

---

---

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

## SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

---

---

УДК 621.396.6  
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-259-265

### СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ МЕТРИК МАШИННЫХ КОМАНД ЭВМ И РЕАЛИЗУЮЩИХ ИХ МИКРОКОМАНД НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПАРЕТО

А. В. АВЕРЬЯНОВ\*, И. Н. КОШЕЛЬ, В. В. КУЗНЕЦОВ, В. Т. НГУЕН

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия*  
\*vka\_24kaf1@mail.ru

**Аннотация.** Определены метрики, позволяющие анализировать частоту использования машинных команд на примере 50 программ в машинных кодах учебной ЭВМ. Установленные в процессе анализа проценты использования и повторения микрокоманд при реализации микропрограммного управления подтверждают применимость принципа „20/80“ — принципа Парето для работы процессоров. Сделан вывод об избыточности системы команд ЭВМ, которая приводит к усложнению архитектуры процессоров. Выявлены группы команд и микрокоманд с минимальным числом повторений (значимости), часть из которых может быть удалена с целью упрощения архитектуры ЭВМ.

**Ключевые слова:** архитектура ЭВМ, анализ, диаграмма и принцип Парето, программная модель ЭВМ, метрики машинных команд, система команд, мнемокоды, микропрограмма

**Ссылка для цитирования:** Аверьянов А. В., Кошель И. Н., Кузнецов В. В., Нгуен В. Т. Статистическое оценивание метрик машинных команд ЭВМ и реализующих их микрокоманд на основе анализа Парето // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 259—265. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-259-265.

### STATISTICAL ESTIMATION OF COMPUTER INSTRUCTIONS METRICS AND MICRO COMMANDS IMPLEMENTING THEM BASED ON PARETO ANALYSIS

A. V. Averyanov\*, I. N. Koshel, V. V. Kuznetsov, V. T. Nguyen

*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia*  
vka\_24kaf1@mail.ru

**Abstract.** On the example of 50 programs in the machine codes for an educational computer, metrics are defined that allow analyzing the frequency of use of machine instructions. The percentages of microinstructions used and repeated during micro-program control implementation established during the analysis, confirm the applicability of the 20/80 principle - the Pareto principle for processor operation. A conclusion is made about the redundancy of the system of computer commands, which leads to the complication of the processors architecture. Groups of instructions and microinstructions with a minimum number of repetitions (significance) are identified, and some of them can be removed in order to simplify the computer architecture.

**Keywords:** computer architecture, analysis, Pareto diagram and principle, program model of computer, metrics of machine instructions, system of commands, mnemonic codes, microprogram

**For citation:** Averyanov A. V., Koshel I. N., Kuznetsov V. V., Nguyen V. T. Statistical estimation of computer instructions metrics and micro commands implementing them based on Pareto analysis. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 4. P. 259—265 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-259-265.

В сфере контроля качества для классификации проблем качества на немногочисленные существенно важные и многочисленные несущественные используется метод Парето. Анализ Парето относится к статистическим методам повышения качества, в его основе лежит процесс построения диаграммы — кумулятивной кривой Парето, позволяющей определить немногочисленные, но значимые факторы [1, 2]. Эта кривая описывает функцию распределения Парето, которая в теории вероятностей относится к усеченным непрерывным двухпараметрическим распределениям\* [3]. Это распределение используется в исследовании научных, экономических, социальных, геофизических проблем и многих других видов наблюдаемых явлений. Вне области экономики это распределение называется также распределением Брэдфорда, в лингвистике оно известно под именем закона Цапфа.

Использование диаграммы Парето позволило выявить, что устранение в процессе проектирования, производства и эксплуатации интегральных микросхем факторов, приводящих к дефектам металлизации и к дефектам внутренних межэлементных соединений и контактов, приведет к двукратному сокращению количества отказов этих микросхем [4].

Подход, базирующийся на диаграмме и принципе Парето, может быть применен для анализа используемых в процессе обучения программных моделей ЭВМ [5] и обоснования нецелесообразности применения на начальном этапе обучения программированию модели ЭВМ с избыточным количеством команд. Предпочтение следует отдавать ЭВМ, система команд которой содержит минимальное число машинных команд-инструкций.

