

ISSN 1998-6629

ВЕСТНИК

САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА
(национального исследовательского
университета)

№ 1 (21)

2010

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА
(национального исследовательского университета)

№ 1 (21)

2010

Главный редактор

Шахматов Е. В., д.т.н., профессор

Заместитель главного редактора

Прокофьев А. Б., д.т.н., профессор

Ответственный секретарь

Прохоров А. Г., к.т.н., доцент

Редакционная коллегия

Астафьев В. И., д.ф.-м.н., профессор	Кузьмичёв В. С., д.т.н., профессор
Балакин В. Л., д.т.н., профессор	Лукачёв С. В., д.т.н., профессор
Богатырёв В. Д., д.э.н., профессор	Меркулова Л. П., д.п.н., профессор
Казанский Н. Л., д.ф.-м.н., профессор	Михеев В. А., д.т.н., профессор
Комаров В. А., д.т.н., профессор	Пиганов М. Н., д.т.н., профессор
Коптев А. Н., д.т.н., профессор	Прохоров С. А., д.т.н., профессор
Фалалеев С. В., д.т.н., профессор	

Председатель редакционного совета

Сойфер В. А., член-корр. РАН

Редакционный совет

Аншаков Г. П., член-корр. РАН	Гречников Ф. В., член-корр. РАН
Барвинок В. А., член-корр. РАН	Кирилин А. Н., д.т.н., профессор
Шорин В. П., академик РАН	

Журнал входит в утверждённый ВАК Минобрнауки РФ Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук

Журнал включён в общероссийский каталог ОАО "Роспечать". Подписной индекс - 18264

© Самарский государственный аэрокосмический университет

443086, Самара, Московское шоссе, 34

Тел.: (846) 267 48 41; электронная почта: vest@ssau.ru

МАСШТАБИРУЕМЫЕ РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ СИСТЕМЫ КОНКУРИРУЮЩИХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ И ИХ ОПТИМАЛЬНОСТЬ

© 2010 П. А. Павлов

Полесский государственный университет

Получены условия и критерии эффективности и оптимальности одинаково распределённых систем конкурирующих взаимодействующих процессов в условиях неограниченного и ограниченного параллелизма.

Масштабируемость, асинхронный режим, синхронный режим, распределенный процесс, конкурирующий процесс, программный ресурс, одинаково распределенная система, стационарная система, ограниченный параллелизм, неограниченный параллелизм.

Введение. Масштабируемость (scalability) является одним из важнейших требований к современным вычислительным системам, вычислительным комплексам, базам данных, маршрутизаторам и т.д. Она подразумевает способность системы увеличивать свою производительность при добавлении аппаратных и программных ресурсов. В настоящее время вопросы масштабирования находятся в поле зрения как разработчиков параллельных многопроцессорных систем (МС), так и распределенной среды метакомпьютинга [1]. Общим свойством, обеспечивающим возможность повышения производительности масштабируемых вычислительных систем, является распределённость процессов вычислений и данных с использованием принципов структурирования и конвейеризации [2]. Необходимы новые принципы организации вычислений и распределения ресурсов, создания эффективного аппаратного и программного обеспечения, обеспечения однозначности результата выполнения программ, эффективного планирования и распределения вычислительных процессов [3]. Особую актуальность приобретают задачи построения и исследования математических моделей распределённых вычислительных систем, поиска условий оптимальной организации конкурирующих взаимодействующих вычислительных процессов при распределённой обработке.

1. Математическая модель масштабируемой системы распределенных вычислений. Конструктивными элементами

для построения математической модели систем распределённых вычислений являются понятия процесса и программного ресурса.

Процесс будем рассматривать как последовательность блоков (команд, процедур)

Q_1, Q_2, \dots, Q_s , для выполнения которых используется множество процессоров (процессорных узлов, обрабатывающих устройств, интеллектуальных клиентов). При этом процесс называется *распределённым*, если все блоки или часть из них обрабатываются разными процессорами. Процессы могут обрабатываться параллельно, взаимодействуя путём обмена информацией. Такие процессы называются *кооперативными* или *взаимодействующими*.

Понятие *ресурса* используется для обозначения любых объектов вычислительной системы, которые могут быть использованы процессами для своего выполнения. *Реентерабельные* (многократно используемые) ресурсы характеризуются возможностью одновременного использования несколькими вычислительными процессами. Для параллельных систем характерной является ситуация, когда одну и ту же последовательность блоков или её часть процессорам необходимо выполнять многократно. Такую последовательность будем называть *программным ресурсом* (ПР), а множество соответствующих процессов – *конкурирующими*.

Математическая модель масштабируемой распределённой системы взаимодействующих процессов включает в себя p процессоров МС, n конкурирующих процессов, s

блоков Q_1, Q_2, \dots, Q_s структурированного на блоки программного процесса, матрицу $T_p = [t_{ij}]$ времён выполнения j -х блоков i -ми конкурирующими процессами. Указанные параметры изменяются в пределах $p \geq 2, n \geq 2, s \geq 2, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq s$. Будем считать, что все n процессов используют одну копию структурированного на блоки ПР, а на множестве блоков установлен линейный порядок их выполнения. Учитывая то, что обменные операции в параллельных распределённых системах происходят, как правило, значительно медленнее арифметических, введём в рассмотрение параметр $\varepsilon > 0$, характеризующий время (накладные расходы), затрачиваемое МС на организацию параллельного выполнения блоков программного ресурса множеством распределённых конкурирующих процессов.

Будем считать, что взаимодействие процессов вычислений, процессоров и блоков структурированного программного ресурса подчинено следующим условиям: 1) ни один из блоков программного ресурса не может обрабатываться одновременно более чем одним процессором; 2) ни один из процессоров не может обрабатывать одновременно более одного блока; 3) обработка каждого блока осуществляется без прерываний; 4) распределение блоков программного ресурса по процессорам МС для каждого из процессов осуществляется циклически по правилу: блок с номером $j = kp + i, (j = \overline{1, s}, i = \overline{1, p}, k \geq 0)$, распределяется на процессор с номером i .

Кроме того, введём дополнительные условия, которые определяют режимы взаимодействия процессов, процессоров и блоков ПР: 5) отсутствуют простои процессоров при условии готовности блоков, а также невыполнение блоков при наличии процессоров; 6) для каждого из n процессов момент завершения выполнения j -го блока на i -м процессоре совпадает с моментом начала выполнения следующего $(j+1)$ -го блока на $(i+1)$ -м процессоре, $i = \overline{1, p-1}, j = \overline{1, s-1}$; 7) для каждого из блоков структурированного

ПР момент завершения его выполнения l -м процессом совпадает с моментом начала его выполнения $(l+1)$ -м процессом на том же процессоре, $l = \overline{1, n-1}$.

