

УДК 629.78

АДАПТАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ К ОБЪЕКТУ ТЕЛЕКОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ

В.А. Горбаруков

В.А. Горбаруков

Описаны цели и задачи адаптации системы технического диагностирования космического аппарата повышенной автономности функционирования к объекту контроля. Представлены аналитические зависимости точности (или достоверности) оценки состояния объекта контроля от параметра интенсивности датчиков-преобразующей аппаратуры, выступающего в роли управляющего воздействия, что позволяет формулировать задачи оптимального управления процессом телеметрических измерений (измерительными операциями) на борту или с использованием наземной инфраструктуры системы информационно-телеметрического обеспечения управления космическими аппаратами.

Ключевые слова: космический аппарат повышенной автономности функционирования, программа телеметрических измерений, система технического диагностирования, система информационно-телеметрического обеспечения

Adaptation of the Technical Diagnostics System to the Object of Telecontrol Based on the Rationalization of Telecontrol Programs.

V.A. Gorbarukov

The objectives and tasks of adapting the system of technical diagnostics of a spacecraft with increased autonomy of operation to the object of control are described. The analytical dependences of the accuracy (or reliability) of the assessment of the condition of the control object on the intensity parameter of the sensor-converting equipment acting as a control action are presented, which allows formulating problems of optimal control of the process of telemetry measurements (measuring operations) on board or using the ground-based infrastructure of the information and telemetry system for spacecraft control.

Keywords: spacecraft with increased autonomy of operation, telemetry measurement program, technical diagnostics system, information and telemetry support system

Особенностью функционирования и контроля космических аппаратов (КА) с применением наземных и бортовых средств управления является структурно-параметрическая неопределенность системы технического диагностирования (СТД), сочетающаяся с высоким уровнем неопределенности процессов, характерных для высокоавтономных объектов телеконтроля, особенно при возникновении нештатных ситуаций на борту.

Данное обстоятельство относится в том числе к транспортным пилотируемым кораблям (ТПК) и транспортным грузовым кораблям (ТГК), основной тенденцией систем управления которыми является стремление к полной автоматизации основных этапов полета (баллистические схемы ускоренной стыковки за 2 витка и за 4 витка орбиты), в ходе которых внезапно возникающие сбои и неисправности должны быть автоматически парированы [1].

Распределение задач управления между бортовым комплексом управления (БКУ) и наземным (НКУ) изменилось в пользу БКУ с 20 % в 70-е гг. до 90 % в настоящее время [2]. Аналогичным образом изменилась и доля задач контроля технического состояния (ТС) и диагностирования бортовой аппаратуры КА, решаемых бортовыми средствами: если в 60-е гг. о ТС и восстановлении работоспособности КА при возникновении нештатных ситуаций на борту КА принимались в НКУ, то в настоящее время, по мнению разработчиков перспективных КА ДЗЗ, до 90 % таких нештатных ситуаций могут отрабатываться с использованием возможностей БКУ [2, 6, 7].

Параметры и структуры информационных и материально-энергетических составляющих бортовых систем (БС) КА на различных этапах их жизненного цикла изменяются под действием объективных и субъективных, внутренних и внешних причин или их комбинаций. Достижению требуемых значений целевых показателей эффективности применения КА препятствуют различные внешние и внутренние возмущающие факторы. Наиболее существенными из внешних факторов, особенно при длительном полете, как, например, российский сегмент Международной космической станции (РС МКС) либо автоматические КА, орбиты которых расположены вблизи естественных радиационных поясов Земли, являются воздействия тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетических протонов внешних излучений (космических, солнечных, радиационных поясов Земли) с эффектом накопления. Влияние данных факторов ускоряет деградацию комплектующих электрорадиоэлементов для БС, вызывая их сбои и отказы, изменение текущего ТС относительно их исходного (штатного) состояния, что проявляется в виде нештатных или аномальных ситуаций на борту КА [3, 4].

