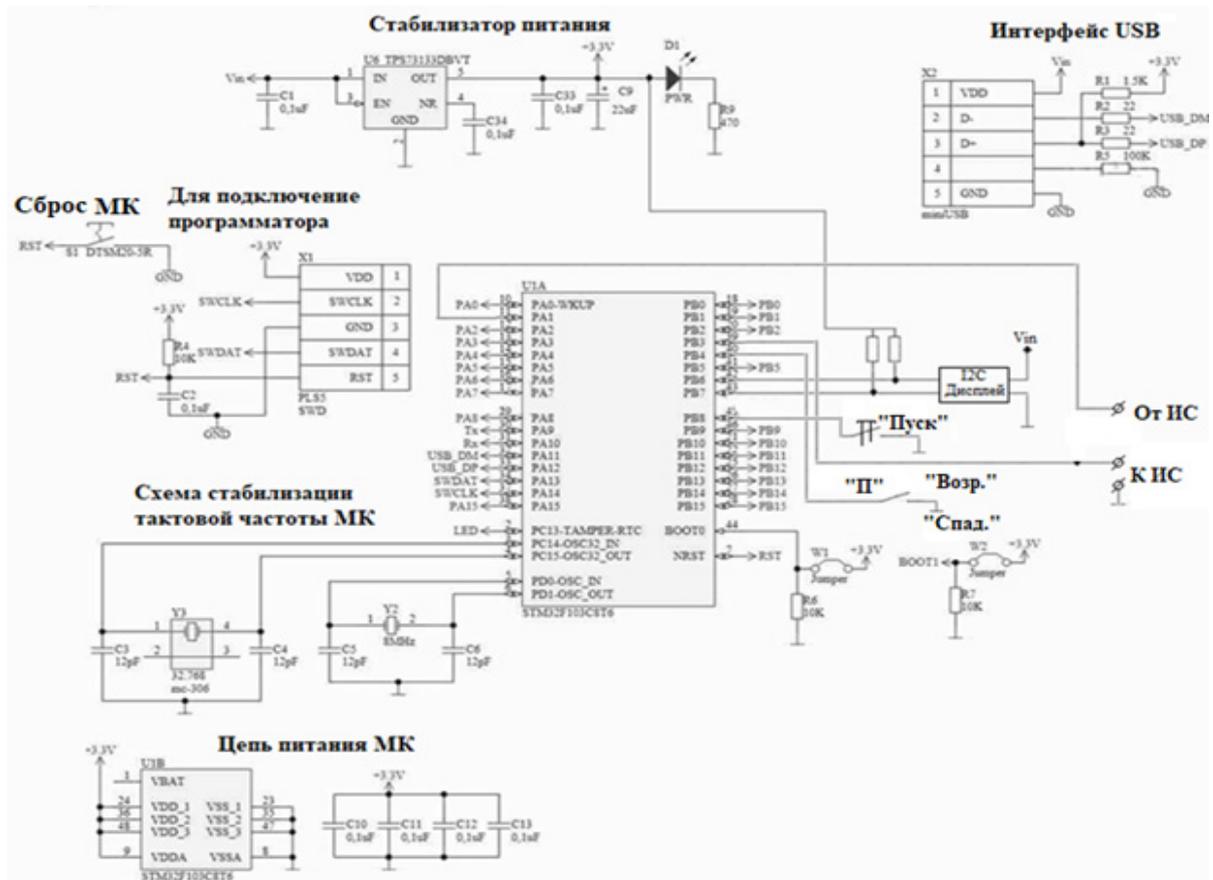


Рис. 5. Принципиальная схема измерителя

Функционирование алгоритма происходит следующим образом.

На предварительном этапе при помощи программатора ST-Link v2 [5] осуществляется занесение (прошивка) в память МК программы его работы. В зависимости от вида напряжения  $U_{вх}(t)$  переключатель П устанавливается оператором в соответствующее положение «Спад.» либо «Возр.».

Далее микроконтроллер инициализирует параметры для измерения, такие как начальные состояния триггеров, настройки АЦП и тактирование.

#### *Алгоритм работы в режиме «Спад.»*

Проводится первая выборка амплитуды экспоненциальной составляющей входного напряжения и перевод им триггера в единичное состояние, с дальнейшей подачей на один из входов ССК кодовой комбинации, сформированной АЦП из данной выборки.

Каждая последующая выборка амплитуды экспоненциальной составляющей входного напряжения, осуществляемая АЦП, масштабируется с коэффициентом 2,72, и уже в виде кодовой комбинации подается на другой вход ССК.

ССК осуществляет сравнение кодовых комбинаций промасштабированных выборок с кодовой комбинацией первой выборки. Если комбинации не совпадают, процесс выборок продолжается; если совпадают, то ССК формирует сигнал единичного уровня, который переводит триггер в нулевое состояние, тем самым на выходе последнего формируется временной интервал, значение которого в виде окончательной оцифровки выводится на дисплей, что свидетельствует об окончании процесса измерения.

#### *Алгоритм работы в режиме «Возр.»*

Проведение первой выборки амплитуды входного напряжения, установка триггера в единичное состояние, амплитуда данной выборки масштабируется с коэффициентом 2,72 и в виде сформированной АЦП кодовой комбинации поступает на один из входов ССК.

АЦП производит дальнейшие выборки амплитуды экспоненциальной составляющей входного напряжения, и в виде сформированной АЦП кодовой комбинации каждой из них они поступают на другой вход ССК.

Срабатывание ССК и вся дальнейшая работа происходят аналогично режиму «Спад».

