

Оценка производительности бортового вычислителя беспилотного летательного аппарата при реализации процесса наведения

© С.Н. Илюхин, А.Н. Клишин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены методики оценки производительности бортовых цифровых вычислительных машин, используемых в контурах управления современных беспилотных летательных аппаратов, поскольку от быстродействия процессора зависит качество работы всей системы управления. Проанализированы различные подходы к оценке быстродействия бортовых вычислительных машин. Особое внимание уделено методике оценки их производительности на основе процессора MFLOPS, получившего широкое распространение. По данной оценочной методике разработан комплекс рекомендаций, касающихся совершенствования структуры алгоритмов управления, оценки возможности их упрощения без существенного снижения качества управления, определения периодичности вычислительных операций в алгоритме. Наглядно проиллюстрирована его эффективность на примере оценки бортовой вычислительной машины, выполняющей программу реализации прямого самонаведения с функциональным упреждением.

Ключевые слова: бортовая вычислительная машина, цифровая вычислительная машина, MFLOPS, алгоритм управления, функциональное упреждение

Введение. Функционирование современных систем управления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) основано на работе бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ), которые выполняют требуемые вычисления на основании результатов текущих измерений, поступающих от датчиков и устройств, входящих в систему управления летательного аппарата [1–5]. От быстродействия БЦВМ, в частности ее процессора, зависит качество работы всей системы управления в целом. Таким образом, располагая информацией о производительности БЦВМ, можно осуществлять оценку различных алгоритмов управления для конкретного микропроцессора БЦВМ, проводить сравнение нескольких процессоров по быстродействию и выбирать наиболее подходящий для тех или иных задач.

Программа реализации управления должна полностью соответствовать типу БЦВМ и осуществлять функционирование так, чтобы все процессы проходили в масштабе реального времени.

Современные системы автоматического управления с цифровыми вычислительными машинами (ЦВМ) подобного класса должны обладать большой «живучестью». Понятие «живучесть», являющееся несколько более широким, чем *надежность*, связывают с сохранением работоспособности системы не только в нормальных штатных условиях

эксплуатации, но и при различных внешних воздействиях [2, 4, 5]. Допускается, однако, некоторое ухудшение качества управления. Живучесть систем обычно обеспечивают путем введения резервирования, диагностирования и тестирования, правильностью построения структуры и изысканием более надежных методов измерения и управления [3].

Основные проблемы выбора характеристик ЦВМ, вводимой в структуру управления, определяются непосредственно только особенностями исполняемого программного алгоритма [6–8]. Поскольку наряду с аппаратной частью от данного алгоритма очень сильно зависит быстродействие системы, выбор микропроцессорных средств невозможно осуществить в отрыве от задачи управления и ее алгоритмического обеспечения [8–13].

Простая и эффективная оценка возможности реализации вычислительных алгоритмов программ управления летательного аппарата на борту стала актуальной, так как она позволяет избежать потерь качества управления у проектируемых изделий вследствие введения запаса по быстродействию и закладки возможности совершенствования системы управления летательного аппарата на перспективу. Отсюда вытекает технически значимая задача подбора методики оценки быстродействия ЦВМ, которая применяется для использования оценки производительности конкретных типов БЦВМ, реализующих алгоритмы управления полетом.

Цель работы состоит в рассмотрении одного из способов решения указанной задачи.

Оценка производительности БЦВМ. При управлении сложными объектами, которыми являются БПЛА, микропроцессор БЦВМ поочередно обслуживает отдельные каналы управления [2, 12, 13], что может осуществляться по жесткой программе или по мере поступления заявок от отдельных каналов при возможности использования в последнем случае приоритетного обслуживания. Жесткая программа обслуживания каналов предусматривает постоянство периода дискретности, хотя в отдельных каналах он может быть разным. При обслуживании по гибкой программе период дискретности оказывается случайной величиной с некоторым математическим ожиданием и дисперсией. В результате работы подобных БЦВМ достигается высокое быстродействие и большая эксплуатационная гибкость.