Другими словами, на практике приходится постоянно сталкиваться со структурной динамикой КА в целом и его бортовой аппаратуры в частности. В этих условиях для повышения (сохранения, восстановления) уровня работоспособности и возможностей КА, особенно повышенной автономности функционирования, необходимо осуществлять управление их структурами, что невозможно без адаптации процедур телеконтроля и телеизмерений.

1. Способы адаптации СТД

Целью функционирования СТД является решение четырех задач технической диагностики (контроль, прогноз, генез технического состояния БС КА и поиск мест и причин неисправностей [5]) с заданными показателями

качества (достоверность, оперативность, полнота и др.). В свою очередь, показатели качества решения задач СТД являются функционалами варьируемых параметров и настроек бортовых информационно-телеметрических систем, характеристик каналов связи, баллистическими и информационными характеристиками объекта контроля и др. Поэтому процедуры адаптации СТД прежде всего к объекту телеконтроля являются неотъемлемой частью интеллектуализации борта.

Применительно к системе информационно-телеметрического обеспечения (СИТО) или БКУ под адаптацией подразумевается процесс однократного или многократного последовательного решения задачи оптимизации информационной структуры и параметров СИТО при обнаружении фактов преднамеренного или естественного воздействия на объект телеконтроля, деградации его телеметрируемых характеристик, изменения условий передачи ТМИ, изменений структурно-параметрических характеристик наборов бортовых и наземных средств трансляции и вторичной обработки ТМИ и т. д.

С информационной точки зрения описание процессов адаптации при телеконтроле может быть основано на представлении множества N контролируемых за время T параметров S . Множество $\{S, N, T\}_{\max}$ задается программой телеконтроля. Ее объем и содержание определяются априорными данными о назначении и режимах функционирования БС, возможностями СТД (БИТС, БКУ, командно-измерительной системой и др.), а также задачами анализа ТС, поиска и локализации неисправностей в наиболее сложных условиях применения.

Исходя из задач телеконтроля на каждом этапе, объем, содержание ТМИ и структура передаваемых сигналов должны приспосабливаться к объекту телеконтроля и условиям передачи, обработки и анализа информации. При априорной недостаточности ресурсов и ограниченных возможностях СТД адаптация по координатам S , N и T в пределах множества $\{S, N, T\}$, сформированного по программе телеконтроля, может выполняться несколькими способами:

1. Изменением состава и содержания контролируемых параметров $\lambda_j(t)$; погрешности представления сигналов $s_j(t)$ и достоверности передачи ТМИ путем изменения режима телеконтроля (перехода из режима телесигнализации в режим телеизмерения и наоборот). Это может быть произведено за счет управления информативностью основных каналов БИТС или подключения резервных. При нормальном функционировании объекта телеконтроля передача ТМИ должна осуществляться в режиме телесигнализации. При выявлении неисправностей СТК переводится в режим телеизмерения или подключается резервный канал БИТС с более высокой информативностью.

2. Подключением для последовательного контроля с помощью СТД с ограниченной информативностью новых групп параметров из множества $\{S, N, T\}_{\max}$, их преобразование и передача по каналам связи. При этом

способе обеспечивается возможность контроля сложных БС и технологических процессов на борту КА в режиме телесигнализации. Естественно, время телеконтроля возрастает.

3. Изменением (управляемым) состояний объекта телеконтроля при фиксированном числе контролируемых параметров $\lambda_k(t)$, $k = 1, 2, \dots$ из множества $\{S, N, T\}_{\max}$. Такой способ позволяет проследить динамику поведения параметров $\lambda_k(t)$, и по последовательности изменения состояний $\{C_k\}$ определить текущее состояние C_k и качество функционирования объекта телеконтроля. При ограниченных возможностях СТД совокупность контролируемых параметров $\{\lambda_k(t)\}$ должна быть представительной с точки зрения характеристики состояний $\{C_k\}$.

4. Считыванием из памяти бортового компьютера полученной информации, характеризующей «предысторию» поведения объекта телеконтроля и ее передачу по широкополосному каналу СТД. Это позволяет восстановить логическую последовательность всех исходных состояний $\{C_k\}$ и на этой основе оценить текущее состояние C_k качество функционирования объекта телеконтроля.

