

УДК 629.78

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.34

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ УРОВНЯ АВТОНОМНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г. Н. Мальцев^а, доктор техн. наук, профессор

В. Л. Якимов^а, канд. техн. наук, доцент

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Цель: проанализировать и систематизировать современные подходы к классификации сложных беспилотных систем по уровню автономности функционирования, ввести конструктивный показатель уровня автономности и построить единую классификацию космических аппаратов по уровню автономности. **Результаты:** проведены анализ подходов к оценке уровня автономности сложных беспилотных систем и адаптация рассмотренных схем классификации для космических аппаратов. На основе анализа статистических данных получено выражение, аппроксимирующее зависимость уровня автономности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли от пропускной способности каналов управления и передачи специальной информации, длительности сеансов управления и интервала автономного функционирования. Показано влияние возможностей бортовых и наземных средств диагностирования технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на уровень их автономности. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при оценивании системных показателей космических аппаратов различного назначения и обосновании путей обеспечения заданного уровня надежности функционирования космических аппаратов с высоким уровнем автономности на основе выбора периодичности проведения сеансов управления и диагностирования технического состояния бортовой аппаратуры.

Ключевые слова — автономность, космический аппарат, диагностирование, техническое состояние.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется повышению уровня автономности функционирования сложных технических систем различного назначения: наземных робототехнических комплексов, беспилотных летательных и подводных аппаратов, а также космических аппаратов (КА) [1–4]. Автономность характеризуется различными уровнями и зависит от сложности решаемых задач, влияния внешних факторов и возможностей автономного управления функционированием анализируемой технической системы. Для КА уровень автономности функционирования является одним из системных показателей. Он зависит от возможностей бортового комплекса управления (БКУ) КА, и обеспечение высоко-го уровня автономности КА напрямую связано с эффективностью решения целевых задач и снижением расхода ресурсов на проведение сеансов управления КА средствами наземного комплекса управления (НКУ) [2]. Кроме того, автономность функционирования беспилотных средств, к которым могут быть отнесены КА, рассматривается в настоящее время в контексте соотношения между объемом передаваемых на них управляющих воздействий и объемом поступающей от них специальной (целевой) информации. Так, для КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) такой информацией являются данные наблюдения (дистанционного зондирования) в различных спектральных диапазонах, для переда-

чи которых с КА требуются высокоскоростные радиоканалы, пропускная способность которых значительно превышает пропускную способность радиоканалов управления КА [5].

Повышение автономности КА может быть реализовано за счет увеличения времени его автономного функционирования, в течение которого управление бортовой аппаратурой КА осуществляет БКУ без взаимодействия с НКУ. При этом условием увеличения времени автономного функционирования КА является повышение надежности и отказоустойчивости бортовой аппаратуры КА, в том числе на основе совершенствования средств диагностирования технического состояния бортовой аппаратуры и восстановления ее работоспособности [6, 7]. В то же время можно говорить о сложности понятия автономности КА и отсутствии единых подходов к оценке ее уровня. Проведенный анализ показал, что в отечественных источниках вопросы оценивания уровня автономности КА рассматриваются, в основном, применительно к определенным типам КА, в частности к КА ДЗЗ [8]. В этих условиях в качестве первого шага к построению единой классификации КА по уровню автономности может рассматриваться представленная в настоящей статье адаптация существующих классификационных схем и формульных выражений, используемых зарубежными организациями ракетно-космической отрасли для определения автономности сложных беспилотных систем [9, 10].

Анализ подходов к вопросу классификации беспилотных систем по уровню автономности и их адаптация для автоматических КА

Применительно к автоматическим КА понятие автономности можно сформулировать как способность КА и его БКУ к самостоятельному функционированию и выполнению полетных операций без информационного взаимодействия с НКУ [7]. Автономность характеризуется различными уровнями и зависит от сложности решаемых задач, влияния внешних факторов и возможностей БКУ. Простейшее определение уровня автономности КА основано на определении доли операций управления КА, выполняемых БКУ, от общего числа операций управления КА, выполняемых НКУ и БКУ.