Условия 1–5 определяют *асинхронный* режим взаимодействия процессоров, процессов и блоков, который предполагает отсутствие простоев процессоров МС при условии готовности блоков, а также невыполнение блоков при наличии процессоров.

Если к условиям 1–4 добавить условие 6, то получим *первый синхронный* режим, обеспечивающий непрерывное выполнение блоков программного ресурса внутри каждого из вычислительных процессов.

Второй синхронный режим, определяемый условиями 1–4, 7, обеспечивает непрерывное выполнение каждого блока всеми процессами.

Определение 1. Масштабируемая система n распределённых взаимодействующих конкурирующих процессов называется *неоднородной*, если времена выполнения блоков программного ресурса Q_1, Q_2, \dots, Q_s зависят от объёмов обрабатываемых данных и/или их структуры, т. е. разные для разных вычислительных процессов.

Определение 2. Система взаимодействующих конкурирующих процессов называется *одинаково распределённой*, если времена t_{ij} выполнения блоков $Q_j, j = \overline{1, s}$, программного ресурса каждым из i -х процессов вычислений совпадают и равны t_i для всех $i = \overline{1, n}$, т. е. справедлива цепочка равенств $t_{i1} = t_{i2} = \dots = t_{is} = t_i$ для всех $i = \overline{1, n}$.

2. Необходимые и достаточные условия эффективности одинаково распределённых масштабируемых систем. В [2, 4, 5] исследованы базовые асинхронный и два синхронных режима, возникающие при организации распределённых взаимодействующих процессов в условиях конкуренции за общий программный ресурс. Для вычисления наименьшего общего времени выполнения множества конкурирующих неоднородных и одинаково распределённых процессов в рамках очерченных режимов получены

математические соотношения. В [6] решена задача сравнительного анализа полученных соотношений для класса одинаково распределённых процессов с учётом дополнительных накладных расходов $\varepsilon > 0$. Доказано, что для одинаково распределённых систем конкурирующих процессов минимальное общее время для всех трёх базовых режимов в случае неограниченного параллелизма ($s \leq p$) вычисляется по формуле

$$T(p, n, s, \varepsilon) = T_\varepsilon^n + (s - 1)t_{\max}^\varepsilon, \quad (1)$$

а в случае ограниченного параллелизма ($s > p$) для вычисления минимального общего времени в асинхронном и втором синхронном режимах имеют место соотношения

$$T(p, n, s, \varepsilon) = \begin{cases} kT_\varepsilon^n + (p - 1)t_{\max}^\varepsilon, & \text{при } s = kp, k > 1, \\ (k + 1)T_\varepsilon^n + (r - 1)t_{\max}^\varepsilon, & \text{при } s = kp + r, k \geq 1, 1 \leq r < p, \end{cases} \quad (2)$$

где $T_\varepsilon^n = \sum_{i=1}^n t_i^\varepsilon$ – суммарное время выполнения каждого из блоков Q_j всеми n процессами с учетом накладных расходов ε , $t_{\max}^\varepsilon = \max_{1 \leq i \leq n} t_i^\varepsilon$, $t_i^\varepsilon = t_i + \varepsilon$, $i = \overline{1, n}$.

Выделим в классе одинаково распределённых систем взаимодействующих конкурирующих процессов подкласс стационарных систем.

Определение 3. Одинаково распределённую масштабируемую систему конкурирующих процессов назовём *стационарной*, если выполняется цепочка равенств

$$t_1 = t_2 = \dots = t_n = t.$$

Нетрудно показать, что в случае стационарной одинаково распределённой масштабируемой системы конкурирующих процессов минимальное общее время их выполнения при достаточном числе процессоров МС ($s \leq p$) определяется равенством

$$\overline{T}_\varepsilon = (n + s - 1)t_\varepsilon,$$

где $t_\varepsilon = T^n / n + \varepsilon$, $T^n = nt$.

Определение 4. Одинаково распределённую систему конкурирующих взаимодействующих процессов будем называть *эффективной* при фиксированных $p, s \geq 2$, если выполняется соотношение

$$\Delta_\varepsilon(n) = sT^n - T(p, n, s, \varepsilon) \geq 0,$$

где sT^n – время выполнения блоков Q_j , $j = \overline{1, s}$ всеми n процессами в последовательном режиме.

При наличии двух эффективных одинаково распределённых масштабируемых систем взаимодействующих конкурирующих процессов будем считать, что первая более эффективна, чем вторая, если величина $\Delta_\varepsilon(n)$ первой системы не меньше соответствующей величины второй. Для введённого подмножества одинаково распределённых систем справедливо следующее утверждение.

Теорема 1. Для любой эффективной одинаково распределённой системы конкурирующих процессов при $s \leq p$ и $\varepsilon > 0$ существует более эффективная стационарная одинаково распределённая система.

Доказательство. Рассмотрим любую эффективную одинаково распределённую систему. Согласно определению 4 условие эффективности с учётом (1) запишется в виде следующего неравенства:

$$\Delta_\varepsilon(n) = (s - 1)(T^n - t_{\max}^n) - (n + s - 1)\varepsilon \geq 0, \quad (3)$$

где $t_{\max}^n = \max_{1 \leq i \leq n} t_i$.

Для любой стационарной одинаково распределённой системы имеет место неравенство

$$\overline{\Delta}_\varepsilon(n) = (s - 1)(T^n - t) - (n + s - 1)\varepsilon \geq 0, \quad (4)$$

где $t = T^n / n$.

Рассмотрим стационарную одинаково распределённую систему, в которой

$$t = \min_{1 \leq i \leq n} t_i = t_{\min}^n.$$

Чтобы убедиться в справедливости теоремы 1, для введённых эффективных систем достаточно доказать выполнение неравенства:

$\bar{\Delta}_\varepsilon(n) \leq \Delta_\varepsilon(n)$. Подставив в левую и правую части последнего неравенства из (3) и (4) вместо $\Delta_\varepsilon(n)$ и $\bar{\Delta}_\varepsilon(n)$ соответствующие величины и проведя преобразования, приходим к равносильному неравенству:

$$(n-1)t \leq T^n - t_{\max}^n.$$

Докажем справедливость последнего. Пусть для определённости $t_{\max}^n = t_l$. Тогда проверка показывает, что справедлива цепочка соотношений

$$T^n - t_{\max}^n = \sum_{i=1}^{l-1} t_i + \sum_{j=l+1}^n t_j \geq (n-1)t_{\min}^n = (n-1)t,$$

из которой следует справедливость требуемого равенства. Таким образом, теорема 1 доказана.