Сформированные в процессе телеконтроля параметры $\lambda_j(t)$ и сигналы $s_j(t)$ должны быть в дальнейшем подвергнуты адаптивному представлению и передаче по каналам связи со случайными параметрами. Реализация любого из рассмотренных методов адаптивного управления структурой, алгоритмами, режимами работы СТД и структурой передаваемых сигналов предполагает наличие информационной, временной, вычислительной и другой избыточности и ресурсов, необходимых для решения задач телеконтроля в наиболее сложных условиях с заданным качеством.

2. Математическая модель процесса опроса датчиков-преобразующей аппаратуры

Для любого случайного процесса его реализацию $y(t)$ можно представить каноническим разложением:

$$y(t) = F^T(t) A, \quad (1)$$

в котором вектор $F(t)$ состоит из априорно известных функций $f_k(t)$, установленных в результате предварительного изучения БС КА, а компоненты вектора A являются случайными величинами и подлежат оценке по результатам измерений.

Математическая модель процесса на выходе контролирующего датчика (функция наблюдения):

$$Z(t) = F^T(t) A + E(t), \quad (2)$$

где $E(t)$ – случайная функция, отражающая случайные ошибки измерений.

Управление процессом измерений при телеконтроле организуется путем подключения по разработанной программе выхода датчика к подсистеме обработки измерений (подсистеме наблюдения). Определение указанной программы, обеспечивающей при минимальных затратах (минимальном объеме измерений) требуемое качество оценки, и составляет суть задачи управления контролем (управления измерительной операцией или адаптации с обратной связью по управляющим параметрам системы телеизмерений).

В математической модели функция подключения датчика может быть представлена некоторой переключающей функцией $v(w(t))$ управляющего параметра $w(t)$, отражающего программу управления измерениями (рис. 1).

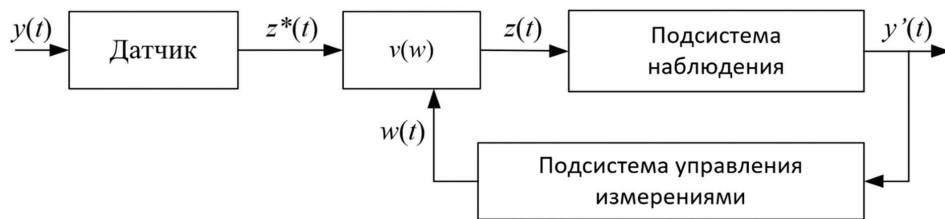


Рис. 1. Обобщенная схема управления датчиком в системе телеизмерений

Один из возможных вариантов задания переключающей функции в схеме управления измерениями БИТС – СИТО/БКУ состоит в представлении ее в виде:

$$v(w(t)) = \Xi(w(t)), \quad (3)$$

где $\Xi(w(t))$ – ступенчатая функция: $\Xi(w) = \begin{cases} 1 & \text{при } w > 0; \\ 0 & \text{при } w \leq 0. \end{cases}$

С учетом изложенного функцию наблюдения непрерывного управляемого процесса телеизмерения (модель), соответствующую модели (3), можно представить в виде:

$$Z(t) = v(w(t)) [F^T(t) A + E(t)]. \quad (4)$$

На практике реализуются программы телеизмерений. Организуются они путем опроса датчиков в соответствии с заданным законом. Для такого варианта будем полагать, что на интервале наблюдения (t_0, t_f) в моменты времени $t_i, i = 1 \dots l$ проводится l измерений. В этом случае модель (4) выражается системой уравнений:

$$z_i = v(w_i) [F_i^T A + E_i], \quad i = \overline{1, l}, \quad (5)$$

в которой: $z_i = z(t_i)$; $w_i = w(t_i)$; $F_i^T = F^T(t_i)$; $E_i = E(t_i)$.