В процессе развития вычислительной техники появилось несколько стандартных методик определения производительности различных типов ЦВМ. Они позволяют разработчикам осуществлять выбор между альтернативами на основе количественных показателей, что обеспечивает постоянный прогресс в данной области [14–16].

Единицей измерения производительности компьютера служит время (в секундах): компьютер, выполняющий тот же объем работы за меньшее время, является более «быстрым». Часто производитель-

ность измеряется как скорость появления некоторого числа событий в секунду, так что меньшее время подразумевает большую производительность [14].

Однако время можно определять различными способами. Наиболее простой из них связан с использованием астрономического времени, времени ответа (response time), времени выполнения (execution time) или прошедшего времени (elapsed time). Это задержка выполнения задания, включающая в себя практически все: работу процессора, обращения к памяти, ввод/вывод и накладные расходы операционной системы. Однако при работе в мультипрограммном режиме во время ожидания ввода/вывода для одной программы процессор может выполнять другую программу, и система необязательно будет минимизировать время выполнения конкретной программы.

Для измерения времени работы процессора с конкретной программой используется специальный параметр — время СР (CPU time) [17, 18], которое не включает в себя время ожидания ввода/вывода или время выполнения другой программы. Очевидно, что видимое время ответа является полным временем выполнения программы, а не временем СР. Время СР может далее делиться на время, потраченное СР непосредственно на выполнение программы и называемое пользовательским временем СР, и время СР, затраченное операционной системой на выполнение заданий, затребованных программой, и называемое системным временем СР.

В большинстве современных процессоров скорость протекания процессов взаимодействия внутренних функциональных устройств определяется не естественными задержками в этих устройствах, а задается единой системой синхросигналов, вырабатываемых некоторым генератором тактовых импульсов, работающим, как правило, с постоянной скоростью [8]. Дискретные временные события называются тактами синхронизации (clockticks), просто тактами (ticks), периодами синхронизации (clockperiods), циклами (cycles) или циклами синхронизации (clockcycles). Разработчики компьютеров обычно говорят о периоде синхронизации, который определяется либо своей длительностью (например 10 нс), либо частотой (например 100 МГц). Длительность периода синхронизации — величина, обратная частоте синхронизации.

Таким образом, время СР для некоторой программы можно выразить двумя способами: количеством тактов синхронизации для данной программы, умноженным на длительность такта синхронизации, либо количеством тактов синхронизации для данной программы, деленным на частоту синхронизации.

Важная характеристика, часто упоминаемая в современных работах, — это среднее количество тактов синхронизации на одну команду — CPI (clockcycles per instruction) [8]. При известном количестве

выполняемых команд в программе этот параметр позволяет быстро оценить время СР для данной программы.

Производительность времени СР зависит от трех параметров: такта (или частоты) синхронизации, среднего количества тактов на команду и количества выполняемых команд. Ни один из указанных параметров невозможно изменить изолированно от другого, поскольку базовые технологии, используемые для изменения каждого из этих параметров, взаимосвязаны: частота синхронизации определяется технологией аппаратных средств и функциональной организацией процессора; среднее количество тактов на команду зависит от функциональной организации и архитектуры системы команд, а количество выполняемых в программе команд определяется архитектурой системы команд.

В действительности единственной подходящей и надежной единицей абсолютно точного измерения производительности является время выполнения реальной микропрограммы на конкретной ЦВМ. Но для проведения оценки этой производительности корректно использовать стандартные единицы измерения.

В настоящее время широко распространены две альтернативные единицы измерения производительности процессора [8, 18]:

MIPS — один миллион команд в секунду (по отношению ко времени выполнения);

MFLOPS — один миллион чисел — результатов вычислений с плавающей точкой в секунду, или один миллион элементарных арифметических операций над числами с плавающей точкой, выполненных в секунду.

