

**Сведения об авторах**

- Виктор Юрьевич Будков** — канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; научный сотрудник; E-mail: budkov@iias.spb.su
- Андрей Леонидович Ронжин** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; зам. директора по научной работе; E-mail: ronzhin@iias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.14 г.

УДК. 519.711.72

А. Н. ПАВЛОВ, Д. А. ПАВЛОВ, Б. В. МОСКВИН, К. Л. ГРИГОРЬЕВ

**МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ  
ГИБКОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ  
ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Представлена модификация математической модели процесса планирования децентрализованной обработки информации в динамически изменяющихся условиях с учетом временных ограничений на выполнение операций обработки, хранения и передачи информационных потоков в космических системах.

**Ключевые слова:** динамическая сеть, информационное взаимодействие, невязные временные ограничения.

Анализ основных тенденций развития современных информационных технологий показывает, что несмотря на значительный рост производительности аппаратно-программных средств и повышение интенсивности передачи потоков данных существенно возрастают требования потребителей к оперативности доставки информации, ее полноте и качеству, а также возникают новые более информационно-емкие задачи.

Эта проблема особенно актуальна для стремительно развивающегося космического сектора информационного обеспечения гражданских и военных потребителей, так как помимо известных проблем, имеющих место в любой информационно-вычислительной системе, на качество функционирования космических систем (КС) влияет ряд ограничений, а именно: динамическое изменение структуры информационного взаимодействия КС, обусловленное преимущественно баллистикой движения космических аппаратов (КА); особенности целевого функционирования КС; слабая пропускная способность каналов космической связи (по сравнению с пропускной способностью наземных каналов связи); функционирование КС в рамках жестких временных и ресурсных ограничений.

Существующие подходы к управлению информационными КС (ИКС) зачастую обращены к так называемым „слепым“ методам реконфигурации, как правило, сводящимся к имитационному моделированию разрабатываемых и известных систем, к рассмотрению частных сторон их функционирования и выявлению лишь общих характеристик. В современных условиях такой подход к управлению сложными ИКС представляется неперспективным, так как не позволяет ответить на главные вопросы — как оптимально (рационально) распределять информационные потоки; где, когда и сколько информации необходимо получать, хранить, обрабатывать и отправлять потребителю в динамически изменяющихся условиях и при жестких временных ограничениях.

В качестве примера ИКС может быть рассмотрена система, представляющая собой информационную сеть КА и обеспечивающая обработку и информационное взаимодействие КА

друг с другом и с наземными потребителями информации. Структура и параметры такой сети из-за постоянного орбитального движения КА и ряда других ограничений изменяются, или, другими словами, в пространстве формируется динамическая сеть (ДС). При этом предполагается, что структура и параметры (характеристики) сети изменяются в дискретные моменты времени, когда весь временной интервал (интервал планирования) разбивается на подынтервалы, соответствующие постоянству структуры. Также предполагается, что в самом общем случае каждый элемент (узел) ДС оборудован унифицированной многофункциональной аппаратурой и может выполнять такие технологические операции, как хранение, передача и обработка потоков информации различного вида; кроме того, известны технические характеристики указанной аппаратуры — объем запоминающего устройства (ЗУ) в каждом узле, производительность вычислительных средств; пропускная способность каналов связи между узлами сети. Логическая взаимосвязь технологических операций, выполняемых в узлах ДС, представлена схемой, приведенной на рис. 1.