С помощью анализа Парето количественно оценивалась частота использования машинных команд ЭВМ. Объектом исследования являлась система команд программной модели учебной вычислительной машины [6]. В качестве примера проанализированы три программы в мнемосокодах, соответствующие трем алгоритмам: обрабатывающему элементы массива, использующему подпрограмму и разветвляющемуся. Установленная доля использованных команд в процессе решения задач подтверждает справедливость и применимость принципа „20/80“ — принципа Парето, который в наиболее общем виде можно сформулировать так: „двадцать процентов усилий дают восемьдесят процентов результата, остальные восемьдесят процентов обеспечивают лишь двадцать процентов результата“. Сделан вывод об избыточности системы команд ЭВМ, которая приводит к усложнению устройства управления ЭВМ [7].

Представленные результаты получены для ограниченной выборки, состоящей из 61 команды и относящейся к трем программам. Достоверность полученных результатов и выводов проверялась путем значительного увеличения числа команд, подлежащих статистической обработке. Для этого были проанализированы 50 программ в мнемосокодах учебной ЭВМ [6, 8], реализующих разветвляющиеся алгоритмы (9 программ), обработку массивов данных — программирование циклов с переадресацией (8 программ), включающих подпрограмму и организацию стека (9 программ), программирование внешних устройств (10 программ) и реализующих различные способы адресации (14 программ).

Все использованные команды представлены в табл. 1, на основе которой строится диаграмма Парето. В первом столбце содержатся мнемосокоды команд, а в скобках — соответствующие им машинные коды, представленные в десятичной системе счисления; во втором столбце — число повторений  $n$  конкретной команды (ее значимость); в третьем — накопленная сумма  $N$  числа повторений; в четвертом — доля  $r$  от суммарного числа повторений, выраженная в процентах; в пятом столбце — накопленная доля  $R$ , выраженная в процентах. Рассматриваемые параметры  $n$ ,  $N$ ,  $r$  и  $R$  являются метриками машинных команд ЭВМ.

Учебная ЭВМ включает 42 команды. В табл. 1 приведены 37 команд, которые расположены в порядке убывания частоты (значимости) их использования. Таким образом, 5 команд

\* Распределение названо в честь итальянского экономиста и социолога Вильфредо Парето, который вывел эмпирическое правило, отражающее неравномерность распределения причин в природе.

в 50 исследуемых программах не использованы. Из таблицы следует, что восемь первых команд (примерно 20 % от общего количества) задействуются в процессе вычислений 850 раз, что составляет примерно 68 % от суммарного числа повторений. Применительно к статистике использования команд учебной ЭВМ принцип „20/80“ не соблюдается — этому случаю соответствует отношение „20/70“.

Изменение накопленной доли  $R$  графически отражается диаграммой Парето (рис. 1). Ось абсцисс содержит 37 равных интервалов — число использованных команд. Левая ось ординат соответствует накопленной доле  $R$  от числа повторений, выраженной в процентах, правая — накопленной сумме числа повторений команд  $N$ . Кумулятивная кривая Парето является по сути огибающей столбиковой диаграммы, построенной следующим образом.

Таблица 1

Команда (КОп)	$N$	$n$	$\approx R, \%$	$\approx r, \%$
RD (21)	283	283	22,532	<b>22,532</b>
WR (32)	152	435	12,102	<b>34,634</b>
WR (22)	124	559	9,873	<b>44,507</b>
SUB (24)	65	624	5,175	<b>49,682</b>
OUT (38)	63	687	5,016	<b>54,698</b>
ADD (33)	61	748	4,857	<b>59,555</b>
CALL (19)	54	802	4,299	<b>63,854</b>
RD (31)	48	850	3,822	<b>67,676</b>
JMP (10)	41	891	3,264	<b>70,940</b>
JS (13)	33	924	2,627	<b>73,567</b>
MUL (25)	31	955	2,468	<b>76,035</b>
HLT (09)	31	986	2,468	<b>78,503</b>
OUT (02)	31	1017	2,468	<b>80,971</b>
RET (08)	29	1046	2,309	<b>83,280</b>
IN (01)	29	1075	2,309	<b>85,589</b>
JNS (14)	26	1101	2,07	<b>87,659</b>
RDI (41)	25	1126	1,990	<b>89,649</b>
DIV (26)	23	1149	1,831	<b>91,480</b>
ADD (23)	19	1168	1,513	<b>92,993</b>
JNZ (12)	18	1186	1,433	<b>94,426</b>
PUSH (06)	10	1196	0,796	<b>95,222</b>
SUB (34)	9	1205	0,717	<b>95,939</b>
JRNZ (17)	8	1213	0,637	<b>96,576</b>
POP (07)	6	1219	0,478	<b>97,054</b>
JZ (11)	6	1225	0,478	<b>97,532</b>
IRET (03)	5	1230	0,398	<b>97,930</b>
EI (28)	5	1235	0,398	<b>98,328</b>
IN (37)	5	1240	0,398	<b>98,726</b>
MOV (30)	4	1244	0,318	<b>99,044</b>
MUL (35)	4	1248	0,318	<b>99,362</b>
DIV (36)	2	1250	0,159	<b>99,521</b>
ADI (43)	1	1251	0,08	<b>99,601</b>
SBI (44)	1	1252	0,08	<b>99,681</b>
MULI (45)	1	1253	0,08	<b>99,761</b>
DIVI (46)	1	1254	0,08	<b>99,841</b>
JO (15)	1	1255	0,08	<b>99,921</b>
JNO (16)	1	1256	0,08	<b>100</b>