В общем случае MIPS — это скорость операций в единицу времени, т. е. для любой данной программы отношение количества команд в программе к времени ее выполнения. Производительность можно определить как обратную к времени выполнения величину, причем более быстрые ЦВМ при этом будут иметь более высокий рейтинг MIPS. Сравнение по MIPS компьютеров, имеющих разные системы команд, затруднено, поскольку MIPS зависит от набора команд процессора.

Измерение производительности ЦВМ при решении научно-технических задач, в которых существенно используется арифметика с плавающей точкой, обычно оценивается с помощью рейтинга MFLOPS.

Как единица измерения MFLOPS предназначена для оценки производительности только операций с плавающей точкой и поэтому не может применяться вне этой ограниченной области. Оценка производительности БЦВМ, реализующей алгоритм прямого самонаведения с функциональным упреждением, входит в эту область задач.

Рейтинг MFLOPS непосредственно зависит от архитектуры процессора и типа выполняемой программы. Он базируется на количестве выполняемых операций, а не команд. Одна и та же программа, работающая на различных компьютерах, будет выполнять различное количество команд, но одно и то же количество операций с плавающей точкой. Именно поэтому рейтинг MFLOPS предназначался для справедливого сравнения различных ЦВМ между собой.

При использовании рейтинга MFLOPS необходимо учитывать несколько факторов, и прежде всего тот факт, что наборы операций с плавающей точкой не совместимы на различных компьютерах. Недостаток также состоит в изменении рейтинга MFLOPS не только на совокупности целочисленных операций и операций с плавающей точкой, но и быстрых и медленных операций с плавающей точкой.

Такое положение обусловило разработку и использование тестов, ориентированных на оценку вычислительных систем с учетом специфики их предполагаемого использования. Поэтому оценка процессоров с разной архитектурой основана на создании тестовой совокупности из типовых операторов, влияющих на производительность процессоров.

Наиболее часто MFLOPS как единица измерения производительности используется при проведении контрольных испытаний на тестовом пакете «Ливерморские циклы», созданном для оценки производительности вычислительных машин еще в середине 1960-х гг. [14].

«Ливерморские циклы» состоят из фрагментов программ для решения численных задач на языке Fortran, использовавшихся в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса в США (ЛНЛ). В этих фрагментах применяются различные вычислительные алгоритмы: сеточные, последовательные, волновые, что существенно относительно соответствия вычислительных и аппаратных структур. Соответствие одной структуры другой должно обеспечить максимальную эффективность вычислений. При использовании векторных и параллельных машин важным фактором, определяющим эффективность работы для конкретного приложения, является коэффициент векторизуемости алгоритма. На «Ливерморских циклах» этот коэффициент составляет от 0 до 100 %, что подтверждает возможность их применения для широкого круга вычислительных систем [4].

Применение методики MFLOPS заключается в том, чтобы взять «каноническое», или «нормализованное», число операций с плавающей точкой из исходного текста программы и затем поделить его на время выполнения.

Представим некоторые рекомендации по определению количества «нормализованного» числа операций с плавающей точкой (данные ЛНЛ):

- для операций сложения, вычитания, сравнения, умножения — одна нормализованная операция (тип *a*);
- для операций деления, извлечения квадратного корня — четыре нормализованные операции (тип *b*);
- для операций, связанных с экспоненциальными или тригонометрическими функциями, — восемь нормализованных операций (тип *v*).

Проведем анализ работы БЦВМ с микропроцессорами фирмы Intel: 80386, 80486, Pentium 120. При определении производительности предъявим к тестируемой системе следующие требования:

- дублирование всех вычислений внутри БЦВМ для обеспечения живучести системы;
- использование внутренней операционной системой БЦВМ 1/4 общей вычислительной мощности для выполнения своих функций;
- соответствие интервала дискретизации БЦВМ 10^{-3} с.

Таким образом, вычислительная мощность процессора, используемая для выполнения алгоритма, не должна превышать 3/8 номинала, т. е. используемый рейтинг MFLOPS соответствует 3/8 его номинального значения для тестируемого микропроцессора. Для получения тестовых характеристик процессоров MFLOPS используются данные ЛНЛ, рассчитанные с помощью тестового пакета «Ливерморские циклы» (табл. 1).

