

Анализ производительности микроконтроллеров с ядром Cortex-M3

А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,
kubenet@gmail.com

Аннотация — Выполнен сравнительный анализ производительности отечественных и зарубежных МК с ядром Cortex-M3. Представлены оценки быстродействия и эффективности выполнения операций отечественных МК K1986BE92QI, K1986BE91T и их зарубежных аналогов STM32F103C8, STM32F100RBT6. Разработаны тестовые программы для измерения быстродействия при выполнении арифметических операций с целыми числами и числами с плавающей точкой. Проведен сравнительный анализ скорости обращения к портам ввода/вывода с помощью библиотек CMSIS, SPL «Миландр» и «STMicroelectronics». Представлен программный код тестов вычисления числа π и чисел ряда Фибоначчи. Разработаны тесты и представлены результаты расчета числа из ряда Фибоначчи рекурсивным вызовом функции и линейным алгоритмом расчета в цикле.

Ключевые слова — ARM, производительность, бенчмарк, Миландр, STMicroelectronics, Cortex-M3.

I. ВВЕДЕНИЕ

Существующие методы оценки вычислительной производительности микроконтроллеров (МК) разделяют на аналитические и практические [1–3]. Аналитические методы основываются на информации об архитектуре исследуемого МК (список инструкций МК, время их выполнения, устройство конвейеров, объем всех видов памяти). При этом на производительность МК, помимо характеристик ядра, влияет ряд других аппаратных (размер и тип оперативной памяти, разрядность шины и т.д.) и программных (особенности компилятора, используемые библиотеки и т.д.) факторов, которые не учитываются при использовании аналитических методов. Практические методы основываются на выполнении набора тестовых программ (бенчмарки) и измерении времени их выполнения, объема использованной памяти и т.д. Примером такого теста для ядер МК производимых компанией ARM, является Dhrystone Benchmark [4], используемый компанией «ARM Limited» для оценки вычислительной способности ядра, в частности серии Cortex-M [5]. Однако, тесты Dhrystone Benchmark не всегда подходят для определения оценки производительности МК, поскольку имеют ряд ограничений и недостатков [6].

Таким образом, целью данной работы является разработка набора тестовых программ для анализа производительности микроконтроллеров с ядром Cortex-M3.

II. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕСТИРУЕМЫХ МК

В качестве тестируемых МК выбраны отечественные [7, 8] и зарубежные [9–11] МК на базе ядра Cortex-M3 rev2 (табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики тестируемых МК

МК	F_{clk} (МГц)	I/O	ОЗУ (Кбайт)	ПЗУ (Кбайт)
K1986BE91	80	96	32	128
K1986BE92	80	43	32	128
STM32F100	24	48	8	128
STM32F103	72	37	20	64

МК обладают близкими характеристиками и являются ближайшими аналогами. Тестовые программы реализованы на отладочных комплектах МК K1986BE91T фирмы «Миландр» и LDM-BB-K1986BE92QI [12] компании «LDM-SYSTEMS». При реализации тестовых программ рассмотрены три способа работы с портами ввода и вывода посредством библиотек CMSIS и SPL (табл. 2).

Таблица 2

Методы обращения к портам ввода и вывода МК

МК	Способы обращения к портам
K1986BE92QI K1986BE91T	MDR_PORTC->RXTX
	PORT_SetBits
	PORT_WriteBit
STM32F103 STM32F100	GPIOC->BSRR
	GPIO_SetBits
	GPIO_WriteBit

На текущий момент при разработке ПО для МК широко используются дополнительные библиотеки и программные средства, что сказывается на стабильности и временных затратах на выполнение кода. В связи с этим при разработке тестовых программ использовались распространенные языки программирования (C/C++) и открытые библиотеки (CMSIS, SPL). В качестве среды разработки

использовались Keil uVision 5 и отладочная плата ST-Link/v2.

