

## ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 004.02+004.8

### МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ МОНИТОРИНГЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ И СЕНСОРНЫХ ПЛАТФОРМ

© 2022 г. Н. С. Акиншин<sup>а</sup>, А. А. Потапов<sup>б, \*</sup>, Е. И. Минаков<sup>с</sup>, А. В. Тимошенко<sup>д</sup>, А. Ю. Перлов<sup>д</sup>

<sup>а</sup>Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,  
ул. Демонстрации, 36, Тула, 300034 Российская Федерация

<sup>б</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

<sup>с</sup>Тульский государственный университет,  
просп. Ленина, 92, Тула, 300012 Российская Федерация

<sup>д</sup>НИУ «МИЭТ»,  
пл. Шокина, 1, Зеленоград, 124498 Российская Федерация

\*E-mail: potapov@cplire.ru

Поступила в редакцию 17.08.2021 г.

После доработки 22.10.2021 г.

Принята к публикации 16.11.2021 г.

Предложен метод оценки производительности вычислительного комплекса, осуществляющего сбор, хранение и обработку данных о техническом и функциональном состоянии компонент радиолокационных станций и сенсорных сетей в интересах прогнозирования их характеристик. Показано, что решение задачи оперативного и высокоточного прогноза значений функциональных характеристик радиолокационных станций наиболее эффективно решать на специализированном вычислительном комплексе, который должен не только осуществлять прогноз технического состояния функциональных систем станций, но и обеспечивать решение задач информационной поддержки принятия решений обслуживающим персоналом по обеспечению заданных характеристик радиолокационных станций и сенсорных платформ.

DOI: 10.31857/S0033849422050011

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из важных задач при создании платформ для сбора, анализа, интерпретации сенсорной информации для большого числа одновременных подключений сенсоров, включая робототехнические комплексы, с ограничением времени интеграции в систему является определение требований к производительности вычислительного комплекса, входящего в состав таких платформ. В зависимости от их назначения данные требования могут иметь жесткие ограничения как по стоимости, так и по массогабаритным характеристикам, что не позволяет применять вычислители с «большим запасом» по производительности.

Одним из примеров таким платформ является автоматизированная информационная система поддержки управления эксплуатацией современных цифровых радиолокационных систем (РЛС), предназначенная для совершенствования процессов управления эксплуатацией, одной из основных задач которой является высокоточный и

оперативный анализ и прогноз изменения функциональных характеристик систем, входящих в состав РЛС, с горизонтом прогнозирования не менее 30 мин.

Актуальность разработки технологий и методов управления эксплуатацией подтверждается также Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 г. [1], в числе приоритетных направлений которой определено прогнозирование отказов оборудования и его превентивное техническое обслуживание.

Высокоточный и оперативный анализ и прогноз функциональных характеристик сложных систем, к которым относятся современные радиолокационные станции дальнего обнаружения (РЛС ДО), в значительной мере определяется применяемыми алгоритмами, а также возможностями соответствующего специализированного вычислительного комплекса, входящего в состав контрольно-диагностической системы РЛС, являющейся частью информационной системы поддержки управления эксплуатацией. Возможности вычислительного

комплекса определяются в первую очередь его производительностью, под которой следует понимать объем информации, обрабатываемый с заданной вероятностью по заданным алгоритмам за определенное время.

## 1. ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Вопросы оценки производительности вычислительных комплексов исследуются еще с 70-х годов XX в. [2, 3], но несмотря на то, что получены основательные методические и теоретические результаты, далеко не все вопросы, возникающие в практической реализации методик оценки быстродействия сложных систем управления, являются успешно разрешенными. Поэтому и в настоящее время задача оценки производительности вычислительных комплексов важна и актуальна.

Под производительностью понимается [4, 5] характеристика вычислительного комплекса, определяющая количество вычислительной работы, выполняемой комплексом за единицу времени. В настоящее время отсутствует как единая общепринятая единица измерения вычислительной работы, так и методика оценки производительности, на которую влияет ряд факторов, объединяемых в пять групп [6, 7]:

- аппаратные средства;
- сетевые протоколы;
- программные средства;
- широкополосный трафик;
- ошибочные ситуации.