Математические модели (4) и (5) соответственно для непрерывного и дискретного процессов измерений отражают возможность изменения программы телеизмерений путем выбора управляющего параметра w . Наряду с этим возможен более широкий подход к управлению процессом телеизмерений, включающий также и выбор состава измерителей. Рассмотрим сущность такого подхода на примере использования системы измерителей.

Организация контроля реализации процесса $y(t)$ системой, состоящей из w_0 датчиков, показана на рис. 2. Применение w_0 датчиков для контроля одиночного процесса здесь обусловлено тем, что точность отдельного датчика не позволяет обеспечивать требуемую точность (достоверность) контроля в каждый данный момент времени, последняя достигается сглаживанием совокупности w_0 измерений. Для l возможных моментов времени проведения измерений такая система максимально позволит получить w_0 l значений измеренных величин.

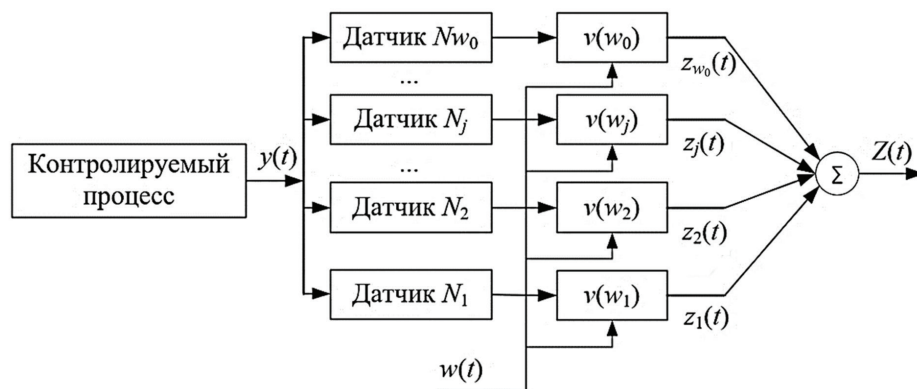


Рис. 2. Обобщенная схема управления системой телеизмерений

В общем случае каждый из датчиков в такой системе может иметь различные характеристики точности и управляться независимо от других. Для такого варианта вводится вектор управляющих воздействий $W(t) = [w_1, w_2 \dots w_j \dots w_0]^T$. Однако сущность организации управления сохранится и в случае, когда все датчики будут однотипны. При названных предположениях для результата телеконтроля значение будет иметь лишь число включенных в каждый момент времени однотипных датчиков. Управляющее воздействие для любого времени $t_j \in (t_0, t_f)$ при этом может быть выражено переменной w_j , принимающей значения из множества $[0, w_0]$ и определяющей число одновременно включаемых датчиков контроля. При такой интерпретации переменной w_j ее можно считать интенсивностью телеметрических измерений.

Одновременное получение нескольких измерений одного и того же значения процесса (при $w_j > 1$) позволяет произвести сглаживание ошибок измерений путем получения среднего значения:

$$z_i = \frac{1}{w_i} \sum_{j=1}^{w_i} z_{ij}. \quad (6)$$

Математическая модель управляемого процесса контроля для данного варианта:

$$z_i = v(w_i) \left[F_i^T A + \frac{1}{w_i} \sum_{j=1}^{w_i} e_{ij} \right] \quad (7)$$

отражает возможность выбора состава и программы измерений.

Случайные ошибки измерений $E_i = \{e_{ij}\}$ в модели (7) определяются значениями погрешностей датчиков e_{ij} . Относительно последних предполагается, что они распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием $M\{e_{ij}\} = 0$, некоррелированы и имеют дисперсию D_{eij} . При указанном предположении закон распределения ошибок D_{Ei} также будет нормальным, так как преобразования (6) линейны и переключающая функция $v(w(j))$ не осуществляет преобразования, а лишь выделяет выборку из последовательности измерений $z^*(t)$. С учетом приведенного статистического описания случайных ошибок E_i математическая модель (7) позволяет формулировать задачу определения состава и программы телеизмерений.