Для исследования функционирования ядра в процессоре Cortex-M3 имеется до трех источников трассировки: Embedded Trace Macrocell, Instrumentation Trace Macrocell, Data Watchpoint и Trace (DWT) [13]. Во время работы каждому источнику трассировки назначается 7-битное значение идентификатора трассировки для разделения пакетов от каждого источника в узле отладки. Для подсчета количества тактовых циклов, необходимых для выполнения тестовой программы, использован регистр CYCCNT, входящий в состав модуля отладки DWT. Реализация кода для подсчета числа машинных команд с помощью модуля DWT представлена на рисунке 1.

```
void initDWT(void){
    CoreDebug->|=CoreDebug_DEMCR_TRCENA_Msk;
    DWT->CTRL |=DWT_CTRL_CYCCNTENA_Msk;
    DWT->CYCNT = 0;
}
```

Рис. 1. Функция инициализации DWT

III. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ

Одним из основных показателей работы МК является скорость выполнения арифметических операций. Разработан набор тестовых программ, выполняющих операции умножения, деления, разности и произведения, как над целыми числами, так и над числами с плавающей точкой. Дополнительно разработаны 2 тестовых программы, производящих вычисление чисел ряда Фибоначчи [14] с порядковыми номерами от 10 до 36 прямым подсчетом (рис. 2а) и рекурсивным вызовом функции (рис. 2б), а также вычисление числа π [15] с точностью до 50-го знака после запятой (рис. 3).

```
uint32_t fibonacci2(int n){
    uint32_t first = 0;
    uint32_t second = 1;
    uint32_t next;
    for(int i=0; i<n; i++) {
        if(i <= 1) next = i;
        else {
            next = first + second;
            first = second;
            second = next;
        }
    }
    return next;
}
a
```

```
uint32_t fibonacci(int n){
    if(n==0||n==1) return n;
    else
        return(fibonacci(n-1)+fibonacci(n-2));
}
б
```

Рис. 2. Программный код для вычисления значения числа π до 50 знаков

Компиляция тестовых программ при работе с портами ввода/вывода и арифметическими операциями выполнялась в среде разработки «Keil uVision» ARM компилятором версии 5 без использования ключей

оптимизации, что позволяет избежать выполнения инструкций, неиспользуемых в программном обеспечении (ПО) МК.

```
double calc1(int num1){
    return (16/(num1*pow(5.0,num1*1.0)));
}
double calc2(int num1){
    return (4/(num1*pow(239.0,num1*1.0)));
}
void pi(void){
    int limit = 10000; int j = 0;
    double ans1, ans2, ans3;
    int flag = 1;
    for(j = 1; j<=limit; j+=2){
        if (flag == 1){
            ans1+=calc1(j);
            ans2+=calc2(j);
            flag=0;
        }
        else {
            ans1-=calc1(j);
            ans1-=calc2(j);
            flag=1;
        }
    }
    ans3=ans1=ans2;
}
```

Рис. 3. Программный код для вычисления значения числа π до 50 знаков

При тестировании не производили дополнительные настройки МК, а тактирование всех МК выполнялось от высокоскоростного внутреннего осциллятора с частотой 8 МГц. Алгоритм выполнения тестовых программ на рассматриваемых МК представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Алгоритм выполнения тестов на МК

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВ

Количество системных тактов ядра МК при использовании различных методов обращения к портам ввода-вывода для МК представлено в табл. 3.

Как видно из табл. 3, число системных тактов, требуемых для обращения к порту ввода/вывода, близко по количеству для отечественных МК. При этом для зарубежных МК данный показатель имеет большую разницу, что может быть вызвано различием подключаемых библиотек (CMSIS, SPL).

Таблица 3

Количество машинных команд, при обращении к портам МК

Метод обращения к порту МК	Кол-во машинных команд	
	K1986BE91	K1986BE92
MDR_PORTC->RXTX	18	21
PORT_SetBits	74	84
PORT_WriteBit	115	117
	STM32F100	STM32F103
GPIOC->BSRR	8	15
GPIO_WriteBit	15	41
GPIO_SetBits	21	53

Сравнительный анализ производительности выбранной группы МК проведен на основе выполнения тестовых программ, использующая 10000 операций суммирования, разности, произведения и

деления целых чисел и чисел с плавающей точкой. По результатам тестов определены максимальное и минимальное числа машинных команд (табл. 4), необходимых для выполнения тестовых программ для целых чисел и чисел с плавающей точкой.