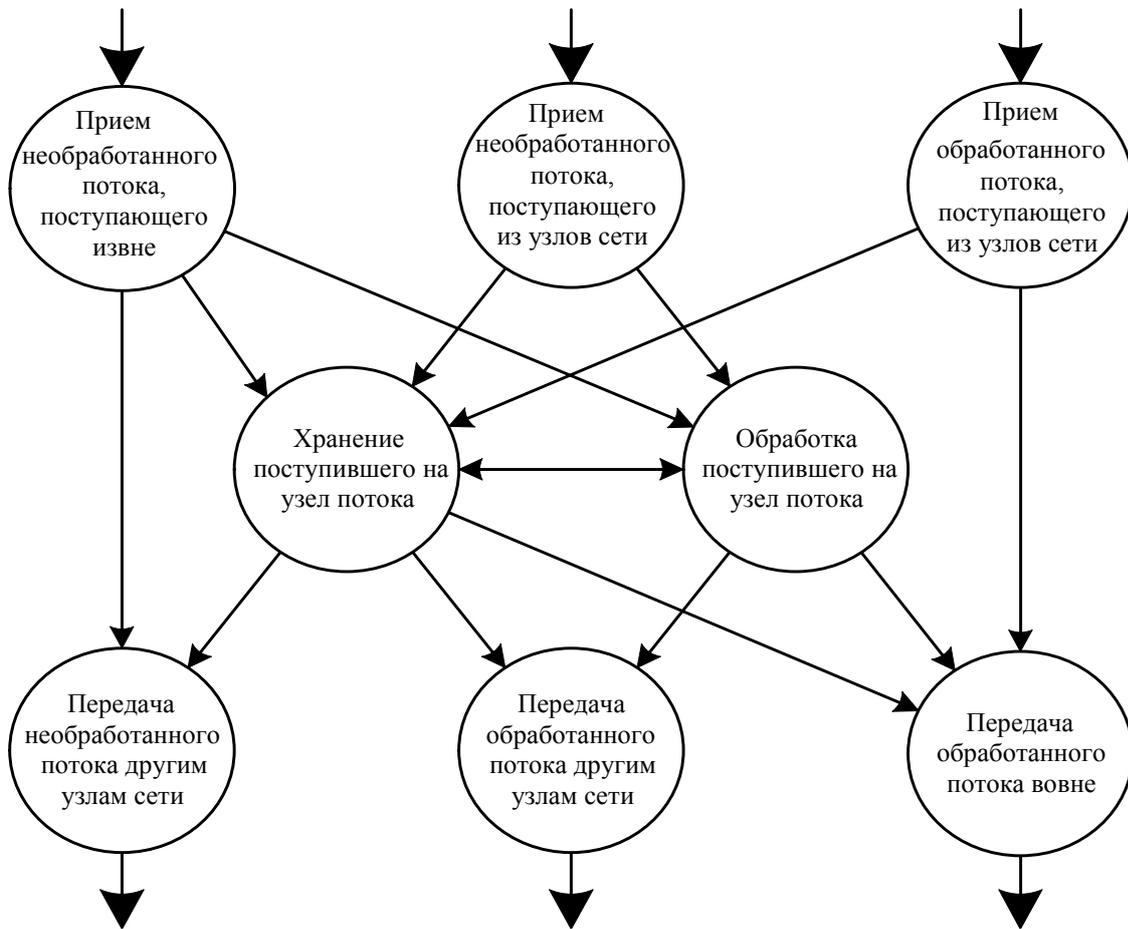


Рис. 1

При таком подходе к рассмотрению ИКС особую актуальность приобретает постановка и решение задачи гибкого перераспределения технологических операций передачи, обработки и хранения многопоточковой информации в динамической сети с учетом временных ограничений, заданных интервалами постоянства ее структуры.

Рассмотрим сеть с двумя типами потоков — потоком целевой информации и потоком телеметрической информации (рис. 2). Треугольниками обозначены ЗУ узлов сети объемом  $V_i$ ,  $i = \overline{1, 7}$ , прямоугольниками — блоки обработки с интенсивностью  $\kappa_{ip}$ ,  $i = \overline{1, 7}$ ,  $p \in [p, c]$ , потоков информации в узлах, также указаны интенсивности  $\omega_{ijp}$ ,  $i = \overline{1, 7}$ ,  $j = \overline{1, 7}$ ,  $i \neq j$ , передачи того или иного вида информации между узлами сети. Потоки информации поступают через

узлы 1 и 6, узел 4 является центральным узлом распределения обработанной информации, узел 5 характеризует потребителя информации. Поступающая информация, с интенсивностью  $\psi_{ip}$ , может обрабатываться как в узлах 1 и 6, так и в промежуточных узлах 2, 3 и 7.