В связи с тем, что в отечественных источниках вопросы оценивания уровня автономности КА рассматриваются, в основном, применительно к определенным типам КА, проанализируем подходы к вопросу классификации уровней автономности сложных беспилотных систем, используемые зарубежными организациями ракетно-космической отрасли. В качестве наиболее интересных можно выделить классификации Шеридана, NASA (National Aeronautics and Space Administration) и Министерства обороны (МО США [9, 10].

В классификации Шеридана имеется 10 уровней автономности в системе «оператор — компьютер», соответствующих различной степени участия человека-оператора в принятии решения при управлении сложной беспилотной системой. Адаптированная версия классификации

Шеридана для управления автоматическими КА средствами НКУ и БКУ приведена в табл. 1.

В классификации NASA имеется шесть уровней автономности беспилотных систем, для каждого уровня приводится доля в процентах участия внешнего оператора в управлении беспилотной системой [9]. Адаптированная версия классификации NASA для управления автоматическими КА средствами НКУ и БКУ приведена в табл. 2.

В классификации МО США имеется 10 уровней автономности, характеризующих способность беспилотных систем самостоятельно выполнять полетные операции и целевые задачи тактического и стратегического уровня. Адаптированная версия классификации МО США для управления автоматическими КА средствами НКУ и БКУ приведена в табл. 3.

За последние десятилетия наблюдается экспоненциальный рост уровня автономности аэрокосмических объектов, что совпадает по времени с появлением за рубежом новых программ в рамках создания автономных беспилотных аэрокосмических систем: DS-1, EO-1, Cassini, ISHM, X-45, Mars Exploration Rovers, Spirit, Opportunity и др. [9].

Следует отметить направление создания автономных КА, предназначенных для инспекции различных космических объектов: XSS-10, XSS-11, SBSS (США), BX-1 и «Шицзянь-12» (Китай), PRISMA (Швеция), SNAP-1 (Великобритания), — а также проекты малых КА, обслуживающих другие, более крупные КА: AERCam Sprint, Mini AERCam, X-Mir-Inspector, Orbital Express. Значительный интерес также представляют текущие и планируемые проекты в области повышения автономности аэрокосмических летательных аппаратов одной из ведущих научно-иссле-

■ **Таблица 1.** Уровни автономности КА согласно классификации Шеридана

Уровень автономности	Характеристика уровня автономности
1	Управление КА полностью осуществляется оператором средства НКУ
2	БКУ предлагает оператору средства НКУ набор альтернатив действий на принятие решения
3	БКУ сужает выбор оператора средства НКУ до нескольких альтернатив
4	БКУ предлагает оператору средства НКУ единственное решение
5	БКУ реализует единственное решение, получив подтверждение на выполнение операций от оператора средства НКУ
6	БКУ предоставляет оператору средства НКУ ограниченное время на принятие решения перед автоматическим выполнением операций
7	БКУ действует автоматически, при этом обязательно информирует оператора средства НКУ о выполнении операций
8	БКУ действует автоматически и по запросу оператора средства НКУ информирует его о выполнении операций
9	БКУ действует автоматически и информирует оператора средства НКУ, если считает нужным, после выполнения операций
10	БКУ самостоятельно принимает решение по управлению КА

■ Таблица 2. Уровни автономности КА согласно классификации NASA

Уровень автономности	Характеристика уровня автономности	Доля участия оператора НКУ, %
0	Дистанционное управление всеми полетными операциями КА средствами НКУ	100
1	Автономное управление БКУ отдельными полетными операциями КА под наблюдением операторов средств НКУ	80
2	Автономное управление БКУ основными полетными операциями КА на основе программы управления, переданной на КА средствами НКУ	50
3	Автономное управление БКУ большинством полетных операций КА, включая оценку ситуации и принятие решения по управлению КА, на основе полетного задания, переданного на КА средствами НКУ	20
4	Полностью автономное управление БКУ полетными операциями КА, включая оценку ситуации, планирование выполнения полетных операций и принятие комплексного решения по управлению КА, на основе исходных данных, переданных на КА средствами НКУ	5
5	Совместное функционирование в составе орбитальной системы нескольких автономных КА без информационного взаимодействия с НКУ	0