С точки зрения цели определение производительности сводится к сравнительной оценке существующих систем и прогнозированию производительности, а любой метод [8, 9] можно представить как последовательность отдельных шагов, зависящих от ряда факторов.

**Шаг 1.** Выбор параметров, по которым вычисляется оценка.

**Шаг 2.** Анализ структуры системы, ее загрузки и определение связи с производительностью. В рамках данного шага строится модель вычислительного комплекса, позволяющая смоделировать потребление прикладным процессом отдельных ресурсов.

**Шаг 3.** Выбор параметров рабочей нагрузки вычислительного комплекса, а также построение модели производительности, для чего используются модели рабочей нагрузки и вычислительного комплекса.

Рассчитаем значение системной производительности. Для количественных оценок используются понятия номинальной и системной производительности [10].

Номинальная производительность – потенциальные возможности отдельных устройств, которые не могут быть использованы полностью, определяется:

$$V_H = (v_1, v_2, \dots, v_n), \quad (1)$$

где  $v_i$  – быстродействие  $i$ -го устройства вычислительного комплекса.

Показателем использования  $i$ -го устройства в процессе работы системы является загрузка, которая может быть определена следующим отношением [11]:

$$p_i = T_i/T, \quad (2)$$

где  $T_i$  – время, в течение которого  $i$ -е устройство работало,  $T$  – общая продолжительность работы системы.

Системная производительность  $V_C$  учитывает совместную работу устройств под управлением операционной системы для определенного класса задач:

$$V_C = (p_1V_1, p_2V_2, \dots, p_nV_n). \quad (3)$$

Оценка значений показателей  $p_i$  может быть получена на основе статистических данных по результатам моделирования. Поэтому показатель системной производительности для вычислительных машин используется редко [12]. Чаще всего он используется как средство для количественного сопоставления производительности вычислительных машин.

До настоящего времени не разработаны универсальные методы оценки производительности вычислительных комплексов [13–16]. Существующие методы оценки производительности опираются на архитектуру вычислительного комплекса, где каждый системный компонент имеет свое выражение в переменных и в структурах ядра операционной системы. Набор значений переменных характеризует состояние системы в определенный момент времени. Исследуя изменение этих характеристик, можно определить ее поведение на любом временном интервале [17–21].

Анализ работ [22–24] показал, что в настоящее время методический аппарат по обоснованию требований к характеристикам вычислительных комплексов диагностических систем зачастую излишне теоретизирован и учитывает множество факторов, которые при решении инженерных задач учесть либо затруднительно, либо вовсе невозможно [25].

В данной работе предлагается метод оценки производительности вычислительного комплекса контрольно-диагностической системы автоматизированной информационной системы поддержки управления эксплуатацией современных цифровых РЛС, в основу которого положен анализ потока данных.

## 2. ОПИСАНИЕ КОНТРОЛЬНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Основой контрольно-диагностической системы (КДС) РЛС ДО является аппаратно-программный комплекс (АПК) сбора, обработки, анализа, отображения и хранения информации о функционировании изделия и его составных частей. Кроме того, в состав КДС входят каналы связи, элементы контроля (ЭК) и др.

Основным назначением КДС является контроль технических характеристик составных частей РЛС ДО всех уровней разукрупнения (от типового элемента замены до частотно-зависимой части (ЧЗЧ)) с целью их непрерывного поддержания в заданных пределах.

Перечислим основные задачи КДС.

1. Оперативное и непрерывное получение достоверной информации об изменении основных параметров РЛС ДО, влияющих на ее потенциал, для решения задачи прогнозирования энергетического потенциала РЛС ДО.

2. В автоматизированном режиме поиск места и определение причин возможного отказа (неисправности) всех составных частей РЛС.

3. Информирование обслуживающего персонала о текущем техническом состоянии изделия и его составных частей.

Основным источником информации для КДС является ЭК, который представляет собой датчик (двоичный, цифровой, аналоговый), размещаемый на составных частях РЛС и постоянно измеряющий соответствующий параметр.