Следующее утверждение устанавливает достаточное условие эффективности одинаково распределенной системы в случае неограниченного параллелизма.

Теорема 2. Если параметры p, n, s, ε одинаково распределённой масштабируемой системы взаимодействующих конкурирующих процессов удовлетворяют соотношениям $3 \leq s \leq p$, $n = s \neq 3$, $sn \geq 2(n+s-1)$, $0 < \varepsilon \leq \min_{1 \leq i \leq n} t_i$, то такая система является эффективной.

Доказательство. Согласно (3) условие эффективности равносильно неравенству

$$\frac{T^n - t_{\max}^n}{\varepsilon} \geq \frac{n+s-1}{s-1}. \quad (5)$$

Следовательно, для доказательства теоремы 2 достаточно убедиться в справедливости (5). Непосредственная проверка показывает, что следствием соотношений $0 < \varepsilon \leq \min_{1 \leq i \leq n} t_i$ является цепочка неравенств:

$$\frac{T^n - t_{\max}^n}{\varepsilon} \geq \frac{(n-1)t_{\min}^n}{\varepsilon} \geq n-1, \quad (6)$$

так как в силу выбора ε выполняется неравенство $t_{\min}^n / \varepsilon \geq 1$. Далее, из $sn \geq 2(n+s-1)$ следует справедливость неравенства

$$n-1 \geq \frac{n+s-1}{s-1}. \quad (7)$$

Проверка показывает, что неравенство (5) является следствием неравенств (6) и (7). Таким образом, теорема 2 доказана.

Ниже формулируется и доказывается необходимое и достаточное условие существования эффективной системы одинаково распределённых конкурирующих процессов при достаточном числе процессоров в зависимости от величины накладных расходов ε .

Теорема 3. Для существования эффективной одинаково распределённой масштабируемой системы конкурирующих взаимодействующих процессов с заданными параметрами $p \geq 3$, $s \leq p$, $\varepsilon > 0$ и T^n необходимо и достаточно выполнение следующих условий:

$$\varepsilon \leq \begin{cases} \varphi(1+\sqrt{s}), & \text{если } \sqrt{s} \text{ — целое,} \\ \max\{\varphi(1+\lceil\sqrt{s}\rceil), \varphi(2+\lceil\sqrt{s}\rceil)\}, & \text{если } \sqrt{s} \text{ — нецелое,} \end{cases} \quad (8)$$

где $\varphi(x) = \frac{(s-1)T^n(x-1)}{x(x+s-1)}$, $\lceil x \rceil$ — наибольшее целое, не превосходящее x .

Доказательство. Согласно (4) условие эффективности любой одинаково распределённой системы конкурирующих n процессов определяется соотношениями

$$\bar{\Delta}_\varepsilon(n) = (s-1)(T^n - t) - (n+s-1)\varepsilon \geq 0,$$

которые равносильны выполнению неравенства

$$\varepsilon \leq \frac{(s-1)T^n(n-1)}{n(n+s-1)}. \quad (9)$$

Введём в рассмотрение функцию

$$\varphi(x) = (s-1)T^n(x-1) / x(x+s-1).$$

Нетрудно проверить, что φ достигает своего максимума в точке $x = 1 + \sqrt{s}$ при $x > 0$. Положим

$$n_0 = \begin{cases} 1 + \sqrt{s}, & \text{если } \sqrt{s} \text{ — целое,} \\ \max \{1 + [\sqrt{s}], 2 + [\sqrt{s}]\}, & \text{если } \sqrt{s} \text{ — нецелое.} \end{cases} \quad (10)$$

Необходимость условий (8) будет доказана, если будет установлена невозможность противоположного утверждения, т. е. невозможность существования одинаково распределённой масштабируемой системы конкурирующих n процессов, для которой выполнялось бы неравенство, противоположное неравенству (8), и которая была бы эффективной. Если предположить существование такой системы с n процессами, то должно выполняться соотношение $n \neq n_0$, так как выше установлено, что одинаково распределённая система с n_0 процессами эффективна. Следовательно, для неё имеет место неравенство $\varepsilon \leq (s-1)T^n(n_0-1)/n_0(n_0+s-1)$, в то время как для гипотетической системы с n процессами должно выполняться в силу предположения неравенство

$$\varepsilon \geq (s-1)T^n(n_0-1)/n_0(n_0+s-1).$$

Очевидным следствием полученных неравенств является неравенство $\varepsilon > \varepsilon$. Полученное противоречие устанавливает необходимость условий (8).

Очевидно, такой системы нет при $n = n_0$, так как в силу определения функции φ для такого n выполняется неравенство, противоположное неравенству (9), и, следовательно, такая система не может быть эффективной.

В случае $n < n_0$ в силу определения n_0 должна выполняться цепочка неравенств вида

$$\frac{(s-1)T^n(n-1)}{n(n+s-1)} \leq \frac{(s-1)T^n(n_0-1)}{n_0(n_0+s-1)} \leq \varepsilon, \quad (11)$$

из которой следует неэффективность предполагаемой системы с n процессами в силу (9).

Наконец, если $n > n_0$, то следствием неравенств (9) и (10) является неэффективность предполагаемой одинаково распределённой системы конкурирующих n процессов. Полученные противоречия во всех возможных случаях доказывают необходимость условий (8).

Достаточность условий (8) непосредственно следует из наличия функции φ со свойством (9). Действительно, в этом случае требуемой эффективной одинаково распределённой системы является система с $n = n_0$ конкурирующими процессами, где n_0 определяется формулой (10). Таким образом, теорема 3 доказана.

Замечание. При $p = s = 2$ одинаково распределённая масштабируемая система конкурирующих процессов будет эффективной, если выполняется неравенство

$$\frac{\varepsilon}{T^n} \leq \frac{n-1}{n(n+1)}.$$

3. Эффективность одинаково распределённых систем в условиях ограниченного параллелизма.