Первый столбик соответствует команде RD(21) – „Чтение“, наиболее часто повторяемой (накопленная сумма числа повторений  $N = 283$ , накопленная доля от суммарного числа повторений  $R = 22,532 \%$ ). Второй столбик соответствует двум командам RD(21) и WR(32) — „Запись в регистр“, для которых  $N = 435$ ,  $R = 34,634 \%$ , третий — трем командам RD(21), WR(32) и WR(22) — „Запись в ячейку памяти“, для которых  $N = 559$  и  $R = 44,50 \%$  и т.д.

Построение столбиковой диаграммы продолжается вплоть до 37-й команды JNO(16) — „Переход, если нет переполнения“. Кумулятивная кривая (см. рис. 1) математически соответствует функции распределения Парето, которая задается равенством:

$$F_X(x) = P(X < x) = 1 - (x_m/x)^k \text{ для } x \geq x_m; x_m > 0; k > 0,$$

где  $X$  — случайная величина;  $x$  — значение случайной величины  $X$ ;  $x_m$  и  $k$  — параметры распределения Парето.

Семь последних команд DIV(36), ADI(43), SBI(44), MULI(45), DIVI(46), JO(15) и JNO(16) могут быть объединены в соответствии с методикой построения диаграмм Парето в группу „Прочие“ [9], так как числовой результат повторений каждой из них меньше, чем самое малое значение  $n$ , полученное для остальных 30 команд.

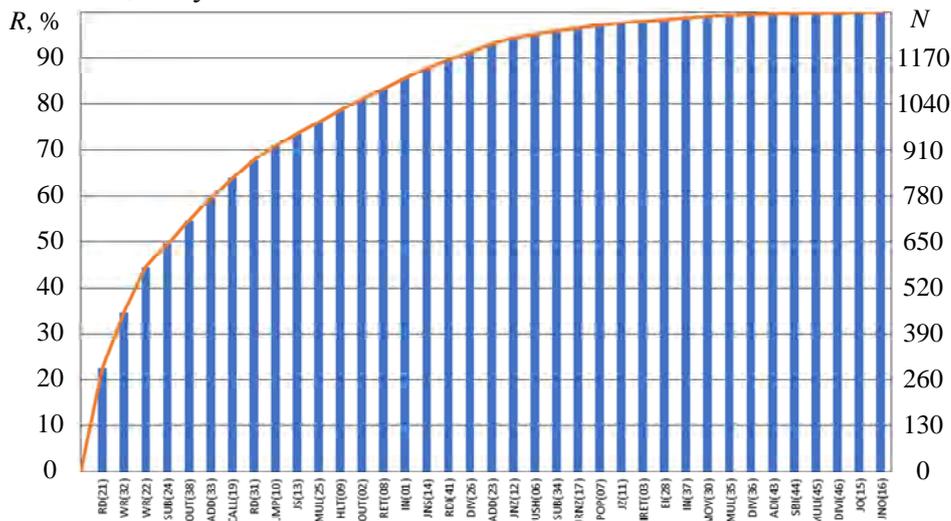


Рис. 1

На следующем этапе статистического оценивания применялся анализ Парето для микрокоманд, реализующих рассмотренные команды ЭВМ. В табл. 2 представлены все микрокоманды, используемые в микропрограммах, соответствующих всем командам и пустой операции NOP.