Таблица 1

Рейтинг MFLOPS для различных типов процессоров фирмы Intel

Процессор	MFLOPS	MFLOPS (с учетом требований к БЦВМ)
Intel 386DX 20 МГц	1,60	0,60
Intel 486DX2 66 МГц	30,36	11,39
Intel Pentium 120 МГц	150,7	56,51

В качестве примера воспользуемся алгоритмом прямого самонаведения с функциональным упреждением, разработанным в МГТУ им. Н.Э. Баумана [19–22], адаптированным для модели баллистической ракеты малой дальности. Анализ алгоритма показывает достаточную простоту определения «нормализованного» числа операций в соответствии с рекомендациями ЛНЛ (табл. 2).

Таблица 2

«Нормализованное» число операций, соответствующее разработанному алгоритму самонаведения с функциональным упреждением

Алгоритм	Без учета движения цели		С учетом движения цели	
	Тип операции	Число нормализованных операций	Тип операции	Число нормализованных операций
Алгоритм выбора параметров функционального упреждения	<i>a</i>	59	<i>a</i>	111
	<i>b</i>	1	<i>b</i>	15
	<i>v</i>	0	<i>v</i>	4

Алгоритм	Без учета движения цели		С учетом движения цели	
	Тип операции	Число нормализованных операций	Тип операции	Число нормализованных операций
Алгоритм корректировки коэффициентов бортового координатора цели	<i>a</i>	4	<i>a</i>	77
	<i>b</i>	0	<i>b</i>	10
	<i>v</i>	0	<i>v</i>	0
Алгоритм мгновенного прицеливания	<i>a</i>	12	<i>a</i>	38
	<i>b</i>	1	<i>b</i>	3
	<i>v</i>	3	<i>v</i>	10
Алгоритм системы стабилизации	<i>a</i>	30	<i>a</i>	30
	<i>b</i>	0	<i>b</i>	0
	<i>v</i>	4	<i>v</i>	4

С учетом стандартных операторов определим общее «нормализованное» число операций (момент начала самонаведения). Для разработанного алгоритма — 416, в том числе конкретно по алгоритмам:

Алгоритм выбора параметров функционального упреждения	210
Алгоритм корректировки коэффициентов бортового координатора цели	117
Алгоритм мгновенного прицеливания	51
Алгоритм системы стабилизации	38

С учетом интервала дискретизации 10^{-3} с переведем полученный результат в MFLOPS:

$$\text{MFLOPS} = \frac{416 \cdot 10^3}{10^6} = 0,416.$$

В штатном режиме общее число операций соответствует 38, тогда

$$\text{MFLOPS} = \frac{38 \cdot 10^3}{10^6} = 0,038.$$

Исходя из приведенных выше данных разработанный алгоритм прямого самонаведения пригоден для реализации в современных БЦВМ-386/486 и БЦВМ класса «Багет».

При снятии ограничений, таких, как дублирование вычислений и уменьшение интервала дискретизации в момент начала самонаведения, например до 10^{-2} с, с последующим восстановлением интервала до 10^{-3} с, можно уменьшить в 20 раз требуемую величину MFLOPS в наиболее нагруженный вычислительный момент, а в штатном ре-

жиме работы — в 2 раза. Следовательно, возможно применение разработанного алгоритма на БЦВМ устаревших типов.

Заключение. Предлагаемая методика позволяет достаточно просто и эффективно с малыми временными затратами определить требуемые мощности БЦВМ для реализации того или иного алгоритма управления движущимся объектом. Возможно резервировать в процентном соотношении распределение мощности БЦВМ на внутренние операционные задачи и выполнение непосредственно алгоритмов управления.

На основе описанной оценочной методики выработан комплекс рекомендаций по совершенствованию структуры алгоритмов управления, оценке возможности упрощения таких алгоритмов без существенного снижения качества управления, определению периодов цикла вычислительных операций, заложенных в управляющем алгоритме.