Теорема 4. Если параметры одинаково распределённой системы $n \geq 3$ конкурирующих процессов в многопроцессорной системе с n процессорами удовлетворяют соотношениям $s \geq 3$, $n = s \neq 3$ и $0 < \varepsilon \leq \min_{1 \leq i \leq n} t_i$, то рассматриваемая система будет эффективной, если выполняются условия:

$$sn \geq \begin{cases} 2(kn+p-1), & \text{если } s = kp, k > 1, \\ 2((k+1)n+r-1), & \text{если } s = kp+r, k \geq 1, 1 \leq r < p. \end{cases}$$

Доказательство. Для случая

$$s = kp, k > 1$$

условие эффективности с учётом (2) равносильно неравенству

$$(s-k)T^n - (p-1)t_{\max}^n \geq (kn+p-1)\varepsilon,$$

где $t_{\max}^n = \max_{1 \leq i \leq n} t_i^n$.

В силу того, что $0 < \varepsilon \leq \min_{1 \leq i \leq n} t_i$, имеем

$$\frac{(s-k)T^n - (p-1)t_{\max}^n}{\varepsilon} \geq (s-k)n - (p-1) \geq kn + p - 1.$$

Из последней цепочки неравенств следует, что $sn \geq 2(kn + p - 1)$.

Случай, когда $s = kp + r$, $k \geq 1$, $1 \leq r < p$, доказывается аналогично.

Ниже для асинхронного и второго синхронного режимов формулируется и доказывается необходимое и достаточное условие существования эффективной системы одинаково распределённых конкурирующих процессов в случае ограниченного параллелизма в зависимости от величины накладных расходов ε .

Теорема 5. Для существования эффективной одинаково распределённой системы конкурирующих процессов с заданными параметрами $p \geq 3$, T^n , $\varepsilon > 0$ необходимо и достаточно, чтобы выполнялись следующие условия:

1) при $s = kp$, $k > 1$,

$$\varepsilon \leq \begin{cases} \varphi_1\left(\frac{1+\sqrt{p}}{k}\right), & \text{если } \frac{1+\sqrt{p}}{k} - \text{целое,} \\ \max\left\{\varphi_1\left(\left[\frac{1+\sqrt{p}}{k}\right]\right), \varphi_1\left(\left[\frac{1+\sqrt{p}}{k}\right]+1\right)\right\}, & \text{если } \frac{1+\sqrt{p}}{k} - \text{нецелое,} \end{cases}$$

где $\varphi_1(x) = (p-1)T^n(kx-1)/x(kx+p-1)$, а $[x]$ – наибольшее целое, не превосходящее x ;

2) при $s = kp + r$, $k \geq 1$, $1 \leq r < p$,

$$\varepsilon \leq \begin{cases} \varphi_2(x), & \text{если } x - \text{целое,} \\ \max\{\varphi_2([x]), \varphi_2([x]+1)\}, & \text{если } x - \text{нецелое,} \end{cases}$$

где $\varphi_2(x) = \frac{[(p-1)kx + (r-1)(x-1)] T^n}{x [(k+1)x + r - 1]}$, $[x]$ –

наибольшее целое, не превосходящее x , где

$$x = \frac{r-1}{(p-1)k+r-1} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{(p-1)k+r-1}{k+1}} \right).$$

Доказательство. В случае стационарной одинаково распределённой системы конкурирующих процессов в асинхронном и втором синхронном режимах минимальное общее время \bar{T}_ε с учётом параметра $\varepsilon > 0$ определяется равенством

$$\bar{T}_\varepsilon = \begin{cases} (kn+p-1)t_\varepsilon, & \text{при } s = kp, k > 1, \\ ((k+1)n+(r-1))t_\varepsilon, & \text{при } s = kp+r, k \geq 1, 1 \leq r < p, \end{cases} \quad (12)$$

где $t_\varepsilon = T^n/n + \varepsilon$, $T^n = nt$.

Условие эффективности одинаково распределённой системы конкурирующих процессов с учётом (2) в случае $s = kp$, $k > 1$ определяется соотношением:

$$\bar{\Delta}_\varepsilon(s = kp) = (p-1)(kT^n - t) - (kn+p-1)\varepsilon \geq 0,$$

которое равносильно выполнению неравен-

$$\text{ства } \varepsilon \leq \frac{(p-1)T^n(kn-1)}{n(kn+p-1)}.$$

Введём в рассмотрение функцию

$\varphi_1(x) = (p-1)T^n(kx-1)/x(kx+p-1)$, которая при $x > 0$ достигает своего максимума в точ-

$$\text{ке } x = \frac{1+\sqrt{p}}{k}.$$

В случае $s = kp + r$, $k \geq 1$, $1 \leq r < p$ условие эффективности одинаково распределённой системы конкурирующих процессов с учётом (2) определяется неравенством

$$\bar{\Delta}_\varepsilon(s = kp+r) = (p-1)kT^n + (r-1)(T^n - t) - ((k+1)n+r-1)\varepsilon \geq 0.$$

С учётом, что $t = T^n/n$, это равносиль-

$$\text{но } \varepsilon \leq \frac{[(p-1)nk + (r-1)(n-1)]T^n}{[(k+1)n+r-1]n}.$$

При $x > 0$ функция

$$\varphi_2(x) = \frac{[(p-1)kx + (r-1)(x-1)]T^n}{[(k+1)x+r-1]x}$$

достигает своего максимума в точке

$$x = \frac{r-1}{(p-1)k+r-1} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{(p-1)k+r-1}{k+1}} \right).$$

Таким образом, теорема 5 доказана.

4. Оптимальность одинаково распределённых систем конкурирующих процессов.

Определение 5. Эффективная одинаково распределённая система называется *оптимальной*, если величина Δ_ε достигает наибольшего значения.

В силу теоремы 1 оптимальную одинаково распределённую систему следует искать среди стационарных одинаково распределённых систем. Тогда с учётом (4) имеем:

$$\bar{\Delta}_\varepsilon(s \leq p) = (s-1)T^n(1-1/n) - (n+s-1)\varepsilon.$$

Введём функцию действительного аргумента x вида

$$\bar{\Delta}_\varepsilon(x) = (s-1)T^n \left(1 - \frac{1}{x} \right) - (x+s-1)\varepsilon, \quad x \geq 1.$$

Решение задачи об оптимальности одинаково распределённой системы, состоящей из n конкурирующих процессов, для достаточного числа процессоров для всех трех базовых режимов следует из теоремы.