Проведенное рассмотрение схемы контроля некоторой функции $y(t)$ системой измерителей (см. рис. 2) наглядно поясняет другой, практически более важный вариант, предполагающий использование одного измерителя, реализующего последовательность z_{ij} , содержащую w_i измерений на некотором временном интервале τ . Организация такого варианта предполагает постоянное значение $y(t)$ на выбранном интервале τ . Это означает, что реальное изменение $y(t)$ представляется аппроксимируемой кусочно-постоянной функцией (рис. 3).

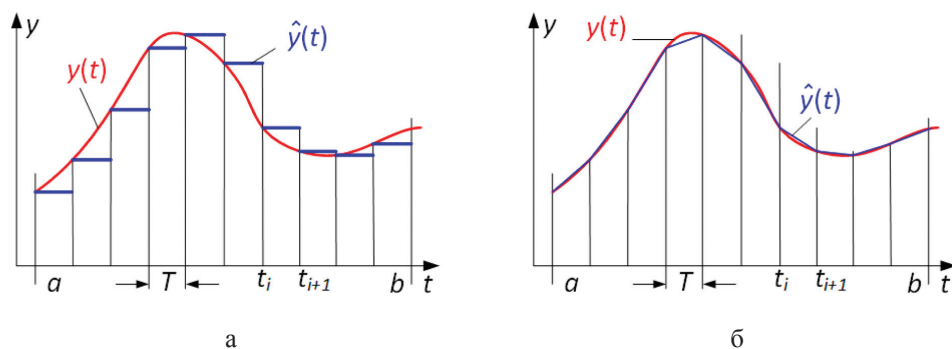


Рис. 3. Виды аппроксимации: а – ступенчатая (нулевого порядка);
б – линейная (первого порядка)

Нетрудно убедиться, что исходя из условия требуемой точности представления $y(t)$ для решения задачи планирования телеизмерений всегда можно подобрать допустимый интервал аппроксимации τ .

3. Процедура определения рациональной программы телеконтроля

При определении рациональной программы телеконтроля необходимо выразить конечный эффект контроля – результирующую точность (или достоверность) оценки значений реализации $y(t)$ в некоторые заданные моменты времени t^* через управляющие переменные $v(w_i)$, w_i .

Согласно разложению (1) определение оценки $y^*(t)$ сводится к нахождению оценки вектора A и последующему вычислению:

$$y^*(t) = F^T(t^*) A^*. \quad (8)$$

Для простоты рассмотрим вариант, когда оценку $y^*(t)$ необходимо получить лишь для одного значения момента времени t^* .

Представим возможные значения измерений z_i на интервале наблюдения (t_0, t_f) в виде вектора $Z = [z_1, z_2 \dots z_i \dots z_l]^T$. При расчете программы телеизмерений будем полагать, что в подсистеме наблюдения используется алгоритм оценки максимального правдоподобия, определяемый максимизацией функции плотности распределения вероятностей значений z при условии, что значению $y(t_0, t_f)$ соответствовал вектор коэффициентов A . Это означает, что оценка A^* находится из условия

$$w\{Z/A\} \rightarrow \max_A, \quad (9)$$

в котором функция $w\{Z/A\}$ согласно модели (7) зависит от плотности совместного распределения $w\{E_1, E_2 \dots E_l\}$. На основании этого для принятого нормального закона распределения ошибок измерений алгоритм оценки:

$$A^* = \left[\sum_{i=1}^l v(w_i) \frac{w_i}{D_{ei}} F_i F_i^T \right]^{-1} \sum_{i=1}^l v(w_i) \frac{w_i}{D_{ei}} F_i z_i. \quad (10)$$

Введем обозначение

$$S_i = \left[\sum_{i=1}^l v(w_i) \frac{w_i}{D_{ei}} F_i F_i^T \right]^{-1} F_i, \quad (11)$$