■ Таблица 3. Уровни автономности КА согласно классификации МО США

Уровень автономности	Характеристика уровня автономности
1	Дистанционное управление всеми полетными операциями КА средствами НКУ
2	Автономное управление БКУ отдельными полетными операциями КА под наблюдением операторов средств НКУ, в том числе автономное диагностирование и восстановление работоспособности бортовой аппаратуры
3	Возможность адаптации БКУ к сбоям и состоянию бортовой аппаратуры при выполнении КА целевых задач по предназначению
4	Возможность БКУ к самостоятельному планированию маршрута КА и выполнению основных полетных операций
5	Самостоятельная координация БКУ действий группы КА
6	Самостоятельное тактическое планирование БКУ действий группы КА
7	Наличие у группы КА тактических целей, достигаемых при управлении БКУ
8	Распределенное управление БКУ между автономными КА
9	Наличие у группы КА стратегических целей, достигаемых при управлении БКУ
10	Полностью автономная группировка КА, управляемых БКУ

довательских организаций США — Air Force Research Laboratory (AFRL). В большинстве указанных проектов вопросам совершенствования БКУ и системы диагностирования технического состояния КА, обеспечивающей восстановление работоспособности бортовой аппаратуры КА в процессе автономного управления, уделяется первоочередное внимание.

Стремление повысить автономность КА характерно и для отечественных разработчиков космических средств. При этом распределение задач управления между БКУ и НКУ отечественных КА изменилось в пользу БКУ с 20 % в 70-е годы до 90 % в настоящее время [5]. Аналогичным образом изменилась и доля задач контроля технического состояния и диагностирования бортовой

аппаратуры КА, решаемых бортовыми средствами: если в 60-е годы все решения о техническом состоянии 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 [6].

На рис. 1 представлены сводные данные по зарубежным и отечественным проектам последних десятилетий автоматических КА, полученные на основе источников [5, 9], с определением их уровня автономности по классификации NASA (рис. 1, а) и МО США (рис. 1, б) в соответствии с табл. 2 и 3. Планируемые проекты AFRL обо-



■ Рис. 1. Уровни автономности некоторых зарубежных и отечественных аэрокосмических средств: а — по классификации NASA; б — по классификации МО США

значены как «Планы AFRL», по классификации МО США они характеризуются наиболее высоким уровнем автономности. Из отечественных проектов наиболее высокий уровень по классификациям NASA и МО США имеет КА «Ресурс-ДК1».

Следует отметить, что, несмотря на возросшую роль средств самодиагностирования и самовосстановления автоматических КА при обеспечении отказоустойчивости бортовой аппаратуры, важность решения задачи диагностирования бортовой аппаратуры с использованием средств НКУ, составляющих наземный сегмент системы информационно-телеметрического обеспечения (СИТО), не только не снизилась, а наоборот — повысилась. Это приводит к необходимости разработки адекватного алгоритмического аппарата, позволяющего реализовать планово-периодический углубленный анализ технического состояния бортовой аппаратуры с учетом особенностей КА с высоким уровнем автономности [7].

Помимо классификаций, представленных в табл. 1–3, для оценки уровня автономности беспилотных систем используются различные аналитические математические выражения [10]. Так, в работах [9, 10] предлагается определение уровня автономности A беспилотной системы, исходя из соотношения между объемом передаваемых на нее управляющих воздействий и объемом поступающей от нее специальной (целевой) информации в соответствии с выражением

$$A = C_n \left(\frac{n_y}{N} \right)^{-i} \left(\frac{t_y}{T_A} \right)^{-j}, \quad (1)$$

где n_y — количество информации, используемой для управления беспилотной системой внешними средствами управления в ходе выполнения целевой задачи; N — суммарное количество информации, переданной и полученной с беспилотной системы в ходе выполнения целевой задачи; t_y — время, затраченное на управление беспилотной системой внешними средствами управления в течение выполнения целевых задач; T_A — время, отводимое беспилотной системе для решения целевых задач в режиме автономного функционирования; C — эмпирический коэффициент, характеризующий вероятность обеспечения связи между беспилотной системой и внешними средствами управления; i и j — эмпирические показатели, определяемые опытным путем.