Таблица 2

Команда (КОп)	$N$	$n$	$\approx R, \%$	$\approx r, \%$
MRd	55	55	15,988	<b>15,988</b>
MAR := PC	47	102	13,663	<b>29,651</b>
PC := PC+1	47	149	13,663	<b>43,314</b>
CR := MDR	42	191	12,209	<b>55,523</b>
END_COMMAND	42	233	12,209	<b>67,732</b>
ALU <- COP	12	245	3,488	<b>71,221</b>
Start ALU	12	257	3,488	<b>74,709</b>
RAR := CR5	9	266	2,616	<b>77,325</b>
DR := MDR	8	274	2,326	<b>79,651</b>
RRd	7	281	2,035	<b>81,686</b>
MAR := SP	6	287	1,744	<b>83,430</b>
MAR := ADR	6	293	1,744	<b>85,174</b>
MWr	4	297	1,163	<b>86,337</b>
DR := RDR	4	301	1,163	<b>87,500</b>
SP := SP+1	3	304	0,872	<b>88,372</b>
SP := SP-1	3	307	0,872	<b>89,244</b>
RWr	3	310	0,872	<b>90,116</b>
PC := MDR	2	312	0,581	<b>90,697</b>
PC := ADR	2	314	0,581	<b>91,278</b>
Acc := MDR	2	316	0,581	<b>91,859</b>

Продолжение Табл. 2

Команда (КОп)	<i>N</i>	<i>N</i>	≈ <i>R</i> , %	≈ <i>R</i> , %
OR := ACC	1	317	0,291	92,150
FL := MDR[1:2]	1	318	0,291	92,441
INT_RETURN	1	319	0,291	92,732
RB := ADR	1	320	0,291	93,023
SP := ADR	1	321	0,291	93,314
MDR := RDR	1	322	0,291	93,605
RDR := MDR	1	323	0,291	93,895
HALT	1	324	0,291	94,186
JZ	1	325	0,291	94,477
JNZ	1	326	0,291	94,767
JS	1	327	0,291	95,058
JNS	1	328	0,291	95,349
JO	1	329	0,291	95,640
JNO	1	330	0,291	95,931
RAR := CR2	1	331	0,291	96,222
DEC_GR	1	332	0,291	96,513
JRNZ	1	333	0,291	96,804
MDR := 0.FL.PC	1	334	0,291	97,095
INT (PC := IVT[ADR])	1	335	0,291	97,386
MDR := PC	1	336	0,291	97,677
I := 1	1	337	0,291	97,968
I := 0	1	338	0,291	98,259
RAR := CR4	1	339	0,291	98,545
IORD	1	340	0,291	98,836
IOWr	1	341	0,291	99,127
MDR := ACC	1	342	0,291	99,418
ACC := RDR	1	343	0,291	99,709
RDR := ACC	1	344	0,291	100

Табл. 2 содержит 48 микрокоманд, расположенных в порядке убывания частоты их использования (значимости).

Диаграмма Парето, соответствующая табл. 2, приведена на рис. 2.