с учетом которого алгоритм (10) примет вид:

$$A^* = \sum_{i=1}^l v(w_i) \frac{w_i}{D_{ei}} F_i z_i. \quad (12)$$

Ошибка оценки $E_Q = |A^* - A|$ при использовании алгоритма (12) и математической модели (7) определяется выражением:

$$E_Q = \sum_{i=1}^l v(w_i) w_i S_i E_i D_{Ei}^{-1}, \quad (13)$$

из которого следует, что математическое ожидание ошибок оценки $M\{E_Q\} = 0$, а корреляционная матрица ошибок

$$K_Q = M\{E_Q E_Q^T\} = \sum_{i=1}^l v(w_i) w_i D_{Ei}^{-1} S_i S_i^T. \quad (14)$$

Рассуждая аналогично в отношении ошибки оценки $e_y(t^*) = |y^*(t^*) - y(t^*)|$ и используя алгоритм (8), выражение для корреляционной матрицы (14) и обозначение (10) получаем выражение для дисперсии ошибок оценки $y^*(t^*)$:

$$\sigma_y^2(t^*) = \sum_{i=1}^l v(w_i) \frac{\lambda^2(t^*, t_i)}{D_{Ei}} w_i, \quad (15)$$

где $\lambda(t^*, t_i) = F^T(t^*) S(t_i)$ – весовой коэффициент, определяющий влияние значений измерения z_i на оценку $y(t^*)$.

Переключающая функция $v(w_i)$ в выражении (15) может быть опущена, так как ее роль выполняется одновременно интенсивностью измерений w_i .

Полученная зависимость качества конечного результата (точности или достоверности оценки) от интенсивности w_i , выступающей в роли управляющего воздействия, позволяет формулировать задачи оптимального управления процессом телеметрических измерений (измерительными операциями) на борту или с использованием наземной инфраструктуры СИТО.

Из возможных практических задач основное практическое значение имеют две. Первая из них предполагает определение программы (значений w_i), обеспечивающей при минимальном числе измерений требуемую точность (достоверность) оценки ТС БС КА, то есть необходимо определить программу телеизмерений w_i , $i = 1 \dots, l$ из условия

$$\sum_{i=1}^l w_i \rightarrow \min \quad (16)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^l \frac{\lambda^2(t^*, t_i)}{D_{Ei}} w_i \geq \sigma_{\text{заданное}}^2, \quad (17)$$

где $\sigma_{\text{заданное}}^2$ – допустимое значение дисперсии ошибок оценок.

Вторая задача является обратной первой и требует достижения максимальной точности при заданном допустимом числе телеметрических измерений.

Для допустимого в программе числа телеизмерений $l_{\text{заданное}}$ определить $w_i, i = 1 \dots l$ из условия

$$\sum_{i=1}^l \frac{\lambda^2(t^*, t_i)}{D_{ei}} w_i \rightarrow \min \quad (18)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^l w_i \geq l_{\text{заданное}}, \quad w_i \geq 0, \quad w_i \leq w_0. \quad (19)$$

Как видно, в обоих случаях имеем минимизацию линейной формы относительно w_i при ограничениях типа неравенств. Указанная линейность относительно w_i условна. Эта условность связана с представлением коэффициентов $\lambda(t^*, t_i)$ квадратичной формы корреляционной матрицы ошибок оценок K_Q , фактически зависящей от программы телеметрических измерений. Действительно, коэффициенты $\lambda(t^*, t_i)$ с учетом обозначения (11) определяются выражением:

$$\lambda(t^*, t_i) = F^T(t^*) S_i = F^T(t^*) K_Q F_i, \quad (20)$$

в котором корреляционная матрица ошибок оценок

$$K_Q = \left[\sum_{i=1}^l v(w_i) \frac{w_i}{D_{ei}} F_i F_i^T \right]^{-1}. \quad (21)$$

Выражение (21) определяет расчетную формулу для K_Q , получаемую подстановкой в формулу (14) введенного обозначения векторов S_i .

Указанная зависимость коэффициентов $\lambda(t^*, t_i)$ от программы телеметрических измерений определяет существенную особенность сформулированных задач.

Выводы

Полученная зависимость качества конечного результата (точности и достоверности оценки) от интенсивности w_i , выступающей в роли управляющего воздействия, позволяет формулировать задачи оптимального управления процессом телеметрических измерений (измерительными операциями) на борту КА (РС МКС, ТПК, ТК) или с использованием наземной инфраструктуры СИТО.