Правая часть выражения (1) для уровня автономности A содержит три составляющие: отношение $(n_y/N)^{-i}$, отношение $(t_y/T_A)^{-j}$ и коэффициент C . Первая составляющая $(n_y/N)^{-i}$ характеризует способность беспилотной системы автономно выполнять целевые функции и передавать результаты своей работы потребителю в виде больших объемов специальной (целевой) информации при малых объемах информации, используемой для управления беспилотной системой внешними средствами управления. Данная составляющая позволяет как охарактеризовать информационное взаимодействие между беспилотной системой и внешними средствами управления, так и подчеркнуть сложность выполняемых беспилотной системой задач, влияющих на его уровень автономности. Вторая составляющая $(t_y/T_A)^{-j}$ характеризует способность беспилотной

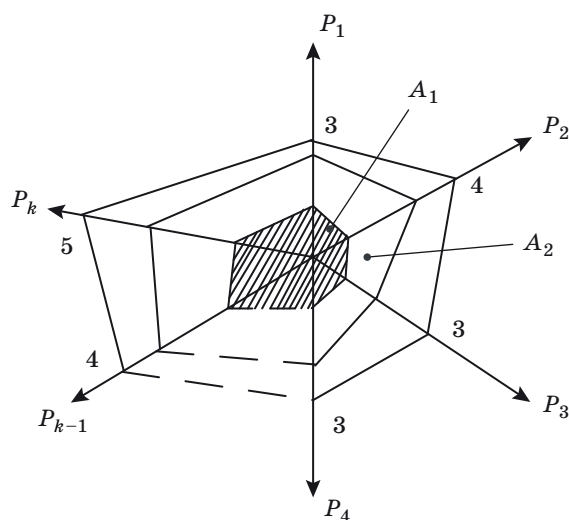
системы длительно находиться в режиме автономного функционирования без информационного взаимодействия с внешними средствами управления. Третья составляющая в виде коэффициента C введена для возможности корректного сравнения уровней автономности объектов, функционирующих в различных средах и условиях передачи информации, изменение которых может привести к увеличению времени и интенсивности информационного взаимодействия КА и НКУ. Таким образом, в выражении (1) учтены особенности определения уровня автономности беспилотной системы, связанные с учетом интенсивности ее информационного взаимодействия с внешними средствами управления беспилотной системой, внешних условий и сложности решаемых беспилотной системой целевых задач.

Передача на Землю больших объемов специальной (целевой) информации характерна, прежде всего, для КА ДЗЗ. Выражение (1) может быть непосредственно использовано для определения их уровня автономности, а также может быть преобразовано к следующему виду:

$$A = P \left(\frac{t_y}{T_A(P)} \right)^{-j}, \quad (2)$$

где t_y — средняя продолжительность проведения сеансов управления КА средствами НКУ перед интервалом автономного функционирования КА; $T_A(P)$ — продолжительность интервала автономного функционирования КА, гарантированно достигаемая с вероятностью P . Значение $T_A(P)$ зависит от достоверности диагностирования технического состояния бортовой аппаратуры КА средствами бортового и наземного сегментов СИТО. Выражение (2) может быть использовано для оценки уровня автономности любых КА, имеющих режим автономного функционирования.

Рассмотренные способы оценки уровня автономности отражают лишь отдельные аспекты вопроса обеспечения автономности беспилотных систем, в том числе автоматических КА. Более глубоким и объективным подходом к оценке уровня автономности беспилотных систем является подход на основе представленной на рис. 2 «паутинной» модели в виде совокупности многоугольников, построенных в системе осей, на которых откладываются значения показателей P_1, P_2, \dots, P_k , характеризующих работу бортовых подсистем беспилотной системы — управления, навигации, диагностирования и др. Число осей k и значения соответствующих показателей отражают степень реализации в беспилотной системе современных технологий, влияющих на уровень ее автономности.



■ Рис. 2. Подход к оценке уровня автономности на основе «паутинной» модели

Уровень автономности беспилотной системы A численно определяет площадь многоугольника. Задается характеризующий уровни автономности набор значений A_1, A_2, \dots, A_n , где n — количество уровней автономности [9]. Данный подход также называют «звездой ориентиров» Босселя, и он является наиболее эффективным из рассмотренных подходов, поскольку позволяет комплексно оценить уровень автономности беспилотной системы, используя множество различных ее параметров и характеристик [2].