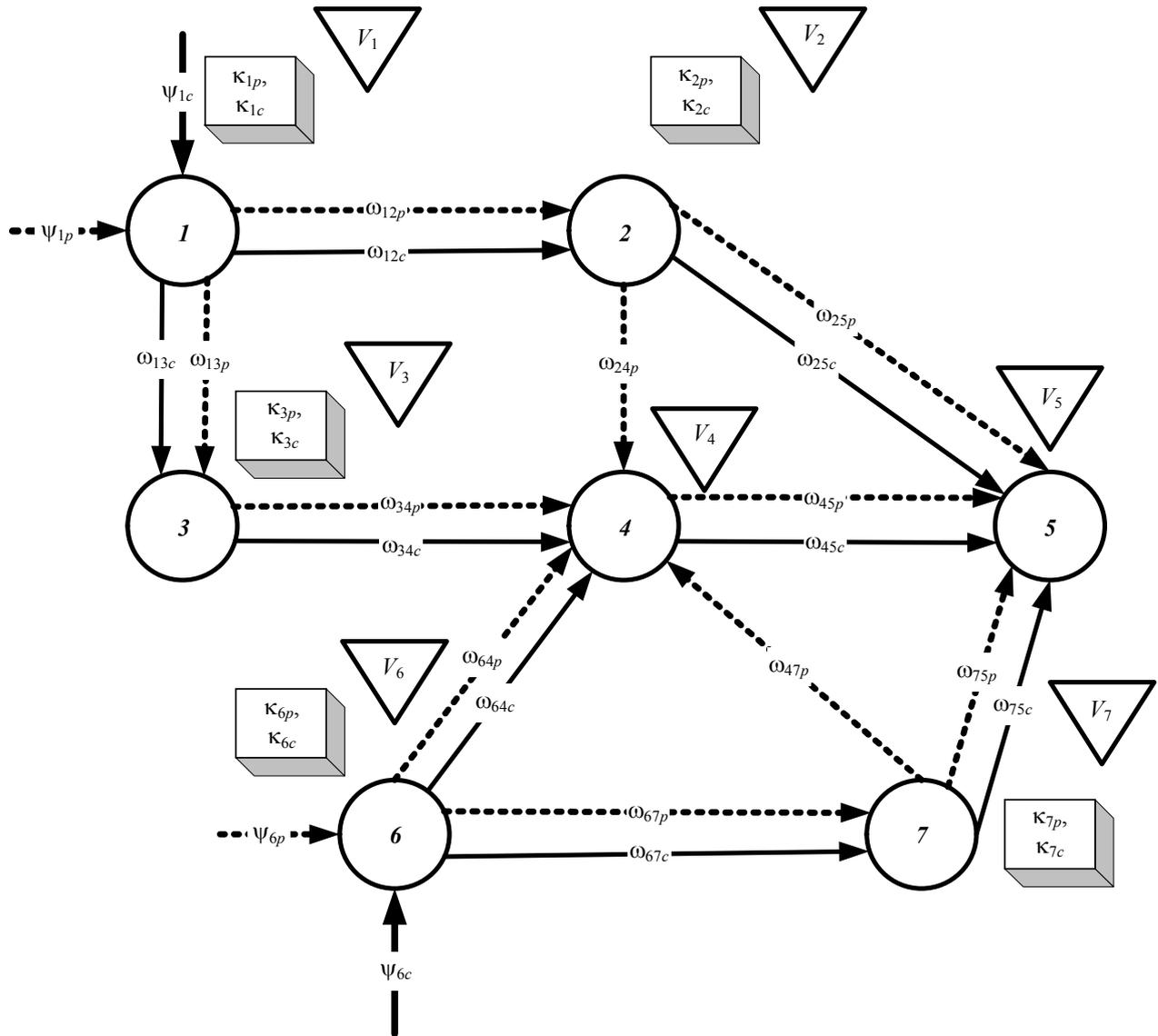


Рис. 2

Вариант структурной динамики рассматриваемой сети (в упрощенном виде) представлен на рис. 3.