Теорема 6. Для того, чтобы эффективная одинаково распределённая система конкурирующих процессов была оптимальной при заданных $2 \leq s \leq p$, T^n , $\varepsilon > 0$, необходимо и достаточно, чтобы она была стационарной и число процессов n_0 в системе равнялось одному из чисел

$$\left[\left[\sqrt{\frac{(s-1)T^n}{\varepsilon}} \right], \left[\sqrt{\frac{(s-1)T^n}{\varepsilon}} \right] + 1 \right] \cap [2, n],$$

в котором функция $\bar{\Delta}_\varepsilon(x)$ достигает наибольшего значения. Здесь $[x]$ означает наибольшее целое, не превосходящее x ; n – заданное число.

Доказательство.

Необходимость. Рассмотрим введённую функцию

$$\bar{\Delta}_\varepsilon(x) = (s-1)T^n \left(1 - \frac{1}{x} \right) - (x+s-1)\varepsilon, \quad x \geq 1.$$

Согласно определению 5 одинаково распределённая система будет оптимальной в той точке x , где функция $\bar{\Delta}_\varepsilon(x)$ достигает своего наибольшего значения. Покажем, что функция $\bar{\Delta}_\varepsilon(x)$ достигает своего наибольшего значения в точке $x = \sqrt{\frac{(s-1)T^n}{\varepsilon}}$. Действительно,

$$\bar{\Delta}'_\varepsilon(x) = \frac{(s-1)T^n}{x^2} - \varepsilon, \quad \bar{\Delta}''_\varepsilon(x) = -\frac{2T^n(s-1)}{x^3} < 0,$$

так как $s \geq 2$, $x > 0$.

Следовательно, функция $\bar{\Delta}_\varepsilon(x)$ достигает максимума в точке, где первая её производная обращается в нуль $\bar{\Delta}'_\varepsilon(x) = 0$, т. е.

$$x^* = \sqrt{\frac{(s-1)T^n}{\varepsilon}}.$$

Целочисленными точками, в которых достигается наибольшее значение функции $\bar{\Delta}_\varepsilon(x)$, будут $n_0 = [x^*]$ или $n_0 = [x^*] + 1$. Следовательно, в качестве n_0 можно выбрать

$$\text{одно из чисел } \left[\sqrt{\frac{(s-1)T^n}{\varepsilon}} \right], \left[\sqrt{\frac{(s-1)T^n}{\varepsilon}} \right] + 1,$$

в которых функция $\bar{\Delta}_\varepsilon(s \leq p)$ принимает наибольшее значение.

Если же окажется, что ни одна из точек $\left[\sqrt{\frac{(s-1)T^n}{\varepsilon}} \right], \left[\sqrt{\frac{(s-1)T^n}{\varepsilon}} \right] + 1$, в которой

функция $\bar{\Delta}_\varepsilon(x)$ принимает наибольшее значение, не принадлежит $[2, n]$, то в качестве оптимальной выбираем эффективную одинаково распределённую систему с числом процессов $n_0 = n$.

В силу отрицательности второй производной исследуемая функция выпукла. Сле-

довательно, точка максимума всегда существует, а значит и существует эффективная одинаково распределённая система конкурирующих процессов в случае, когда $n \rightarrow \infty$.

Достаточность следует из свойств выпуклости функции $\bar{\Delta}_\varepsilon(x)$ на отрезке $[2, n]$.

Для решения задачи об оптимальности одинаково распределённой системы конкурирующих процессов в случае ограниченного параллелизма в асинхронном и втором синхронном режимах введём функции действительного аргумента x вида:

$$\bar{\Delta}_\varepsilon(x) = (s-1)T^n - \frac{(p-1)T^n}{x} - (kx + p-1)\varepsilon, \quad (13)$$

при $s = kp, k > 1$,

$$\bar{\Delta}_\varepsilon(x) = (s-k-1)T^n - \frac{(r-1)T^n}{x} - ((k+1)x + (r-1))\varepsilon, \quad (14)$$

при $s = kp + r, k \geq 1, 1 \leq r < p$.

Теорема 7. Для того, чтобы эффективная одинаково распределённая система конкурирующих процессов в случае ограниченного параллелизма в асинхронном и втором синхронном режимах была оптимальной при заданных $p \geq 2, T^n, \varepsilon > 0$, необходимо и достаточно, чтобы она была стационарной и число процессов n_0 в системе равнялось одному из чисел:

$$1) \left[\left[\sqrt{\frac{(p-1)T^n}{k\varepsilon}}, \left[\sqrt{\frac{(p-1)T^n}{k\varepsilon}} \right] + 1 \right] \cap [2, n], \right.$$

при $s = kp, k > 1$,

$$2) \left[\left[\sqrt{\frac{(r-1)T^n}{(k+1)\varepsilon}}, \left[\sqrt{\frac{(r-1)T^n}{(k+1)\varepsilon}} \right] + 1 \right] \cap [2, n], \right.$$

при $s = kp + r, k \geq 1, 1 \leq r < p$,

в котором функция $\bar{\Delta}_\varepsilon(x)$ достигает наибольшего значения, где $[x]$ – наибольшее целое, не превосходящее x ; n – заданное число.

Доказательство.

Необходимость. Для случая

$$s = kp, k > 1$$

функция вида (13) достигает своего наиболь-

$$\text{шего значения в точке } x^* = \sqrt{\frac{(p-1)T^n}{k\varepsilon}},$$

$$\text{так как } \bar{\Delta}'_\varepsilon(x) = \frac{(p-1)T^n}{x^2} - k\varepsilon.$$

Как и в случае неограниченного параллелизма целочисленными точками будут $n_0 = [x^*]$ или $n_0 = [x^*] + 1$. Следовательно, в качестве оптимальной выбираем эффективную одинаково распределённую систему с числом процессов

$$\left[\sqrt{\frac{(p-1)T^n}{k\varepsilon}} \right], \left[\sqrt{\frac{(p-1)T^n}{k\varepsilon}} \right] + 1.$$

В случае $s = kp + r, k \geq 1, 1 \leq r < p$ первая производная функции (14) имеет вид

$$\bar{\Delta}'_\varepsilon(x) = \frac{(r-1)T^n}{x^2} - (k+1)\varepsilon.$$

Следовательно, в качестве n_0 можно

выбрать одно из значений $\left[\sqrt{\frac{(r-1)T^n}{(k+1)\varepsilon}} \right]$ или

$$\left[\sqrt{\frac{(r-1)T^n}{(k+1)\varepsilon}} \right] + 1.$$

Если же окажется, что ни одна из точек

$$\left[\sqrt{\frac{(p-1)T^n}{k\varepsilon}} \right], \left[\sqrt{\frac{(p-1)T^n}{k\varepsilon}} \right] + 1,$$

$$\left[\sqrt{\frac{(r-1)T^n}{(k+1)\varepsilon}} \right], \left[\sqrt{\frac{(r-1)T^n}{(k+1)\varepsilon}} \right] + 1,$$

в которых функции (13), (14) принимают наибольшее значение, не принадлежат $[2, n]$, то в случае ограниченного параллелизма в ка-

честве оптимальной выбираем эффективную одинаково распределённую систему с числом процессов $n_0 = n$.