АПК КДС представляет собой распределенную информационную систему, включающую следующие структурные элементы: модули ввода/вывода (МВВ); программируемые логические контроллеры (ПЛК), вычислительный комплекс (ВК), автоматизированное рабочее место оператора (АРМ) оператора. Структура КДС в общем виде представлена на рис. 1.

Уровень сбора данных, как следует из названия, предназначен для сбора первичных данных с элементов контроля. Основная задача данного уровня – обеспечение согласования между полевым и уровнем контроля и анализа данных. Здесь также можно проводить предварительный анализ поступающих данных, но данная функция не является обязательной.

Анализ данных осуществляется на верхнем уровне системы. Основным элементом данного уровня является вычислительный комплекс, производительность которого определяет вычислительные возможности КДС.

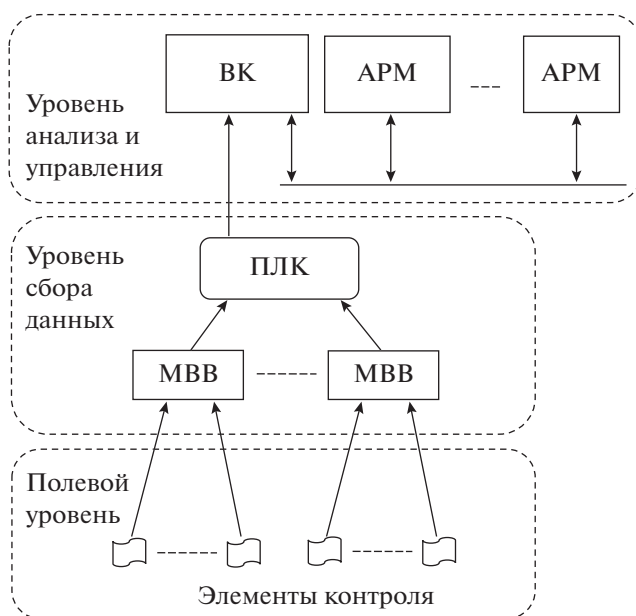


Рис. 1. Структура контрольно-диагностической системы РЛС ДО: модули ввода/вывода (МВВ), программируемые логические контроллеры (ПЛК); вычислительный комплекс (ВК); автоматизированное рабочее место оператора (АРМ).

Под производительностью в данном случае понимается объем данных, который должен быть гарантированно обработан за заданное время:

$$p(f_t(A(M)) < \tau) \geq p_0, \tag{4}$$

где  $p$  – вероятность;  $f_t$  – функция определения времени обработки объема данных  $M$  некоторым заданным алгоритмом  $A$ ,  $p_0$  – заданная вероятность (как правило,  $p_0 \geq 0.95$ ).

Поток информации от ЭК является основной нагрузкой на каналы связи и вычислительные узлы и формирует массив данных для обработки. Каждое сообщение от ЭК является кодограммой универсального формата и занимает около 100 байт. При этом число ЭК в изделии может быть более 50000 единиц, что обуславливает большой поток информации, поступающей в реальном времени в АПК.

Предварительные оценки объемов данных о техническом состоянии систем современных РЛС показали, что в среднем за сутки объем собираемых данных составляет около 20 Гбайт.

## 3. МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Для оценки производительности вычислительного комплекса на основе анализа функциональной схемы РЛС, как правило, требуется разраба-

тывать структурно-логическую схему выполнения необходимых операций вычисления, оценивать потенциальную нагрузку и трудоемкость каждой из операций, выполняемых на вычислительном комплексе.

Как отмечено выше, в настоящее время не существует единых подходов к оценке производительности, равно как и не существует единых единиц измерения, но, тем не менее, производительность любой вычислительной системы может быть определена двумя основными характеристиками:  $v$  – быстродействие вычислительного комплекса;  $s$  – пропускная способность каналов связи.

Следует отметить, что не зависимо от сложности топологии сети передачи данных, определяющей каналы связи, оценка параметра  $s$  должна осуществляться для наиболее сложного (нагруженного) случая.

Как известно, одной из основных единиц измерения быстродействия любого вычислительного устройства является MIPS – million instruction per second (миллион операций в секунду) или FLOPS – floating point operation per second (количество операций с плавающей точкой в секунду).