Основное приложение аналитической зависимости заключается в определении программы (значений w_i), обеспечивающей при минимальном числе

измерений требуемую точность (достоверность) оценки ТС БС КА (РС МКС, ТПК, ТГК). Управление СТД заключается в выборе состава требуемых измерителей (из m имеющихся) и в определении программ их работы. Обе указанные задачи (выбор состава и определение программ работы измерителей) фактически в равной мере влияют на конечный эффект измерений – достоверность анализа ТС БС КА (РС МКС, ТПК, ТГК), но их решение часто проводится раздельно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ статистики ускоренного построения орбитальной системы координат транспортных пилотируемых и грузовых кораблей и методы повышения точности / А.В. Сумароков, Ю.Н. Борисенко, Н.Ю. Борисенко, В.Н. Платонов // Космическая техника и технологии. – 2018. – № 2(21). – С. 71–79.
2. Мальцев, Г.Н. Современные подходы к определению уровня автономности космических аппаратов / Г.Н. Мальцев, В.Л. Якимов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 2. – С. 34–43.
3. Ахметов, Р.Н. Байпасность как атрибут живучести автоматических космических аппаратов в аномальных полетных ситуациях / Р.Н. Ахметов, В.П. Макаров, А.В. Соллогуб // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – № 4(44). – С. 9–21.
4. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, А.В. Соллогуб, В.П. Макаров. – Москва: Машиностроение, 2010. – 384 с.
5. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения = Technical diagnostics. Terms and definitions: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 26.12.89 N 4143: введен впервые: дата введения 1991-01-01. – Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 13 с.
6. Wang, Y. Evaluation Methods for the Autonomy of Unmanned Systems / Y. Wang, J. Liu // Chinese Science Bulletin. – 2012. – Vol. 57. – P. 3409–3428.
7. Curtin, T. Autonomous Underwater Vehicles: Trends and Transformation / T. Curtin, D. Crimmins, J. Curcio // Marine Technology Society Journal. – 2005. – Vol. 39. – P. 65–75.

REFERENCES

1. Sumarokov, A.V. Analysis of statistics of accelerated construction of orbital coordinate system of transport manned and cargo vehicles and methods of increasing accuracy / A.V. Sumarokov, Yu.N. Borisenko, N.Yu. Borisenko., V.N. Platonov // Space Engineering and Technologies. – 2018. – No 2(21). – P. 71–79.
2. Maltsev, G.N. Modern approaches to determining the level of autonomy of spacecraft / G.N. Maltsev, V.L. Yakimov // Information and control systems. – 2017. – No 2. – P. 34–43.

3. Akhmetov, R.N. Bypass as an attribute of survivability of automatic space vehicles in abnormal flight situations / R.N. Akhmetov, V.P. Makarov, A.V. Sollogub // Bulletin of the Samara State Aerospace University. – 2015. – No 4(44). – P. 9–21.
4. Methods of ensuring the survivability of low-orbit automatic space vehicles for Earth probing: mathematical models, computer technologies / A.N. Kirilin, R.N. Akhmetov, A.V. Sollogub, V.P. Makarov. – Moscow: Mechanical Engineering, 2010. – 384 p.
5. GOST 20911-89. Technical diagnostics. Terms and definitions: interstate standard: official publication: approved and put into effect by Resolution of the USSR State Committee for Product Quality Management and Standards dated 12.26.89 N 4143: introduced for the first time: date of introduction 1991-01-01. – Moscow: Publishing House of Standards, 1989. – 13 p.
6. Wang, Y. Evaluation Methods for the Autonomy of Unmanned Systems / Y. Wang, J. Liu // Chinese Science Bulletin. – 2012. – Vol. 57. – P. 3409–3428.
7. Curtin, T. Autonomous Underwater Vehicles: Trends and Transformation / T. Curtin, D. Crimmins, J. Curcio // Marine Technology Society Journal. – 2005. – Vol. 39. – P. 65–75.