Как видно из табл. 4, при выполнении арифметических операций с целыми числами МК STM32 задействуют меньшее число машинных команд, чем МК K1986BE9x. Наибольшее различие выявлено при выполнении теста с делением целых чисел между МК K1986BE91T и STM32F100RBT6 (63 машинных команды), однако в остальных тестах значительной разницы в производительности рассмотренных МК обнаружено не было. Сравнение результатов тестирования с арифметическими операциями над числами с плавающей точкой показало преимущество МК семейства STM над МК K1986BE9x при выполнении данного вида задач.

Таблица 4

Результаты вычислений арифметических операций над целыми числами и числами с плавающей точкой для отечественных и зарубежных МК

Арифметическая операция	Количество машинных команд							
	K1986BE92Q1		K1986BE91T		STM32F100		STM32F103	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Сумма	110/150	96	114	91	89/108	67	126/148	93/83
Разность	150/110	87	159	95	110/91	67	151/129	93/83
Умножение	142/148	83	150/156	91	112/117	65	133/148	80/83
Деление	262/268	109	266/272	113	203/210	123	253/259	96/97
Аргументы x, y	rand()%999999 / rand()%99999999 - 139999999.0099999							

При выполнении тестовых программ, исполняющих базовые арифметические операции, от МК не требуется большого объема оперативной памяти и высокой производительности. Выполнен нагрузочный тест в виде расчета числа машинных команд (M тыс.), затрачиваемых МК для вычисления чисел из ряда Фибоначчи (с порядковыми номерами N от 10 до 34), выполняющий прямой подсчет каждого следующего числа ряда в цикле, используя рекурсивный вызов функции (рис. 5а) и линейный алгоритм (рис. 5б). Изначально тесты проводились без использования ключей оптимизации кода, являющихся директивами компилятору для пропуска команд, которые не используются непосредственно в ПО МК.

Использование ключей оптимизации может повлиять на время выполнения тестовых программ, в связи с чем выполнено сравнение результатов выполнения тестовой программы для расчета чисел Фибоначчи по линейному алгоритму без (рис. 5в) и с (рис. 5г) использованием оптимизации кода.

Как видно из рис. 5, при расчете чисел из ряда Фибоначчи по линейному алгоритму (время на вычисление пропорционально размерности входных данных $O(n)$) МК STM задействуют меньшее число машинных команд на выполнение тестовой программы по сравнению с МК K1986BE9x, что также наблюдается и при расчете посредством рекурсивного

вызова функции. Применение ключей оптимизации позволяет ускорить время выполнения тестовой задачи для всех рассматриваемых МК. При этом для зарубежных МК наблюдается аномальное возрастание числа машинных команд, требуемых для вычисления определенных чисел из ряда Фибоначчи, что может быть вызвано ошибками в работе оптимизатора кода.

Разработка тестовой программы по вычислению числа π с заданной точностью выполнена с учетом возможностей исследуемых МК. Поскольку МК семейства STM отличаются размером ПЗУ и ОЗУ (табл. 1), выбрано ограничение для расчета числа π с точностью до 50 знаков после запятой. Результаты выполнения тестовой задачи с расчетом числа π без и с оптимизацией кода сведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты выполнения тестовой задачи по расчету числа π

МК	Количество машинных команд	
	без оптимизации	с оптимизацией
K1986BE92Q1	76291593	71442986
K1986BE91T	76291537	71442912
STM32F103	75362241	68800268
STM32F100	48537472	455741143