В данном случае в качестве единицы измерения быстродействия предлагается принять количество элементарных операций в единицу времени. В качестве элементарной операции целесообразно использовать любую, сколь угодно малую часть алгоритма, время выполнения которой на вычислительном комплексе постоянно. Для перехода к иным единицам измерения, необходимо это значение умножить на соответствующий коэффициент.

В качестве единицы измерения пропускной способности каналов связи предлагается использовать количество байт, передаваемых по линиям связи в единицу времени. Единицей времени для обеих величин является секунда.

Для простоты рассуждений и вычислений предлагается следующее допущение: быстродействие вычислительного комплекса определяется с учетом времени обращения к памяти, необходимое для выполнения вычислительных операций. Пропускная способность каналов связи рассчитывается с учетом времени обращения к дисковым устройствам.

Таким образом, для определения требуемой производительности АПК КДС, т.е. выполнения требования (4), необходимо рассчитать значения параметров  $v$  и  $s$  для наиболее сложного (нагруженного) режима эксплуатации.

В общем случае для расчета требуемой пропускной способности канала связи можно воспользоваться выражением

$$S = M/kT, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент загрузки каналов связи,  $M$  – передаваемый объем данных,  $T$  – время.

Коэффициент загрузки каналов связи определяется топологией сети, используемыми протоколами, методом доступа к каналам связи. В среднем для сетей, построенных по топологии “Звезда”, использующей протокол канального уровня Ethernet, коэффициент  $k = 0.5$ , что соответствует высокому уровню загрузки сети и характеризует наиболее нагруженный режим работы.

Пусть обрабатываемый алгоритм представляет собой множество элементарных операций  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_M\}$  с временем выполнения  $T_1 = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M\}$ , при этом отдельные операции могут выполняться циклически  $q$  раз.

Тогда требуемое быстродействие вычислительного комплекса может быть рассчитано по следующей формуле:

$$v = \frac{n + \sum_{j=1}^m q_j}{T_1 + T_2}, \quad (6)$$

где  $n$  – количество операций без циклов,  $m$  – количество циклических операций,  $q_j$  – кратность выполнения  $i$ -й циклической операции,

$$T_1 = \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad T_2 = \sum_{j=1}^m \frac{p_j^c}{1 - p_j^c} \tau_j$$

– время выполнения операций без циклов и время выполнения циклических операций соответственно,  $p_j^c = [0, 1)$  – вероятность выполнения  $j$ -й циклической операции. Следует отметить, что  $p_j^c = 1$  соответствует бесконечному циклу и приведет к закликиванию программы.

Для моделирования работы АПК КДС предлагается использовать теорию систем массового обслуживания [26, 27]. КДС представляется в виде сети массового обслуживания (СМО), в узлах которой находятся элементы контроля, характеризующиеся следующим множеством:

$$h^j = \{\lambda^j, p^j, m^j\}, \quad (7)$$

где  $h^j$  – поток данных элемента контроля  $j$ -го типа,  $\lambda^j$  – интенсивность потока данных (количество пакетов данных, передаваемых в единицу времени) элемента контроля  $j$ -го типа,  $m^j$  – объем данных (в байтах), передаваемых в одном пакете данных от элемента контроля  $j$ -го типа,  $p^j$  – вероятность передачи данных элементом контроля  $j$ -го типа.

На рис. 2 представлена структура аппаратно-программного комплекса в виде СМО.

Как сказано выше, объем данных, подлежащих обработке в АПК КДС формируется ЭК, которых, в общем случае, может быть нескольких

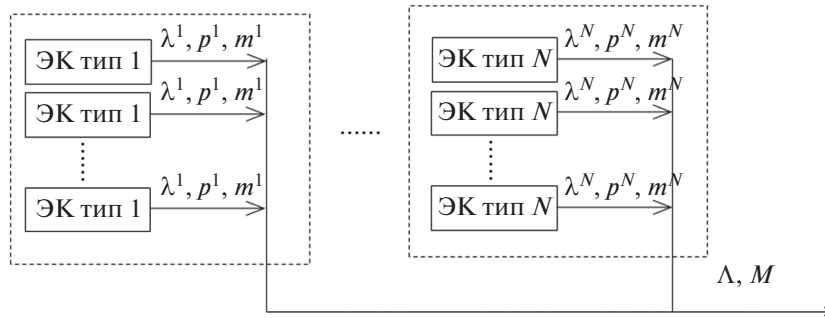


Рис. 2. Представление аппаратно-программного комплекса как сети массового обслуживания (ЭК – элемент контроля).