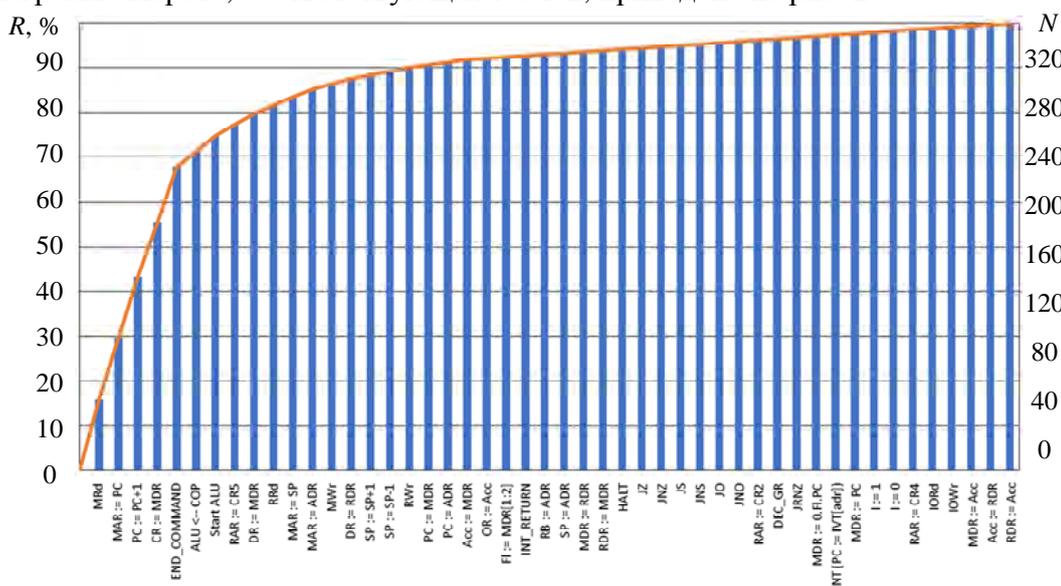


Рис. 2

Из табл. 2 и рис. 2 следует, что десять первых микрокоманд (примерно 21 % от общего количества) задействуются в процессе вычислений 281 раз, что составляет примерно 82 % от суммарного числа повторений. Установленная доля использованных микрокоманд в процессе

решения задач подтверждает применимость принципа Парето к микропрограммам, реализующим систему команд учебной ЭВМ. В группу „Прочие“ можно отнести 28 микрокоманд, каждая из которых используется в микропрограммах лишь один раз. Эта группа составляет примерно 58 % от общего числа микрокоманд, представленных в табл. 2.

Диаграмма Парето для микрокоманд, содержащая группу „Прочие“, представлена на рис. 3.

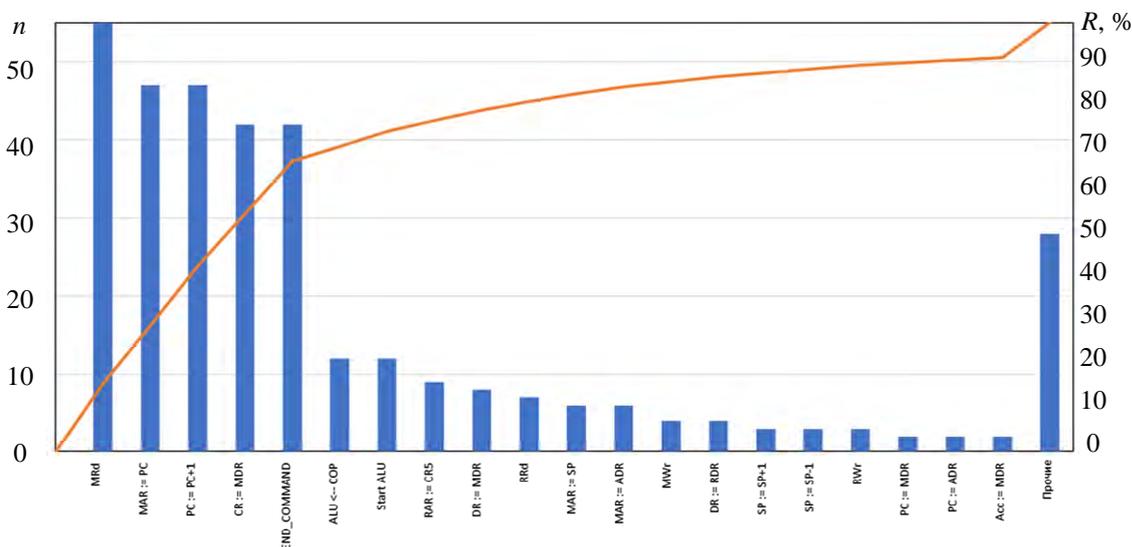


Рис. 3

Ось абсцисс диаграммы разбита на 21 одинаковый интервал. Убывающая столбиковая диаграмма начинается с микрокоманды MRd — „Чтение памяти“, 55 раз используемой в командах учебной ЭВМ. Последний 21-й интервал соответствует группе „Прочие“. Микрокоманды, образующие эту группу, добавляют примерно 8 % к накопленной доле  $R$  повторений.

Сказанное выше позволяет сделать следующие выводы. Редко используемые машинные инструкции и микрокоманды, их реализующие на уровне микропрограмм, приводят к усложнению архитектуры микропроцессоров. Принцип Парето применительно к работе процессора формулируется следующим образом: „в течение 80 % времени работы процессор выполняет 20 % от общего числа реализованных в нем команд“.