Одной из характеристик, используемых для оценки уровня автономности автоматических КА, является средний интервал автономного функционирования \bar{T}_A , который может быть определен как выборочное среднее случайной величины — времени автономного функционирования КА:

$$\bar{T}_A = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m T_A(l), \quad (3)$$

где $l = 1, 2, \dots, m$ — номер обращения; m — число обращений на анализируемом интервале времени; $T_A(l)$ — интервал времени между l -м и $(l-1)$ -м обращениями БКУ к НКУ в процессе выполнения КА целевой задачи по предназначению:

$$T_A(l) = t_b(l) - t_b(l-1) - T_d(l). \quad (4)$$

Здесь $t_b(l), t_b(l-1)$ — время двух последовательных обращений БКУ к НКУ; $T_d(l)$ — время диагностирования и восстановления работоспособного состояния бортовой аппаратуры КА средствами наземного сегмента СИТО. Определение величины $T_A(l)$ в виде (4) отражает то обстоятельство, что для КА с высоким уровнем автономности обращение БКУ к НКУ, как правило,

обусловлено возникновением нештатных ситуаций, устранение которых требует проведения углубленного технического диагностирования бортовой аппаратуры КА средствами наземного сегмента СИТО [7].

На практике в целях эффективного планирования работы БКУ КА и НКУ важно знать интервал автономного функционирования $T_A(P_3)$, гарантированно достигаемый с заданной вероятностью $P = P_3$ [7]. Для оценки \bar{T}_A или $T_A(P_3)$ необходимо набрать статистику значений $T_A(l)$, построить функцию плотности вероятности распределения случайной величины T_A и найти соответствующий временной интервал.

Таким образом, несмотря на экспоненциальный рост уровня автономности создаваемых в настоящее время автоматических КА, на сегодняшний день не существует полноценной методики оценивания уровня автономности КА. Для его определения можно адаптировать наиболее известные подходы, применяемые для классификации сложных беспилотных систем, а также использовать интегральный показатель A или временные показатели \bar{T}_A или $T_A(P_3)$.

Определение уровня автономности КА ДЗЗ на основе агрегирования различных подходов и результаты моделирования

Большинство рассмотренных подходов к оценке уровня автономности КА являются эвристическими и основываются на знании экспертов, в результате чего полученные оценки могут иметь недостаточную точность. Одним из способов улучшения оценки уровня автономности КА является агрегирование результатов классификации с использованием нескольких рассмотренных схем и приведение полученной оценки к единой числовой шкале. Рассмотрим совместное использование подходов к определению уровня автономности КА ДЗЗ на основе классификации NASA (см. табл. 2) и аналитического выражения (1).

Введем следующие допущения:

- количество переданной с КА специальной информации (данных ДЗЗ) n_n равно произведению пропускной способности канала передачи информации C_n и времени t_n , в течение которого эта передача осуществляется ($n_n = C_n t_n$);

- пропускная способность канала передачи с КА специальной информации C_n значительно выше пропускной способности каналов управления и передачи телеметрической информации C_y , относящихся к контуру управления КА ($C_n \gg C_y$);

- вероятность обеспечения связи между КА ДЗЗ и наземным пунктом приема специальной информации, относящимся к подсистеме потребителей, равна единице ($C_n = 1$).

Полагая, что $N = n_n + n_y$ и $C_n = 1$, преобразуем выражение (1) для определения уровня автономности КА ДЗЗ следующим образом:

$$A = C_n \left(\frac{n_y}{N} \right)^{-i} \left(\frac{t_y}{T} \right)^{-j} = \left(\frac{C_y t_y}{C_n t_n + C_y t_y} \right)^{-i} \left(\frac{t_y}{T_A} \right)^{-j}, \quad (5)$$