различных типов, определяемых структурой и назначением контролируемого объекта.

Учитывая, что количество различных типов ЭК конечно, то для расчета полного объема данных, подлежащих обработке в АПК КДС, можно воспользоваться выражением

$$M = T \sum_{j=1}^N \sum_i^{n^j} p^j \lambda_i^j m_i^j, \quad (8)$$

где  $M$  – объем данных, который необходимо обработать в АПК КДС за интервал времени  $T$ ;  $N$  – количество типов элементов контроля;  $n^j$  – количество элементов контроля  $j$ -го типа.

Тогда выражение (5) примет вид

$$s = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^N \sum_i^{n^j} p^j \lambda_i^j m_i^j. \quad (9)$$

Очевидно, что поступающие данные должны обрабатываться с интенсивностью не ниже чем

$$\lambda^v = \max \{ \lambda^j | \forall j = 1, \dots, N \}. \quad (10)$$

В итоге предложенная математическая модель позволяет сформулировать метод оценки производительности вычислительного комплекса, включающий следующие этапы.

*Этап 1.* Описание параметров элементов контроля каждого типа в виде множества (7).

*Этап 2.* Расчет общего объема поступающих данных за заданный промежуток времени с использованием выражения (8).

*Этап 3.* Определение требуемой пропускной способности каналов связи с использованием выражения (9). Определение интенсивности обработки данных.

*Этап 4.* Расчет требуемой производительности вычислительного комплекса с использованием выражения (6).

*Этап 5.* Обобщение полученных результатов расчета. Формирование требований к АПК КДС.

#### 4. РАСЧЕТНЫЙ ПРИМЕР

Приведем пример оценки производительности вычислительного комплекса на основании предложенного метода.

Пусть имеется пять типов элементов контроля со следующими характеристиками:

$$\begin{aligned} h^1 &= \{5 \ 0.9 \ 100\}, \quad n^1 = 1000, \\ h^2 &= \{7 \ 0.85 \ 200\}, \quad n^2 = 1500, \\ h^3 &= \{9 \ 0.95 \ 300\}, \quad n^3 = 1000, \\ h^4 &= \{6 \ 0.85 \ 200\}, \quad n^4 = 2000, \\ h^5 &= \{7 \ 0.9 \ 500\}, \quad n^5 = 4000. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда общее количество данных, поступивших за период, например,  $T = 1$  с и подлежащих обработке, будет равно (8):

$$\begin{aligned} M &= 100(1500 \times 7 \times 0.85 \times 200 + \\ &+ 1500 \times 9 \times 0.95 \times 300 + \\ &+ 1000 \times 9 \times 0.95 \times 300 + 2000 \times 6 \times 0.85 \times 200 + \\ &+ 4000 \times 7 \times 0.9 \times 500) = \\ &= 22837500 \text{ байт} \approx 21.78 \text{ Мбайт}. \end{aligned}$$

Пропускная способность каналов связи определяется по выражению (9):

$$s = 43.56 \text{ Мбайт/с} = 348.48 \text{ Мбит/с}.$$

Данный результат показывает, что сеть с пропускной способностью 100 Мбит/с не сможет гарантированно передать поток данных с заданными характеристиками. Соответственно, необходимо организовывать каналы связи с гарантированной пропускной способностью 500 Мбит/с и выше.

Пусть алгоритм расчета содержит 10 элементарных операций, из которых семь операций без циклов и их время выполнения рассчитывается по формуле

$$T_i = \{5 \times 10^{-6} \ 3 \times 10^{-6} \ 4 \times 10^{-6} \ 2 \times 10^{-6} \ 1 \times 10^{-6} \ 1 \times 10^{-6} \ 2 \times 10^{-6}\}.$$

В табл. 1 представлены параметры выполнения циклических операций при  $m = 3$ .