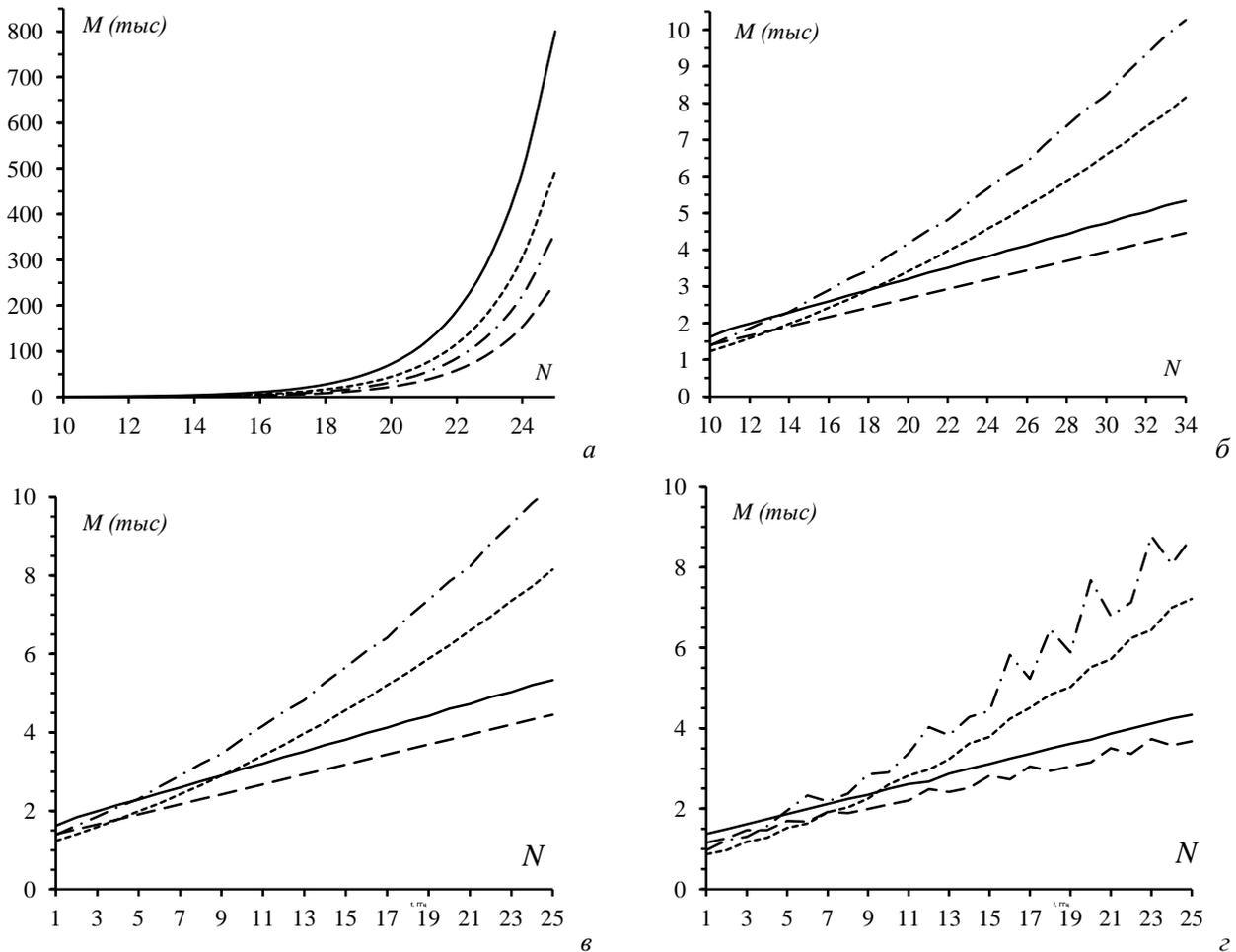


Рис. 5. Зависимость количества машинных команд NMI от порядкового номера числа Фибоначчи N , вычисляемого рекурсивным вызовом функции (а) и по линейному алгоритму (б), без оптимизации (в) и с оптимизацией (г) тестового кода и для МК1986BE91Т (—), К1985BE92QI (-----), STM32F100RBT6 (— · —), STM32F103C8 (- · - · -)

V. ВЫВОДЫ

По результатам выполнения тестовой программы (табл. 5) отечественные МК уступают в производительности по сравнению с зарубежными аналогами. При компиляции без оптимизации кода МК K1986BE92QI и K1986BE91T, которые располагают большей оперативной памятью в 4 раза, чем в МК STM32F100. Однако, при вычислении "числа π " выполнили в 1,57 раза больше машинных команд. При использовании оптимизации кода в процессе компиляции прошивки, на вычисление "числа π " отечественные МК выполнили на 4,85 млн. меньше машинных инструкций, чем без использования оптимизации кода. В тоже время, МК STM32F100 при использовании оптимизации кода, выполнил в 9,38 раза больше машинных инструкций, чем без использования оптимизации. Таким образом, вычислительная эффективность МК во многом зависит от уровня оптимизации машинных инструкций, а использование различных МК с идентичным ядром не гарантирует идентичных характеристик работы МК при выполнении эталонной задачи.