Достаточность следует из свойств выпуклости функции $\bar{\Delta}_\varepsilon(x)$ при $s > p$ на отрезке $[2, n]$. Действительно, исследуемые функции (13) и (14) выпуклы в силу отрицательности вторых производных:

$$\bar{\Delta}_\varepsilon''(x) = -\frac{2T^n(p-1)}{x^3} < 0,$$

$$\bar{\Delta}_\varepsilon''(x) = -\frac{2T^n(r-1)}{x^3} < 0, \quad p \geq 2,$$

$$1 \leq r < p, \quad x > 0.$$

Таким образом, теорема 7 доказана.

Заключение. Полученные условия эффективности и оптимальности одинаково распределённых масштабируемых систем конкурирующих взаимодействующих процессов имеют многочисленные области применения. В частности, они могут быть использованы при проектировании системного и прикладного программного обеспечения, ориентированного на масштабируемые многопроцессорные системы, вычислительные сети, а также при решении проблем оптимального использования вычислительных ресурсов. Полученные формулы также служат основой для решения задач оптимизации числа блоков при заданных остальных параметрах МС, нахождения оптимального числа процессоров при заданных объёмах вычислений и (или) директивных сроках реализации вычислительных процессов, исследования всевозможных смешанных режимов организации выполнения параллельных процессов при распределённой обработке, в том числе с учётом ограниченного числа копий структурированного программного ресурса.

Библиографический список

1. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. - СПб., 2002. - 608 с.
2. Коваленко Н. С., Самаль С. А. Вычислительные методы реализации интеллектуальных моделей сложных систем. - Мн., 2004. - 166 с.
3. Топорков В. В. Модели распределенных вычислений. - М., 2004. - 320 с.
4. Иванников В. П., Коваленко Н. С., Метельский В. М. О минимальном времени реализации распределенных конкурирующих процессов в синхронных режимах // Программирование. - 2000. - №5. - С. 44–52.
5. Коваленко Н. С., Самаль С. А. Минимизация общего времени выполнения заданных объемов вычислений в синхронных режимах // Кибернетика и системный анализ. - 2003. - №6. - С. 39–47.
6. Павлов П. А. Сравнительный анализ одинаково распределенных конкурирующих процессов с учетом дополнительных системных расходов // Вестник фонда фундаментальных исследований. - 2006. - №1. - С. 55–58.

References

1. Voevodin, V. V., Voevodin V.V. Parallel calculations. Saint-Petersburg, 2002. 608 p.
2. Kovalenko, N. S., Samal S. A. Computing methods of realisation of intellectual models of complex systems. Minsk, 2004. 166 p.
3. Toporkov, V. V. Models of distributed calculations. Moscow, 2004. 320 p.
4. Ivannikov, V. P., Kovalenko N. S., Metelsky V. M. Minimum time of realisation of distributed competitive processes in synchronous modes // Programming. 2000. No.5. pp. 44–52.
5. Kovalenko, N. S., Samal S. A. Minimisation of the total time of performing preset volumes of calculations in synchronous modes / / Cybernetics and system analysis. 2003. No.6. pp. 39–47.
6. Pavlov, P. A. Comparative analysis of equally distributed competitive processes in view of additional system expenses // Bulletin of the foundation of basic researches. 2006. №1. pp. 55–58.

**SCALABLE DISTRIBUTED SYSTEMS OF COMPETITIVE
INTERACTING PROCESSES AND THEIR OPTIMALITY**

© 2010 P. A. Pavlov

Palesky State University

Conditions and criteria of efficiency and optimality of equally distributed systems of competitive interacting processes in conditions of unlimited and limited parallelism are obtained.

Scalability, asynchronous mode, synchronous mode, distributed process, competitive process, program resource, equally distributed system, stationary system, limited parallelism, unlimited parallelism.

Информация об авторе

Павлов Павел Александрович, кандидат физико–математических наук, доцент кафедры высшей математики и информационных технологий Полесского государственного университета. Область научных интересов: сосредоточенная, распределенная, макроконвейерная обработка параллельных вычислительных процессов. E-mail: pin2535@tut.by.

Pavlov Pavel Aleksandrovich, candidate of physical and mathematical sciences, senior lecturer of the department of higher mathematics and information technology of Palesky state university, pin2535@tut.by. Area of research: concentrated, distributed processing of parallel computational processes.

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО ДВИЖЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА МАСС СПУСКАЕМОГО АППАРАТА С ТРИГАРМОНИЧЕСКОЙ МОМЕНТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ПРИ ВХОДЕ В АТМОСФЕРУ <i>Е. В. Барина, И. А. Тимбай</i>	9
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОБШИВКИ ПОДКРЕПЛЁННЫХ ОТСЕКОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ СЖАТИИ <i>О. В. Борисова, Л. М. Савельев</i>	20
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА НАГРУЖЕННОСТИ НА КПД ТРЁХСТУПЕНЧАТОЙ ТУРБИНЫ ТРДД <i>Е. Н. Богомолов, П. В. Кащеева</i>	28
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБОБЩЁННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ВКЛЮЧАЮЩИХ ПОДСИСТЕМЫ ОДНОКРАТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ <i>В. А. Данилкин, Д. В. Тыщенко</i>	34
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ КАПСУЛЫ ПРИ СПУСКЕ В АТМОСФЕРУ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ <i>Ю. М. Заболотнов, И. А. Никонова</i>	38
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОГРАММНОГО РАЗВЁРТЫВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ С УЧЁТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ КОНЦЕВОГО ТЕЛА <i>С. А. Ишков, О. Ю. Заболотнова</i>	47
РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ АЛГОРИТМОВ БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ <i>А. А. Калентьев, Ю. М. Сыгуров</i>	58
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ, РАСПРОСТРАНЕНИЯ, РОСТА И СМЫКАНИЯ ПУЗЫРЬКОВЫХ КАВЕРН И СУПЕРКАВЕРНЫ В ТРУБЕ С ДЕГАЗИРОВАННОЙ ЖИДКОСТЬЮ ПРИ ГИДРОУДАРАХ <i>Е. А. Каракулин</i>	63
ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ И ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ <i>В. И. Потапов</i>	75
АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К РАЗВИТИЮ ИЛИ ПОЯВЛЕНИЮ НОВЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СЕМЕЙСТВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ <i>Ю. А. Советкин, Н. В. Степанова</i>	84
ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ С МНОГОРАЗОВЫМИ БЛОКАМИ ПЕРВЫХ СТУПЕНЕЙ <i>Ю. А. Советкин, Д. В. Щербина</i>	91
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К МЕХАНИЧЕСКИМ ИСПЫТАНИЯМ АГРЕГАТОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ <i>Н. А. Тестоедов, А. А. Логанов, В. В. Двирный</i>	97