Тогда требуемая производительность может быть определена с помощью выражения (6):

$$v = \frac{7 + 5 + 7 + 6}{18 \times 10^{-6} + \frac{0.8}{0.2} \times 4 \times 10^{-6} + \frac{0.9}{0.1} \times 2 \times 10^{-6} + \frac{0.85}{0.15} \times 1 \times 10^{-6}} = \frac{23}{58 \times 10^{-6}} = 0.4 \times 10^6.$$

Для получения значения производительности в FLOPS, необходимо значение производительности умножить на соответствующий коэффициент. Пусть для данного примера этот коэффициент равен 1000, тогда требуемая производительность вычислительного комплекса равна  $0.4 \times 10^9$  FLOPS или 0.4 GFLOPS.

Таким образом, для данного примера можно сформулировать следующие требования к вычислительному комплексу:

– пропускная способность каналов связи не ниже 500 Мбит/с;

– производительность не ниже  $0.4 \times 10^6$  элементарных операций в секунду (для данного алгоритма) либо 0.4 GFLOPS при условии, что одна элементарная операция выполняется не более чем за 1000 операций с плавающей точкой.

На основании сказанного можно сделать вывод, что для корректного определения требований к вычислительному комплексу необходимо знать параметры потока данных, а также параметры алгоритма обработки, которые являются исходными данными для расчетов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод оценки производительности вычислительного комплекса, который использует параметры потока данных и не требует знаний о структуре вычислительного комплекса.

Показано, что решение задачи оперативного и высокоточного прогноза значений функциональных характеристик радиолокационных станций наиболее эффективно решать на специализированном вычислительном комплексе, который должен не только осуществлять прогноз технического состояния функциональных систем станций, но и обеспечивать решение задач информационной поддержки принятия решений обслуживающим персо-

**Таблица 1.** Параметры выполнения циклических операций при  $m = 3$

$j$	Кратность выполнения $q_j$	Вероятность выполнения $p_j^c$	Время выполнения $\tau_j$
1	5	0.8	$4 \times 10^{-6}$
2	7	0.9	$2 \times 10^{-6}$
3	6	0.85	$1 \times 10^{-6}$

налом по обеспечению заданных характеристик радиолокационных станций.

Отказ от глубокого анализа структуры комплекса позволил значительно упростить математическую модель, положенную в основу метода, что делает его удобным в практическом применении.

На конкретном примере проведена оценка производительности вычислительного комплекса на основании предложенного метода, что позволило сформировать требования к вычислительному комплексу в части пропускной способности каналов связи.

Предложенный метод может быть использован при решении прогнозирования технического состояния сложных радиоинформационных комплексов и сенсорных платформ в режиме реального времени.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Выполнение работы (А.Ю. Перлов) поддержано финансово Советом по грантам Президента для молодых кандидатов наук (грант МК-241.2021.4).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 10.10.2019 N 490 “О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации” (вместе с “Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года”). [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_335184/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335184/).
2. Мельник М.А., Насонов Д.А., Бухановский А.В. // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 2. С. 191. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42544098>.
3. Костров Б.В., Мартышкин А.И. // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2018. № 2. С. 152. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32869270>.
4. Забузов В.С., Казанцев Д.И. // Тр. Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. СПб., 2016. № 655. С. 24. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28422679>.
5. Демин А.В., Дмитриева С.П. // Матер. VII Междунар. науч.-технич. конф. “Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке”. СПб, 17-20 ноября, 2015. С. 364. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25481722>.
6. Климанова Е.Ю., Субханкулова А.Р., Зеленко Б.В., Леонтьева О.Ю. // Вестник Технол. ун-та. Матер. конф. 2015. Т. 18. № 24. С. 102. [РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА том 67 № 5 2022](https://cyberlenin-</a></li>
</ol>
</div>
<div data-bbox=)