### *Описание принципиальной схемы измерителя*

Практическая реализация описанного метода измерения постоянной времени МДП-структуры осуществляется на базе микроконтроллера STM32F103C8T6 [6, 7], который является одним из самых широко распространенных в своем классе, широко используемым в различных приложениях, особенно при измерении и обработке сигналов. Он также оснащен встроенными аналогово-цифровыми преобразователями с высоким разрешением (12 бит), что делает его подходящим для задач, связанных с обработкой аналоговых сигналов, для четкой работы МК в плане стабилизации его тактовой частоты и увеличения точности оценки периодов времени. МК снабжен двумя кварцевыми резонаторами HC-49SM и MC-306 соответственно на 8 и 32 МГц. Для связи с персональным компьютером используется интерфейс USB, через который также плата питается напряжением 5В. На плате имеется интерфейс программирования отладки SDIO/JTAG, к которому подключается программатор ST-Link v2 [5]. Кнопка «Сброс» осуществляет сброс (перезагрузку) МК. Для питания МК используется стабилизатор напряжения 3.3 В, реализованный на базе микросхемы TPS73133DBVT. Для подключения к входам/выходам МК используются выводы GPIO. О начале работы измерителя свидетельствует свечение светодиода VD1 типа SMD 0402.

Маркировка разъемов PA0-PA15, PB0-PB15, предназначенных для подключения GPIO сделана в соответствии с маркировкой выводов, приведенной в документацию на используемый МК. С вывода PB4 на ИС подается импульсный сигнал прямоугольной формы «малой амплитуды», действующий на МДП-структуру, находящуюся в составе ИС. Осуществляемые встроенным АЦП выборки выходного напряжения ИС МК снимает с вывода PA1. К выводу PB8 подключена кнопка, при нажатии которой начинается процесс измерения. Для изменения характера алгоритма измерения к выводу PB3 подключен переключатель «П», от нахождения которого соответственно в положении «Спад» или «Возр.» будет меняться логический уровень (ноль или единица) на данном входе, что приведет к выбору нужной программы обработки сигнала с выхода ИС, а следовательно, и метода измерения времени релаксации МДП-структуры. Выводы PB6 и PB7 работают на шину I2C, по которой для отображения полученного результата оценки значения  $\tau U_{\text{вх}}$  он выводится на дисплей SSD1306.

### *Заключение*

Построение измерителя на базе микроконтроллера позволяет при достаточно незначительных размерах, ограниченных буквально одной типовой платой, и сравнительно ограниченном количестве доступных элементов получить универсальный измеритель, который позволяет оценить релаксационные свойства МДП-структуры, реакция которой на импульсное воздействие в зависимости от построения ИС может иметь характер как спадающей, так и возрастающей экспоненты.

### *Список литературы*

1. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. / пер с англ. под ред. Р. А. Суриса. М. : Мир, 1984. Кн. 1. 456 с.
2. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие. М., 2005. 492 с.
3. Чайковский В. М. Измерители параметров МДП-структур на несинусоидальном токе : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 1996. 222 с.
4. Мартяшин А. И., Шахов Э. К., Шляндин В. М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. М. : Энергия, 1976. 392 с.
5. User manual: ST-LINK/V2 in-circuit debugger/programmer for STM8 and STM32. URL: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00026748-stlinkv2-incircuit-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stm](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00026748-stlinkv2-incircuit-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stm)
6. STM32F103C8T6 Reference manual. URL: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/rm0008-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0008-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf)
7. Мортон Дж. Микроконтроллеры AVR. М., 2006. 273 с.

## References

1. Zi S.M. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov / per s angl. pod red. R.A. Surisa: v 2 kn. = Physics of semiconductor devices / translated from English. edited by R. A. Suris : in 2 books.* Moscow: Mir, 1984;Bk.1:456. (In Russ.)
2. Gurtov V.A. *Tverdotel'naya elektronika: ucheb. posobie = Solid-state electronics : textbook.* Moscow, 2005:492. (In Russ.)
3. Chaykovskiy V.M. *Meters of parameters of MDP structures on non-sinusoidal current.* PhD dissertation. Penza, 1996:222. (In Russ.)
4. Mart'yashin A.I., Shakhov E.K., Shlyandin V.M. *Preobrazovateli elektricheskikh parametrov dlya sistem kontrolya i izmereniya = Converters of electrical parameters for monitoring and measurement systems.* Moscow: Energiya, 1976:392. (In Russ.)
5. *User manual: ST-LINK/V2 in-circuit debugger/programmer for STM8 and STM32.* Available at: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00026748-stlinkv2-incircuit-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stm](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00026748-stlinkv2-incircuit-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stm)
6. *STM32F103C8T6 Reference manual.* Available at: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/rm0008-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0008-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf)
7. Morton Dzh. *Mikrokontrollery AVP = AVR microcontrollers.* Moscow, 2006:273. (In Russ.)

## Информация об авторах / Information about the authors

**Федор Алексеевич Бобылев**

инженер-электронщик кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: radiolokaci@yandex.ru

**Fedor A. Bobylev**

Electronics engineer of the sub-department  
of radio engineering and radio electronic systems,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Дмитрий Александрович Ташлинцев**

инженер кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: radiolokaci@yandex.ru

**Dmitry A. Tashlintsev**

Engineer of the sub-department  
of radio engineering and radio electronic systems,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Виктор Михайлович Чайковский**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Victor M. Chaykovskiy**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of radio engineering and radio electronic  
systems, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 25.09.2024**

**Поступила после рецензирования / Revised 14.10.2024**

**Принята к публикации / Accepted 18.11.2024**