ВЫБОР СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	
<i>Ю. А. Шняков, А. С. Гуртов, К. Г. Гордеев, С. В. Ивков</i>	103

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ УПРУГОДЕМПФЕРНЫХ ОПОР РОТОРОВ	
<i>В. Б. Балякин, Б. Б. Косенок, И. С. Барманов</i>	114
АНАЛИЗ ГРУППОВЫХ СВОЙСТВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РОЛИКОВ В ОПОРАХ БЕССЕПАРАТОРНОГО ТИПА СТАТИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	
<i>А. Н. Журавлев</i>	120
ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА КАЧЕСТВО СБОРКИ ПОД СВАРКУ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ	
<i>А. Н. Журавлев, М. А. Борисов</i>	126
ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ СОПЛОМ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ	
<i>Б. Б. Косенок</i>	133
ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ ПОСЛЕ ПОРАЖАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	
<i>Н. Н. Кузьмин, В. В. Ильин</i>	140
ВЫНУЖДЕННОЕ ЗАЖИГАНИЕ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	
<i>А. М. Ланский, С. В. Лукачёв, С. Г. Матвеев</i>	145
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕР СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	
<i>А. М. Ланский, С. В. Лукачёв, С. Г. Матвеев</i>	155
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ	
<i>Н. А. Рыбаков, А. И. Цаплин</i>	161
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ С ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА	
<i>Б. В. Скворцов, Е. А. Силов, А. В. Солнцева</i>	166
ПОЛУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ОСНОВЕ ВВЕДЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ	
<i>Е. В. Стефанюк, И. В. Кудинов</i>	174
МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНКАХ	
<i>К. Н. Тукмаков, А. В. Архипов</i>	185

ОПТОЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ <i>Р. А. Царёв</i>	195
---	-----

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

МОДЕЛИ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ ДЛЯ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С АДАПТИВНЫМ ПРИЁМНИКОМ <i>Ф. Р. Ахмадуллин</i>	202
ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СЛАБОЙ БЕЗЭХОВОСТИ <i>В. С. Бачурин, Д. М. Батухтин, В. Д. Пышный</i>	209
КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПРИ ЕГО УПРАВЛЕНИИ ПО КАНАЛУ РАЗРЯДНОГО ТОКА <i>Н. Е. Конюхов, П. А. Николаев, Р. Р. Соешев</i>	216
ДВЕ МОДЕЛИ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С АДАПТИВНЫМ ПРИЁМНИКОМ <i>Ю. И. Полевой</i>	222
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ПРЕРЫВИСТОЙ СТРУКТУРЫ <i>А. В. Полулех, Г. М. Гайнуллина</i>	230

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

МАСШТАБИРУЕМЫЕ РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ СИСТЕМЫ КОНКУРИРУЮЩИХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ И ИХ ОПТИМАЛЬНОСТЬ <i>П. А. Павлов</i>	234
СКВОЗНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕТВЯЩИХСЯ ТРАЕКТОРИЙ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЁТОМ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ <i>А. С. Филатъев, О. В. Янова</i>	244

ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ КОНСТРУКТОРСКО-Т ЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА <i>И. Г. Абрамова, Д. А. Абрамов</i>	250
СИСТЕМА ОЦЕНКИ СОГЛАСОВАННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С ТЕХНОЛОГИЕЙ ПРЕДПРИЯТИЯ- ИЗГОТОВИТЕЛЯ НА ЭТАПЕ ОСВОЕНИЯ <i>Г. Х. Ирзаев</i>	257
ПОНЯТИЕ «ТЕХНОЛОГИЯ»: ОБЪЕКТИВНЫЕ И СУБЪЕКТИВНЫЕ ОСНОВАНИЯ ЕГО ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА <i>Т. Н. Соснина</i>	262

CONTENTS

AVIATION AND ROCKET-SPACE ENGINEERING

ANALYSIS OF PLANE MOTION RELATIVE TO THE CENTRE OF MASS OF A DESCENT CAPSULE WITH THE THREE-HARMONIC MOMENT CHARACTERISTICS DURING ITS REENTRY <i>Ye. V. Barinova, I. A. Timbay</i>	9
ANALYSIS OF BUCKLING OF SUPPORTED AIRCRAFT MODULE SKIN UNDER COMPRESSIVE LOAD <i>O. V. Borisova, L. M. Savelyev</i>	20
INFLUENCE OF THE LOADING PARAMETER ON THE EFFICIENCY OF A THREE-STAGE TURBINE OF TURBOJET BYPASS ENGINE <i>Ye. N. Bogomolov, P. V. Kashcheyeva</i>	28
DEFINING GENERALIZED RELIABILITY CHARACTERISTICS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS INCLUDING SINGLE-USE SUBSYSTEMS <i>V. A. Danilkin, D. V. Tyshchenko</i>	34
STATISTICAL ANALYSIS OF A CAPSULE'S MOTION DURING ITS REENTRY INTO THE ATMOSPHERE WITH THE AID OF A SPACE TETHER SYSTEM <i>Yu. M. Zabolotnov, I. A. Nikonova</i>	38
SOLVING THE PROBLEM OF STABILIZING PROGRAM DEPLOYMENT OF AN ORBITAL TETHER SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT LIMITATIONS ON THE ROTARY MOTION OF THE TIP BODY <i>S. A. Ishkov, O. Yu. Zabolotnova</i>	47
DEVELOPMENT OF INFORMATION SUPPORT FOR THE SPACECRAFT CONTROL ALGORITHM DESIGN PROCESS <i>A. A. Kalentiyev, Y. M. Sygurov</i>	58
RESEARCH OF DYNAMICS OF INITIATION, PROPAGATION, GROWTH AND CLOSURE OF BUBBLE CAVITIES AND A SUPERCAVITY IN A PIPE WITH DECONTAMINATED LIQUID UNDER HYDRAULIC IMPACTS <i>Ye. A. Karakulin</i>	63
CONTROL PROGRAMS AND MOTION TRAJECTORIES OF HYPERSONIC FIRST STAGE OF AN AEROSPACE SYSTEM <i>V. I. Potapov</i>	75
ANALYSIS OF DEMANDS ON THE EVOLUTION AND DEVELOPMENT OF NEW DOMESTIC BOOSTER POPULATION <i>Yu. A. Sovetkin, N. V. Stepanova</i>	84
ASSESSMENT OF TECHNICAL AND ECONOMICAL EFFICIENCY OF DEVELOPING CARRIER ROCKETS WITH FIRST-STAGE REUSABLE UNITS <i>Yu. A. Sovetkin, D. V. Shcherbina</i>	91
COMPLEX APPROACH TO MECHANICAL TESTS OF EXECUTIVE AUTOMATIC UNITS OF SPACE VEHICLES <i>N. A. Testoyedov, A. A. Loganov, V. V. Dvirny</i>	97