Содержательная постановка задачи планирования гибкого перераспределения технологических операций информационного взаимодействия элементов ДС имеет следующие особенности:

- если объемы поступающей информации превышают возможности ДС по обработке, хранению и передаче данных, то невостребованная информация теряется;
- необходимо учитывать, что суммарное время последовательного выполнения технологических операций обработки и передачи потоков информации ограничивается длительностью интервала постоянства структуры ( $T_k$ );
- необходимо учитывать энергетические расходы на выполнение указанных технологических операций.

В целом задача состоит в нахождении плана по обработке, хранению и передаче информационных потоков в целях обеспечения потребителей полной и качественной информацией с минимальными энергетическими затратами.

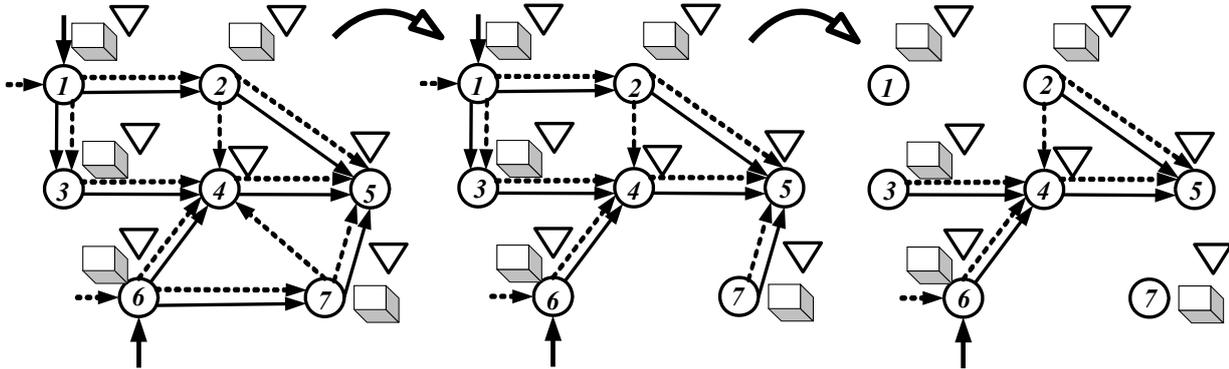


Рис. 3

В работах [1, 2] приведена математическая модель процесса планирования гибкого перераспределения операций управления потоком между элементами и подсистемами информационной системы. Данная модель позволяет определить агрегированный вариант технологии приема, хранения и обработки данных для  $\chi$ -й структуры динамической сети:

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i \rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} z_{\chi i \rho k} - \alpha_4 v_{\chi} \rightarrow \max ; \tag{1}$$

$$\left( \sum_{j \in N_{\chi i}^+} x_{\chi i j \rho k} - \sum_{j \in N_{\chi i}^-} x_{\chi j i \rho k} \right) + (y_{\chi i \rho k} - y_{\chi i \rho (k-1)}) + g_{\chi i \rho k} + z_{\chi i \rho k} = I_{\chi i \rho k}, \tag{2}$$

$$i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi};$$

$$v_{\chi} - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi i j \rho k} - \sum_{\rho=1}^p \beta_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i \rho k} - v_{\chi i} = R_{\chi 0 i}, \quad i \in N_{\chi}; \tag{3}$$

$$y_{\chi i \rho k} + \eta_{\chi i k} = V_{\chi i}, \quad i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi}; \tag{4}$$

$$0 \leq x_{\chi i j \rho k} \leq \omega_{\chi i j \rho k} (t_k - t_{k-1}), \quad 0 \leq g_{\chi i \rho k} \leq \psi_{\chi i \rho k} (t_k - t_{k-1}), \quad i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi}; \tag{5}$$

$$y_{\chi i \rho k} \geq 0, \quad z_{\chi i \rho k} \geq 0, \quad v_{\chi i} \geq 0, \quad \eta_{\chi i k} \geq 0, \quad v_{\chi} \geq 0, \quad i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi}. \tag{6}$$