Таким образом, осуществляется достаточно простая и наглядная оценка разнотипных БЦВМ на предмет соответствия конкретному алгоритмическому обеспечению, что позволяет создать эффективную систему управления с использованием адаптированной под бортовые вычислительные задачи БЦВМ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лысенко Л.Н. *Наведение баллистических ракет*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 445 с.
- [2] Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. *Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2003, 280 с.
- [3] Бесекерский В.А., Изранцев В.В. *Системы автоматического управления с микроЭВМ*. Москва, Наука, 1987, 320 с.
- [4] Солунин В.Л., Гурский Б.Г., Лющанов М.А., Спиринов В.Л. и др. *Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов Сухопутных войск*. Солунин В.Л., ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 328 с.
- [5] Ганин С.М., Карпенко А.В., Колногоров В.В., Петров Г.Ф. *Беспилотные летательные аппараты*. Санкт-Петербург, Невский бастион, 1999, 163 с.
- [6] Макаров Д.А., Розенберг М.Я., Шильников А.Б. О факторах риска в процессе разработки программного обеспечения. *Вестник ЮУрГУ*, 2009, № 37 (170), с. 85–92.
- [7] Кутومانов А.Ю., Кудрявцев С.И. Результаты анализа реальной работоспособности АСН по информации от различных КА применительно к разработке системы высокоточного управления спуском перспективного пилотируемого космического корабля. *Космонавтика и ракетостроение*, 2015, № 4 (83), с. 142–147.
- [8] Янчик А.Г., Квашин А.Г. Научно-технические принципы построения программных комплексов для решения задач обработки измерений от автономной системы радионавигации КА в баллистическом центре НАКУ. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2014, т. 1, вып. 1, с. 47–54.

- [9] Королев Л.Н. *Архитектура электронных вычислительных машин*. Москва, Научный мир, 2005, 272 с.
- [10] Волков Е.А. *Численные методы*. 5-е изд. Санкт-Петербург, Лань, 2008, 256 с.
- [11] Алабова Н.П., Брюханов Н.А., Дядькин А.А. и др. Роль компьютерного моделирования и физического эксперимента в исследованиях аэрогазодинамики ракетно-космических систем в процессе проектирования. *Космическая техника и технологии*, 2014, № 3, с. 14–21.
- [12] Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. *Параллельные вычисления*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2002, 608 с.
- [13] Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н., Пролетарский А.В. Аналитический синтез законов управления боковым движением летательного аппарата. *Авиационная техника. Известия вузов*, 2015, № 3, с. 14–20.
- [14] Шнитман В. *Современные высокопроизводительные компьютеры*. Информационно-аналитические материалы Центра информационных технологий, Москва, 1996, 252 с.
- [15] Казаков Г.В. Метод оценки показателя надежности специального программного обеспечения комплексов средств подготовки данных по результатам испытаний на этапе разработки. *Тр. МИТ*, 2015, т. 15, ч. 1, с. 102–113.
- [16] Лейжен Д., Холл Дж. Оптимизация управляемого кода для многоядерных компьютеров. *MSDN Magazine*, 2007, № 10.
URL: <https://msdn.microsoft.com/en-us/magazine/ee310108.aspx>
- [17] Галактионов В.С., Знак В.А., Знак Н.Е., Казаков Г.В., Котяшев Н.Н., Сидоров А.В. О принципах испытания программного обеспечения АСУ двойного назначения с гибкими показателями эффективности. *Стратегическая стабильность*, 2009, № 3, с. 59–66.
- [18] Гук М. *Процессоры Intel от 8086 до Pentium II*. Санкт-Петербург, Питер, 1997, 224 с.
- [19] Грабин В.В., Клишин А.Н. Некоторые особенности организации процесса цифрового моделирования ЛА по сложным траекториям. *Оборонная техника*, 2003, № 1–2, с. 67–71.
- [20] Клишин А.Н. Исследование принципиальной возможности создания алгоритмов наведения летательных аппаратов на подвижные цели методом прямого самонаведения с функциональным упреждением, достаточно приближенным к методу пропорционального сближения. *XXVI Гагаринские чтения. Тез. докл.* Москва, РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2000, с. 77.
- [21] Клишин А.Н. Способ восстановления постоянных параметров функционального упреждения по краевым значениям на борту летательного аппарата. *XXIX Гагаринские чтения. Тез. докл.* Москва, РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2003, с. 98.
- [22] Клишин А.Н., Швыркина О.С. Алгоритм выбора коэффициентов пропорционального метода наведения летательного аппарата от расположения цели. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 9.
DOI: 10.18698/2308-6033-2016-9-1534