**CHOOSING THE STRUCTURE OF POWER-SUPPLY
SYSTEMS FOR LOW-ORBIT SPACE VEHICLES**

Yu. A. Shinyakov, A. S. Gurtov, K. G. Gordeyev, S. V. Ivkov

103

MECHANICAL AND POWER ENGINEERING SCIENCES

**THE INFLUENCE OF OPERATIONAL AND TECHNOLOGICAL FACTORS
ON THE DYNAMIC PARAMETERS OF ELASTIC ELEMENTS
OF ELASTIC DAMPING ROTOR SUPPORTS**

V. B. Balyakin, B. B. Kosenok, I. S. Barmanov

114

**ANALYSIS OF GROUP PROPERTIES OF ROLLER INTERACTION
IN BEARINGS USING STATISTICAL**

A. N. Zhuravlyov

120

**EFFECT OF THERMAL DEFORMATIONS ON THE QUALITY
OF ASSEMBLY IN WELDING THREAD JOINTS**

A. N. Zhuravlyov, M. A. Borisov

126

**DYNAMIC ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF TURBOJET
ENGINE NOZZLE CONTROL MECHANISM**

B. B. Kosenok

133

**TOOLING SYSTEM OF EXPRESS ASSESSMENT OF EXPLOSIVE
MILITARY EQUIPMENT OBJECTS AFTER HITTING EFFECTS**

N. N. Kuzmin, V. V. Ilyin

140

**COMPULSORY IGNITION OF FUEL-AIR MIXTURE IN SMALL-SIZED
GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBERS**

A. M. Lanskiy, S. V. Lukatchev, S. G. Matveyev

145

**PECULIARITIES OF GAS TEMPERATURE FIELD FORMATION
AT THE EXIT OF SMALL-SIZED GAS TURBINE ENGINE
COMBUSTION CHAMBERS**

A. M. Lanskiy, S. V. Lukatchev, S. G. Matveyev

155

DEFINING THE SPECIFIC IMPULSE OF MIXED SOLID PROPELLANTS

N. A. Rybakov, A. I. Tsaplin

161

**DETERMINING THE INTERRELATION BETWEEN DETONATION
CHARACTERISTICS INDICATORS AND ELECTRODYNAMIC
PARAMETERS OF HYDROCARBON FUELS ON THE BASIS OF STATISTICAL
MODELLING OF COMPONENTAL STRUCTURE**

B. V. Skvortsov, Ye. A. Silov, A. V. Solntseva

166

**OBTAINING THE ANALYTICAL SOLUTION OF THE HEAT BOUNDARY LAYER
EQUATION BASED ON INTRODUCING ADDITIONAL BOUNDARY CONDITIONS**

Ye. V. Stefanyuk, I. V. Kudinov

174

MODEL OF ELECTROMIGRATION IN THIN METAL FILMS

K. N. Tukmakov, A. V. Arkchipov

185

**OPTOELECTRONIC DEVICE FOR THE CONTROL
OF HYDROCARBON FUEL CAVITATION TREATMENT**

R. A. Tsaryov

195

**ELECTRONICS, MEASURING DEVICES, RADIO
ENGINEERING AND COMMUNICATION**

RAIL LINE MODELS FOR ADAPTIVE RECEIVER TRACK CIRCUITS <i>F. R. Akhmadullin</i>	202
MEASURING SCATTLERING CROSS-SECTION UNDER POOR ANECHOICY CONDITIONS <i>V. S. Batchurin, D. M. Batukhtin, V. D. Pyshnyj</i>	209
QUALITY INDICES OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE CONTROLLED BY THE DISCHARGE CURRENT CHANNEL <i>N. Ye. Konyukhov, P. A. Nikolayev, R. R. Soyeshv</i>	216
TWO MODELS OF RAIL LINES FOR ADAPTIVE RECEIVER TRACK CIRCUITS <i>Yu. I. Polevoy</i>	222
MATHEMATICAL MODEL OF AN EDDY CURRENT CONVERTER FOR TESTING DISCONTINUOUS STRUCTURE SAMPLES <i>A. V. Polulekh, G. M. Gainullina</i>	230

**CONTROL, COMPUTATIONAL EQUIPMENT
AND INFORMATION SCIENCE**

SCALABLE DISTRIBUTED SYSTEMS OF COMPETITIVE INTERACTING PROCESSES AND THEIR OPTIMALITY <i>P. A. Pavlov</i>	234
THROUGH OPTIMIZATION OF BRANCHING TRAJECTORIES IN VIEW OF RANDOM DISTURBANCES <i>A. S. Filatyev, O. V. Yanova</i>	244

HUMANITIES

CHOICE OF PARAMETERS OF AN ENGINEERING PRODUCTION PREPARATION SYSTEM <i>I. G. Abramova, D. A. Abramov</i>	250
SYSTEM FOR ASSESSING THE CONSISTENCY OF RADIOELECTRONIC DEVICE DESIGN AND THE MANUFACTURER'S TECHNOLOGY AT THE STAGE OF MASTERING <i>G. Kh. Irzayev</i>	257
THE CONCEPT OF TECHNOLOGY: OBJECTIVE AND SUBJECTIVE FOUNDATIONS OF ITS TERMINOLOGICAL STATUS <i>T. N. Sosnina</i>	262