В выражениях (1)–(4)  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4 \geq 0$  ( $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$ ) — коэффициенты значимости заданных показателей, устанавливаемые лицом, принимающим решение, в конкретных условиях функционирования системы;  $\lambda_{\rho}$  — коэффициент сжатия информации после обработки;  $\gamma_{\rho}$  — коэффициент, характеризующий значимость теряемого потока  $\rho$ -го типа; переменные  $x_{\chi i j \rho k}, y_{\chi i \rho k}, y_{\chi i \rho (k-1)}, g_{\chi i \rho k}, z_{\chi i \rho k}$  являются неизвестными и характеризуют соответственно объем переданного потока  $\rho$ -го типа из  $i$ -го узла в  $j$ -й на интервале  $T_k$ , объем сохраненного потока  $\rho$ -го типа в  $i$ -м узле на интервале  $T_k$ , объем сохраненного потока  $\rho$ -го типа в  $i$ -м узле на интервале  $T_{k-1}$ , объем обработанного потока  $\rho$ -го типа в  $i$ -м узле на интервале  $T_k$  и объем потерянного потока  $\rho$ -го типа в  $i$ -м узле на интервале  $T_k$ ;  $r_{ij\rho}$  — коэффициент энергетических затрат на передачу информации от  $i$ -го узла  $j$ -му;  $\beta_{i\rho}$  — коэффициент энергетических затрат на обработку потока  $\rho$ -го типа;  $N_{\chi i}^+$  — множество узлов, способных передать информацию  $i$ -му узлу;  $N_{\chi i}^-$  — множество узлов, способных принять информацию от  $i$ -го узла.

Выражения (5) соответствуют ограничению времени, отведенному на выполнение технологических операций в рамках текущего интервала  $T_k$  ( $t_{k-1}, t_k$  — начало и окончание интервала); здесь величина  $\omega_{\chi ij\rho k}$  характеризует интенсивность передачи потока  $\rho$ -го типа из  $i$ -го узла в  $j$ -й, а величина  $\psi_{\chi ipk}$  — интенсивность обработки потока  $\rho$ -го типа в  $i$ -м узле.

Для того чтобы учесть указанную выше особенность рассматриваемой задачи, связанную с длительностью интервала постоянства структуры, требуется ввести в математическую модель (1)—(6) дополнительные переменные и ограничения.

Так, введем новые переменные, отражающие длительность выполнения операций передачи и обработки информации, тогда объемы информационных потоков можно представить следующим образом:

$$x_{\chi ij\rho k} = \omega_{\chi ij\rho k} t_{\chi ij\rho k}^x, \quad g_{\chi ipk} = \psi_{\chi ipk} t_{\chi ipk}^g, \quad i, j \in N_\chi, \quad \rho \in P, \quad k = 1, \dots, L_\chi, \quad (7)$$

где  $t_{\chi ij\rho k}^x$  — искомое время, требуемое на передачу потока объемом  $x_{\chi ij\rho k}$ ;  $t_{\chi ipk}^g$  — время, требуемое на обработку потока объемом  $g_{\chi ipk}$ .

Тогда временные ограничения на обработку всех информационных потоков в  $i$ -м узле и передачу из  $i$ -го узла  $j$ -му определяются выражениями

$$0 \leq \sum_{\rho=1}^p t_{\chi ij\rho k}^g \leq t_k - t_{k-1} = T_k, \quad 0 \leq \sum_{\rho=1}^p t_{\chi ij\rho k}^x \leq t_k - t_{k-1} = T_k, \quad i \in N_\chi, \quad \rho \in P, \quad k = 1, \dots, L_\chi. \quad (8)$$