где t_y — средняя длительность сеанса управления КА; t_n — средняя длительность сеанса передачи специальной информации с КА. Поскольку продолжительность зоны радиовидимости КА одинаковая как для наземных средств управления, так и для наземных средств приема информации, можно полагать, что $t_y = t_n$. Тогда при $C_n \gg C_y$ уровень автономности КА ДЗЗ определяется выражением

$$A = \left(\frac{C_y}{C_n} \right)^{-i} \left(\frac{t_y}{T_A} \right)^{-j}. \quad (6)$$

Осуществим логарифмическое преобразование левой и правой частей полученного выражения (6):

$$\lg A = i \lg \left(\frac{C_n}{C_y} \right) + j \lg \left(\frac{T_A}{t_y} \right). \quad (7)$$

Анализ полученного уравнения (7) показывает, что коэффициенты i и j должны принимать только положительные значения ($i > 0, j > 0$), а входящие в правую часть уравнения слагаемые должны оказывать примерно одинаковое

влияние на его левую часть: $i \lg \left(\frac{C_n}{C_y} \right) \approx j \lg \left(\frac{T_A}{t_y} \right)$.

В противном случае искажается физический смысл выражения (1): наблюдается уменьшение уровня автономности A с ростом T и C_n и исчезает равнозначность влияния составляющих на его величину.

В результате уравнение (7) можно разделить на две части и решить их независимо друг от друга:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \lg A = i \lg \left(\frac{C_n}{C_y} \right) \\ \frac{1}{2} \lg A = j \lg \left(\frac{T_A}{t_y} \right) \end{cases}. \quad (8)$$

Значения коэффициентов i и j для КА ДЗЗ можно определить статистическим путем с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [11]. Для этого сформируем табл. 4 с характеристиками различных КА ДЗЗ, соответствующих нескольким временным периодам: $C_{ng}, C_{yg}, T_{Ag}, t_{yg}, A_g$, где $g = 1, 2, \dots, 5$ — номер анализируемого временного периода. Данные

■ Таблица 4. Статистические данные о характеристиках КА ДЗЗ

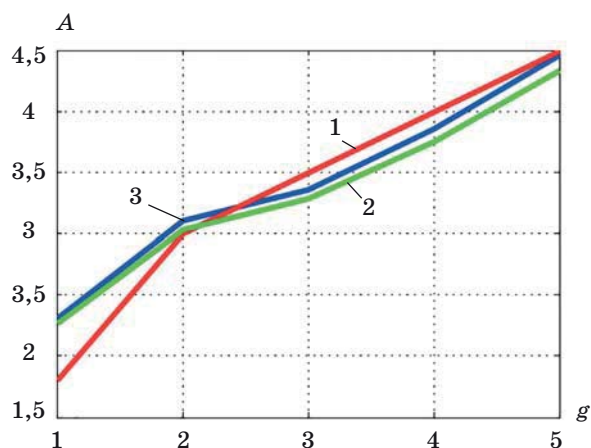
Номер временного периода g	Доля операций БКУ, %	Оценка уровня автономности КА A_g	Пропускная способность канала связи C_n , Мбит/с	Интервал автономного функционирования T_A , сут
1	40	1,8	8	1
2	80	3	120	4
3	90	3,5	300	5
4	95	4	800	12
5	97	4,5	3000	24

для заполнения таблицы получены в результате обобщения информации по отечественным КА ДЗЗ, представленной в различных источниках [2, 4, 5, 7, 12]. Часть данных в табл. 4 получена путем интерполяции и экстраполяции во временной области имеющихся в наличии характеристик и уровня автономности КА ДЗЗ с учетом их экспоненциального роста [9].

Среднее время сеанса управления и пропускная способность каналов управления приняты одинаковыми во всех рассмотренных случаях и равными 5 мин и 32 Кбит/с соответственно. Для оценки уровня автономности КА ДЗЗ A_g использована классификация NASA (см. табл. 2). Приведенные данные могут быть уточнены на основе обработки статистических данных летной эксплуатации КА ДЗЗ и имитационного моделирования.