Разработан набор тестовых программ для МК, позволяющих выполнить расчет количества машинных команд МК, требуемых на выполнение арифметических задач и задач обращения к портам ввода/вывода.

Выполнено сравнение производительности отечественных и зарубежных МК на основе ARM ядра Cortex-M3. По результатам тестов видно, что производительность МК определяется не только архитектурой ядра МК, но и периферийными устройствами.

ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-0162, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ракитский А.А. Аналитический метод сравнения и оценки производительности компьютеров и вычислительных систем / А.А. Ракитский, Б.Я. Рябко, А.Н. Фионов // Вычислительные технологии – 2014. – Т. 19, № 4. – С. 84–98.

- [2] Ракитский А.А. Теоретическая оценка вычислительной способности процессоров Intel // Вестник Сиб-ГУТИ. – 2013. – № 3 (23), – С. 29–45.
- [3] Величко А.А. Теоретический метод для оценки и сравнения производительности процессоров на базе архитектуры ARM / А.А. Величко, А.А. Ракитский, Б.Я. Рябко // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21, – № 5. – С. 22–37.
- [4] Dhrystone Benchmark: Rationale for Version 2 and Measurement Rules [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.netlib.org/benchmark/dhry-c> свободный (дата обращения: 16.09.2019).
- [5] Dhrystone Benchmarking for ARM Cortex Processors Application Note 273 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://static.docs.arm.com/dai0273/a/DAI0273A_dhrystone_benchmarking.pdf свободный (дата обращения: 24.09.2019).
- [6]. Embedded Microprocessor Benchmark Consortium [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.eembc.org> свободный (дата обращения: 24.09.2019).
- [7] K1986BE92QI Описание и параметры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protssessor/y/32_razryadnye_mikrokontrollery/1986ve9kh_yadro_arm_cortex_m3/k1986ve92qi/#main_tab свободный (дата обращения: 24.09.2019).
- [8] 1986BE91T Описание и параметры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protssessor/y/32_razryadnye_mikrokontrollery/1986ve9kh_yadro_arm_cortex_m3/1986ve91t свободный (дата обращения: 24.09.2019).
- [9] Datasheet STM32F103xC, STM32F103xD, STM32F103xE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103rc.pdf> свободный (дата обращения: 16.09.2019).
- [10] RM0008 Reference manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/59/b9/ba/7f/11/af/43/d5/CD00171190.pdf/files/CD00171190.pdf/jcr:content/translations/en.CD00171190.pdf свободный (дата обращения: 24.09.2019).
- [11] Datasheet STM32F100x4 STM32F100x6 STM32F100x8 STM32F100xB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f100rb.pdf> свободный (дата обращения: 24.09.2019).
- [12] Отладочная плата LDM-BB-K1986BE92QI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://ldm-systems.ru/f/doc/catalog/LDM-BB-K1986BE92QI/LDM-BB-K1986BE92QI.pdf> свободный (дата обращения: 24.09.2019).
- [13] Summary and description of the DWT registers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://developer.arm.com/docs/ddi0337/e/system-debug/dwt/summary-and-description-of-the-dwt-registers> свободный (дата обращения: 24.09.2019).
- [14] Computing the nth Fibonacci number [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://sites.fas.harvard.edu/~cs124/lects/lec2.pdf> свободный (дата обращения: 24.09.2019).
- [15] Freshman Seminar 21u Calculating Pi Paul Bamberg [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.math.harvard.edu/archive/fs21u_fall_04/index.html свободный (дата обращения: 24.09.2019).

Performance Analysis of Microcontrollers with Core Cortex-M3

A.V. Osintsev, M.E. Komnatov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, kubenet@gmail.com

Abstract — Analytical and practical methods for evaluating the computational performance of microcontrollers (MC) are known. Analytical methods are based on information about the architecture of the MC under study (the list of MC instructions, their execution time, pipeline design, memory size). While practical methods are devoted to solving classical algorithmic problems. At the same time, the performance of MC, in addition to the characteristics of the MC core, is affected by a number of other factors that are not taken into account when using analytical methods. In this paper, a comparative analysis of the performance of MCs with the Cortex-M3 core is performed. Estimates of the speed and efficiency of performing operations of domestic MCs K1986BE92QI, K1986BE91T and their foreign counterparts STM32F103C8, STM32F100RBT6 are presented. Test programs have been developed to measure performance when performing arithmetic operations with integers and floating point numbers. Comparison of the speed of access to I/O ports using the libraries CMSIS, SPL "Milandr" and "STMicroelectronics" was carried out. The program code of tests for calculating the number π and numbers of the