Наряду с введенными переменными необходимо ввести ограничения на суммарное время последовательной обработки и передачи информационного потока  $\rho$ -го типа от источников до потребителей. В рассматриваемом случае имеет смысл осуществлять поиск всех путей прохождения информационного потока  $\rho$ -го типа от каждого его источника до каждого конечного получателя, тогда в общем виде временные ограничения можно записать следующим образом:

$$0 \leq \sum_{a=1}^{N_w} t_{\chi i_a \rho k}^g + \sum_{a=2}^{N_w} t_{\chi i_{(a-1)} i_a \rho k}^x \leq t_k - t_{k-1} = T_k, \quad w \in W^k, \quad \rho \in P, \quad k = 1, \dots, L_\chi, \quad (9)$$

где  $w \in W^k$  — конкретный путь  $w = \langle (i_1, i_2), (i_2, i_3), \dots, (i_{N_w-1}, i_{N_w}) \rangle$  из множества всех рассматриваемых путей прохождения информационного потока  $\rho$ -го типа на  $k$ -м интервале времени.

Таким образом, посредством замены переменных в модели (1)—(6) по формулам (7) и ввода ограничений (8), (9) вместо ограничений (5) получена модифицированная математическая модель планирования гибкого перераспределения технологических операций информационного взаимодействия элементов ИКС.

В заключение отметим следующее. Неявные временные ограничения принято относить к классу косвенных ограничений, учет которых в „высоконагруженных“ мобильных информационных системах, к которым относятся ИКС, является гарантией правильного планирования комплекса операций информационного взаимодействия. В целом, как показывают предварительные эксперименты, основное достоинство разработанной модели состоит в том, что по сравнению с ранее предложенными моделями и алгоритмами планирования, ориентированными на определение агрегированного варианта гибкого перераспределения операций приема, хранения и обработки данных, ее применение позволяет повысить качество планов передачи и обработки информации в динамически изменяющихся условиях.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (мероприятие 6.1.1), Университета ИТМО (субсидия 074-U01), Программы научно-технического сотрудничества Союзного государства „Мониторинг СГ“

(проект 1.4.1–1), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-07-12120, 13-06-0087), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект № 2.11), проектов ESTLATRUS 2.1/ELRI-184/2011/14, 1.2/ELRI-121/2011/13.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комбинированные модели управления структурной динамикой сложных технических объектов / Б. В. Москвин, Е. П. Михайлов, А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 11. С. 8—12.
2. Павлов А. Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Тр. СПИИРАН. 2013. Вып. 5. С. 143—168.

#### Сведения об авторах

- Александр Николаевич Павлов** — канд. техн. наук, доцент; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: pavlov62@list.ru
- Дмитрий Александрович Павлов** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космическими комплексами, Санкт-Петербург; E-mail: dpavlov239@mail.ru
- Борис Владимирович Москвин** — канд. техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космическими комплексами, Санкт-Петербург; E-mail: z-moskvin@mail.ru
- Кирилл Леонидович Григорьев** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космическими комплексами, Санкт-Петербург; E-mail: Grigorjev.kir@yandex.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.14 г.

УДК 629.7.06.062

А. Ю. КУЛАКОВ

### МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ

Предложена упрощенная модель процесса функционирования космического аппарата, предназначенная для оценочного расчета его топливного ресурса и срока активного существования. При построении учитывается влияние сбоев (отказов) бортовой аппаратуры системы управления движением на расход топлива как при штатной работе, так и в нештатных ситуациях.

**Ключевые слова:** моделирование сбоев и отказов, топливный ресурс, нештатные ситуации, бортовые системы КА.

Одним из основных показателей функционирования космического аппарата (КА) на рабочей орбите является срок его активного существования, который жестко регламентирует пределы невозобновляемых ресурсов бортовой аппаратуры (БА) и запас топлива в баках двигательной установки (ДУ) КА. При этом запас топлива в баках на фиксированный срок зависит от периодичности включения установки и единичного расхода топлива при различных режимах работы КА. Поэтому для штатной работы номинальное значение топливного ресурса определяется числом режимов функционирования ДУ КА в заданном интервале времени (сутки, месяц, год). К ним относятся режимы коррекций орбиты, которые задаются ис-