Статья поступила в редакцию 06.03.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Илюхин С.Н., Клишин А.Н. Оценка производительности бортового вычислителя беспилотного летательного аппарата при реализации процесса наведения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 7.
<https://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1781>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLII Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 23–26 января 2018 года

Илюхин Степан Николаевич — ассистент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных и научно-популярных работ в области баллистики, динамики полета, управления движением летательных аппаратов и истории оружия.
e-mail: iljuchin.stepan@bmstu.ru

Клишин Алексей Николаевич — доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных и научно-популярных работ в области баллистики, динамики полета, управления движением летательных аппаратов и истории оружия.
e-mail: alkl@mail.ru

On-board computer efficiency evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) when implementing the targeting process

© S.N. Ilyukhin, A.N. Klishin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article considers the methods for estimating on-board digital computers performance, which are used in the modern unmanned aerial vehicles (UAV) control circuits, since the entire control system efficiency depends on the processor speed. The paper analyses various approaches to the on-board computers speed evaluation. Evaluation techniques, carried out with the MFLOPS processor, have become widespread, and they are of particular interest. According to these evaluation methods, we developed a set of recommendations to improve the control algorithms structure, to assess the opportunities for simplification without significantly reducing the control efficiency, and to determine the computational operations frequency in the algorithm. The article clearly illustrates the operation process by the example of the evaluation of the on-board computer performing the direct homing with functional anticipation program.

Keywords: *on-board computer, digital computer, MFLOPS, control algorithm, functional anticipation*

REFERENCES

- [1] Lysenko L.N. *Navedenie ballisticheskikh raket* [Guidance of ballistic missiles]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 445 p.
- [2] Krasilschikov M.N., Sebryakov G.G. *Upravlenie i navedenie bespilotnykh manevrennykh letatelnykh apparatov na osnove sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy* [Control and guidance of unmanned maneuverable aircraft based on modern information technology]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2003, 280p.
- [3] Besekersky V.A., Izrantsev V.V. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s mikro EVM* [Automated control systems with a microcomputer]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 320 p.
- [4] Solunin V.L., Gursky B.G., Lyushanov M.A., Spirin V.L. et al. *Osnovy teorii sistem upravleniya vysokotochnykh raketnykh kompleksov sukhoputnykh voysk* [Fundamentals of the theory of control systems for high-precision missile systems of the Ground Forces]. Moscow, BMSTU Publ., 2001, 328 p.
- [5] Ganin S.M., Karpenko A.V., Kolnogorov V.V., Petrov G.F. *Bespilotnye letatelnye apparaty* [Unmanned aerial vehicles]. St. Petersburg, Nevsky Bastion Publ., 1999, 163 p.
- [6] Makarov D.A., Rozenberg M.Ya., Shilnikov A.B. *Vestnik YUUrGU — Bulletin of the South Ural State University*, 2009, no. 37 (170), pp. 85–92.
- [7] Kutomanov A.Yu, Kudryavtsev S.I. *Kosmonavtika i raketostroenie — Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2015, no. 4 (83), pp. 142–147.
- [8] Yanchik A.G., Kvashin A.G. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy — Rocket Space Device Engineering and Information Systems*, 2014, vol. 1 (1), pp. 47–54.
- [9] Korolev L.N. *Arkhitektura elektronnykh vychislitelnykh mashin* [Architecture of electronic computers]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2005, 272 p.
- [10] Volkov E.A. *Chislennyye metody — Numerical methods*. Electronic Library System Lan, no. 5. St. Petersburg, 2008, 256 p.