- ka.ru/article/n/otsenka-proizvoditelnosti-vychislitelnyh-sistem-2/viewer.
7. *Баитанник Н.А.* Оценка производительности вычислительного комплекса информационно-измерительной и управляющей системы специального назначения. Дис. ... канд. техн. наук. Астрахань: Астраханский гос. ун-т, 2010. 176 с.
  8. *Ларионов А.М., Майоров С.А., Новиков Г.И.* Вычислительные комплексы, системы и сети. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
  9. *Комаров И.В.* // Тр. СПИИРАН. СПб.: Наука, 2005. Вып. 2. Т. 2. С. 155.
  10. *Martyshkin A.I.* // ARPN J. Engineering Appl. Sci. 2016. V. 11. № 23. P. 13526.
  11. *Salnikov I.I., Babich M.Yu., Butaev M.M., Martyshkin A.I.* // Intern. J. Appl. Engineering Research. 2016. V. 11. № 19. P. 9846.
  12. *Hoekstra A.G., Chopard B., Coster D. et al.* // Philos. Trans. R. Soc. A – Math. Phys. Eng. Sci. 2019. V. 377. № 2142. Article number 20180144. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0144>
  13. *Ben Belgacem M., Chopard B.* // Futur. Gener. Comput. Syst. 2017. V. 67. P. 72.
  14. *Almigheerbi T.S., Ramsey D., Lamek A.* // Proc. 11th Int. Joint Conf. on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management. Vienna. 17–19 Sept. 2019. Setubal: Science and Technology Publications, Lda, 2019. V. 3. P. 203. <https://doi.org/10.5220/0008119902030211>
  15. *Prathibha S., Latha B., Sumathi G.* // J. Internet Technol. 2017. V. 18. № 3. P. 589. <https://doi.org/10.6138/JIT.2017.18.3.20161101>
  16. *Kuzmenko N.S., Ostroumov I.V.* // IEEE First Int. Conf. on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC). Kyiv. 08–12 Oct. 2018. N.Y.: IEEE, 2018. P. 8516790. <https://doi.org/10.1109/SAIC.2018.8516790>
  17. *Xu K., Zhong Y.* // Operations Research. 2020. V. 68. № 6. P. 1698. <https://doi.org/10.1287/OPRE.2019.1940>
  18. *Chen X., Li Z., Chen Y. et al.* // Concurrency Computat. Pract. Exper. 2020. V. 32. № 16. P. e5145. <https://doi.org/10.1002/cpe.5145>
  19. *Wang X., Zhang S., Zhang M. et al.* // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2017. 10393 LNCS. P. 331. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-65482-9\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-65482-9_22)
  20. *Zhang K., Lyu Y., Zhang L.* // Chinese Control Conf. CCC, 2020-July. P. 4290. <https://doi.org/10.23919/CCC50068.2020.9189017>
  21. *Markova E., Satin Y., Kochetkova I. et al.* // Mathematics. 2020. V. 8. № 5. Article № 800. <https://doi.org/10.3390/math8050800>
  22. *Vasquez-Toledo L.A., Borja-Benítez B., Marcelin-Jiménez R. et al.* // AEU – Int. J. Electronics and Communications. 2020. P. 127. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153406>
  23. *Turovska A., Ostroumov I.* // Proc. 10th Int. Conf. Advanced Computer Information Technol. (ACIT). Degendorf. 16–18 Sept. 2020. N.Y.: IEEE, 2020. P. 250. <https://doi.org/10.1109/ACIT49673.2020.9208984>
  24. *Jiang G., Fan Y.* // Sensors. 2019. V. 19. № 2. Article № 348. <https://doi.org/10.3390/s19020348>
  25. *Gorbatenko N.I., Scoba A.N., Mikhaylov V.K.* // Proc. 2020 Int. Conf. RusAutoCon. P. 400. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208044>
  26. *Gaitonde J., Tardos É.* // Proc. EC 2020 - 21st ACM Conf. Economics and Computation. Budapest. 13–17 Jul. 2020. N.Y.: ACM, 2020. P. 319. <https://doi.org/10.1145/3391403.3399491>
  27. *Martyshkin A.I., Pashchenko D.V., Trokoz D.A. et al.* // Bull. Electrical Engineering and Informatics. 2020. V. 9. № 3. P. 1106. <https://doi.org/10.11591/eei.v9i3.1714>