Целесообразно освободить процессор от выполнения 80 % редко используемых команд и микрокоманд, их реализующих. Сокращению подлежат команды и микрокоманды из группы „Прочие“. В табл. 1 и 2 соответствующие им строки выделены серым цветом. Этот выбор с последующим удалением может быть использован на этапе разработки RISC-компьютеров (компьютеров с сокращенным набором команд).

Уменьшение числа редко используемых машинных инструкций и микрокоманд приведет к упрощению устройств управления и архитектуры процессоров ЭВМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистические методы повышения качества / Пер. с англ.; под ред. Х. Кумэ. М.: Финансы и статистика, 1990. 304 с.
2. Juran J. M. Product quality—a prescription for West // Management Review. 1981. June. P. 9—10.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1973. С. 614—615.
4. Аверьянов А. В., Белая Т. И., Молчанов О. Е. Использование диаграммы Парето для обеспечения качества функционирования интегральных микросхем // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 7. С. 558—562.
5. Аверьянов А. В., Белая Т. И., Молчанов О. Е. Анализ программных моделей учебных ЭВМ с использованием принципа Парето // Естественные и технические науки. 2016. № 6. С. 160—164.

6. Жмакин А. П. Архитектура ЭВМ. СПб: БХВ-Петербург, 2010. 352 с.
7. Аверьянов А. В., Калюжный А. В. Применение анализа Парето для количественного оценивания частоты использования машинных команд ЭВМ // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 2. С. 101—105.
8. Басыров А. Г. Организация ЭВМ и систем: практикум. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. 83 с.
9. Аверьянов А. В., Горичев Ю. В., Осипов Н. А. Надежность систем космических комплексов. Руководство к практическим и лабораторным занятиям / Под ред. В. А. Белозёрова. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006. 92 с.
10. Абель П. Ассемблер. Язык и программирование для IBM PC. К.: Век<sup>+</sup>, М.: ЭНТРОП, К.: НТИ, 2003. 736 с.

#### Сведения об авторах

- Алексей Васильевич Аверьянов** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: vka\_24kaf1@mail.ru
- Игорь Николаевич Кошель** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; начальник факультета; E-mail: vka\_24kaf1@mail.ru
- Вадим Викторович Кузнецов** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: vka\_24kaf1@mail.ru
- Ван Тиен Нгуен** — курсант; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: vka\_24kaf1@mail.ru

Поступила в редакцию 27.12.22; одобрена после рецензирования 12.01.22; принята к публикации 28.02.23.

#### REFERENCES

1. Kume H. *Statistical Methods for Quality Improvement*, Madras, 2006.
2. Juran J.M. *Management Review*, 1981, June, pp.9–10.
3. Korn G.A., Korn Th.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*, 1968.
4. Averyanov A.V., Belaya T.I., Molchanov O.E. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 7(59), pp. 558–562. (in Russ.)
5. Averyanov A.V., Belaya T.I., Molchanov O.E. *Natural and technical sciences*, 2016, no. 6, pp. 160–164. (in Russ.)
6. Zhmakin A.P. *Arkhitectura EVM Computer architecture*, St. Petersburg, 2010, 352 p. (in Russ.)
7. Averyanov A.V., Kalyuzhny A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 2(62), pp. 101–105. (in Russ.)
8. Basyrov A.G. *Organizatsiya EVM i sistem: praktikum* (Organization of Computers and Systems: Workshop), St. Petersburg, 2012, 83 p. (in Russ.)
9. Averyanov A.V., Gorichev Yu.V., Osipov N.A. *Nadezhnost' sistem kosmicheskikh kompleksov. Rukovodstvo k prakticheskim i laboratornym zanyatiyam* (Reliability of Systems of Space Complexes. Guide to Practical and Laboratory Classes), St. Petersburg, 2006, 92 p. (in Russ.)
10. Abel P. *IBM PC Assembly Language and Programming*, British Columbia Institute of Technology, 1998, 606 p.

#### Data on authors

- Aleksey V. Averyanov** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; E-mail: vka\_24kaf1@mail.ru
- Igor N. Koshel** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; Head of the Faculty; E-mail: vka\_24kaf1@mail.ru
- Vadim V. Kuznetsov** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; E-mail: vka\_24kaf1@mail.ru
- Van Tien Nguyen** — Student; A. F. Mozaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; E-mail: vka\_24kaf1@mail.ru

Received 27.12.22; approved after reviewing 12.01.22; accepted for publication 28.02.23.