- [11] Alabova N.P., Bryukhanov N.A., Dyadkin A.A., et al. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2014, no. 3, pp. 14–21.
- [12] Voevodin V.V., Voevodin V.V. *Parallelnye vychisleniya* [Parallel computing]. BHV-Peterburg Publ., 2002, 608 p.
- [13] Zubov N.E., Mikrin E.A., Ryabchenko V.N., Proletarsky A.V. *Aviatsionnaya tekhnika. Izvestiya vuzov — Russian Aeronautics. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*, 2015, no. 3, pp. 14–20.
- [14] Shnitman V. *Sovremennye vysokoproizvoditelnye kompyutery* [Modern high-performance computers]. Information-analytical materials. Center for Information Technologies Publ., 1996, 252 p.
- [15] Kazakov G. V. Metod otsenki pokazatelya nadezhnosti spetsialnogo programmnogo obespecheniya kompleksov sredstv podgotovki dannykh po rezul'tatam ispytaniy na etape razrabotki [Method for estimating the reliability index of special software for data-preparation facilities based on test results at the development stage]. In: *Trudy Moskovskogo instituta teplotekhniki* [Proceedings of Moscow Institute of Heat Engineering]. Moscow, MIT Publ., 2015, vol. 15, part 1, pp. 102–113.
- [16] Lejen D., Hall J. *MSDN Magazine*, 2007, no. 10.
Available at: <https://msdn.microsoft.com/en-us/magazine/ee310108.aspx>
- [17] Galaktionov V.S., Znak V.A., Znak N.E., Kazakov G.V., Kotyashov N.N., Sidorov A.V. *Strategicheskaya stabilnost — Strategic Studies*, 2009, no 3, pp. 59–66.
- [18] Guk M. *Protsessory Intel ot 8086 do Pentium II* [Intel processors from 8086 to Pentium II]. St. Petersburg, Piter Publ., 1997, 224 p.
- [19] Grabin V.V., Klishin A.N. *Oboronnaya tekhnika – Science and Education*, BMSTU Publ., 2003, no. 1–2, pp. 67–71.
- [20] Klishin A.N. Issledovanie printsipialnoy vozmozhnosti sozdaniya algoritmov navedeniya letatelnykh apparatov na podvizhnye tseli metodom pryamogo samonavedeniya s funktsionalnym uprezhdeniem, dostatochno priblizhennym k metodu proporsionalnogo sblizheniya [The study of the principle possibility of creating algorithms for the mobile target guidance of flying vehicles by the method of direct homing with functional anticipation, sufficiently approximated to the method of proportional approach]. *XXVI Gagarinskie chteniya. Tez. doklada* [XXVI Gagarin Science Conference. Theses.]. Moscow, Moscow Aviation Institute, 2000, p. 77.
- [21] Klishin A.N. Sposob vosstanovleniya postoyannykh parametrov funktsionalnogo uprezhdeniya po kraevym znacheniyam na bortu letatel'nogo apparata [The method of restoring the constant parameters of the functional anticipation along the extreme values on board the aircraft]. *XXVI Gagarinskie chteniya. Tez. doklada* [XXVI Gagarin Science Conference. Theses.]. Moscow, Moscow Aviation Institute, 2003, p. 98.
- [22] Klishin A.N., Shvyrkina O.S. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss 9.
DOI: 10.18698/2308-6033-2016-9-1534

Ilyukhin S.N., Assistant, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State technical University. Author of over 20 scientific and popular science works in the field of ballistics, flight dynamics, aircraft traffic control and weapon history. e-mail: iljuchin.stepan@bmstu.ru

Klishin A.N., graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1999, Assoc. Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 150 scientific and popular science works in the field of ballistics, flight dynamics, control of the movement of aircraft and weapons history. e-mail: alkl@mail.ru