Fibonacci series is presented. When performing arithmetic operations on integers, STM32 MCs use fewer machine instructions than domestic MCs. The greatest difference was found when performing a test with integer division for K1986BE91T and STM32F100RBT6 MCs. A load test was performed in the form of calculating the number of machine instructions spent by the MC to calculate numbers from the Fibonacci series, which performs a direct calculation of each next number of the series in a cycle using a recursive function call and a linear algorithm. When compiled without code optimization, MK K1986BE92QI and K1986BE91T performed 1.57 times more machine instructions when calculating the "number π " than STM32F100. When using code optimization in the process of compiling the firmware, domestic MCs performed 4.85 million fewer machine instructions to calculate the "number π " than without using code optimization. Thus, the computational efficiency of the MC largely depends on the level of optimization of machine instructions, and the use of different MCs with an identical core does not guarantee identical performance characteristics of the MC when executing a reference task.

According to the test results, it can be seen that the performance of the MCs is determined not only by the architecture of the MC core, but also by peripheral devices.

Keywords — performance, microcontroller, benchmark, Milandr, STMicroelectronics, Cortex-M3.

REFERENCES

- [1] Rakitskij A.A., Ryabko B.YA., Fionov A.N. Analiticheskij metod sravneniya i ocenki proizvoditel'nosti komp'yuterov i vychisli-tel'nyh sistem / Vychislitel'nye tekhnologii – 2014. – V. 19, № 4. – S. 84–98.
- [2] Rakitskij A.A. Teoreticheskaya ocenka vychislitel'noj sposobnosti processorov Intel / Vestnik Sib-GUTI. – 2013. – № 3 (23), – S. 29–45.
- [3] Velichko A.A., Rakitskij A.A., Ryabko B.YA. Teoreticheskij metod dlya ocenki i sravneniya proizvoditel'nosti processorov na baze arhitektury ARM / Vychislitel'nye tekhnologii. – 2016. – V. 21, – № 5. – S. 22–37.
- [3] Kundert K. Introduction to RF Simulation and Its Application / IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1999. V. 34. № 9. P. 1298–1319.
- [4] URL: <http://www.netlib.org/benchmark/dhry-c> (access date: 16.09.2019).
- [5] URL: https://static.docs.arm.com/dai0273/a/DAI0273A_dhrystone_benchmarking.pdf (access date: 24.09.2019).
- [6] URL: <https://www.eembc.org> (access date: 21.02.2022).
- [7] URL: https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protssory/32_razryadnye_mikrokontrollery/1986ve9kh_yadro_arm_cortex_m3/k1986ve92qi/ (access date: 21.02.2022).
- [8] URL: https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protssory/32_razryadnye_mikrokontrollery/1986ve9kh_yadro_arm_cortex_m3/1986ve91t (access date: 21.09.2021).
- [9] URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103rc.pdf> (access date: 16.09.2022).
- [10] URL: <https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference/manual/59/b9/ba/7f/11/af/43/d5/CD00171190.pdf/files/CD00171190.pdf/jcr:content/translations/en/CD00171190.pdf> (access date: 02.01.2022).
- [11] URL: <https://www.st.com/resource/en/data-sheet/stm32f100rb.pdf> (access date: 20.02.2022).
- [12] URL: <https://ldm-systems.ru/f/doc/catalog/LDM-BB-K1986BE92QI/LDM-BB-K1986BE92QI.pdf> свободный (access date: 21.02.2022).
- [13] URL: <https://developer.arm.com/docs/ddi0337/e/system-debug/dwt/summary-and-description-of-the-dwt-registers> (access date: 21.01.2022).
- [14] URL: <http://sites.fas.harvard.edu/~cs124/lecs/lec2.pdf> (access date: 20.03.2022).
- [15] URL: http://www.math.harvard.edu/archive/fs21u_fall_04/index.html (access date: 20.02.2022).