Запишем уравнения (8) в виде $Y = iX_1$ и $Y = jX_2$, где Y — вектор-столбец из элементов левой части уравнений (8); X_1 и X_2 — матрицы из элементов правых частей первого и второго уравнения (8) соответственно. Компонентами вектора Y являются величины $y_g = \frac{1}{2} \lg A_g$, компонентами вектора X_1 являются величины $x_{1,g} = \lg \left(\frac{C_{ng}}{C_{yg}} \right)$, компонентами вектора X_2 являются величины $x_{2,g} = \lg \left(\frac{T_A g}{t_y} \right)$, $g = 1, 2, \dots, 5$.

В результате решения уравнений (8) с помощью МНК найдены значения коэффициентов $i = 0,0662$, $j = 0,0802$ и получена аппроксимация приведенных в табл. 4 уровней автономности КА ДЗЗ. Зависимости уровня автономности A КА ДЗЗ от номера временного периода g показаны на рис. 3. Кривая 1 соответствует исходным данным по автономности КА ДЗЗ, приведенным в табл. 4, кривая 2 соответствует аппроксимации уровней



■ Рис. 3. Уровни автономности КА ДЗЗ для различных временных периодов

автономности КА ДЗЗ с использованием МНК, кривая 3 соответствует аппроксимации уровней автономности КА ДЗЗ с использованием алгоритма SPSA [13].

Алгоритм SPSA представляет собой рекуррентную процедуру и основан на случайном пробном возмущении оптимизируемых параметров, в данном случае коэффициентов i и j , в целях поиска их оптимальных значений. Преимуществом алгоритма SPSA является возможность применения различных критериев (например, минимума максимального значения абсолютной погрешности), а также построения комбинированных целевых функций, учитывающих условия вида

$$i \lg \left(\frac{C_{ni}}{C_{yi}} \right) \approx j \lg \left(\frac{T_A}{t_y} \right).$$

В результате применения алгоритма SPSA получены уточненные значения коэффициентов $i = 0,0657$, $j = 0,0842$.

Использование наряду с МНК алгоритма SPSA было обусловлено тем, что при использовании МНК погрешности аппроксимации могут суммироваться негативным образом и ухудшить общую погрешность аппроксимации исходных данных. В рассмотренном случае среднеквадратическая погрешность аппроксимации при использовании МНК составляет $\gamma = 0,298$. Применение процедуры стохастической оптимизации на основе алгоритма SPSA позволило получить меньшее значение среднеквадратической погрешности аппроксимации $\gamma = 0,281$. При принятых допущениях и уточнении значений коэффициентов i и j результирующее аналитическое выражение для определения уровня автономности КА ДЗЗ имеет следующий вид:

$$A = \left(\frac{C_y}{C_n} \right)^{-0,0657} \left(\frac{t_y}{T_A} \right)^{-0,0842}. \quad (9)$$

Используя зависимость интервала автономного функционирования КА, гарантированно достигаемого с заданной вероятностью P_3 от показателей достоверности диагностирования бортовой аппаратуры КА средствами бортового D_1 и наземного D_2 сегментов СИТО, представленную в работе [7], полученное выражение (9) для оценки уровня автономности A и данные для КА «Ресурс-ДК1» [2, 4, 5], определим влияние показателей достоверности диагностирования бортовой аппаратуры КА D_1 и D_2 на уровень автономности КА. В качестве показателей достоверности D_1 и D_2 выступают вероятности правильного обнаружения, распознавания и локализации неисправности бортовой аппаратуры КА средствами бортового сегмента СИТО (D_1); правильного обнаружения неисправности и диагностирования бортовой аппаратуры КА при углубленном анализе ее технического состояния средствами НКУ (D_2). Задавалась вероятность гарантированного достижения заданного интервала автономного функционирования КА $P_3 = 0,97$.

Результаты анализа представлены на рис. 4 в виде зависимостей уровня автономности A от показателя достоверности D_1 бортового сегмента СИТО.

Кривая 1 соответствует высокой достоверности внешнего диагностирования бортовой аппаратуры КА наземным сегментом СИТО ($D_2 = 1$), кривая 2 — средней достоверности внешнего диагностирования бортовой аппаратуры КА наземным сегментом ($D_2 = 0,8$), кривая 3 — условиям, когда внешнее диагностирование бортовой аппаратуры КА наземным сегментом практически не осуществляется ($D_2 = 0,1$).

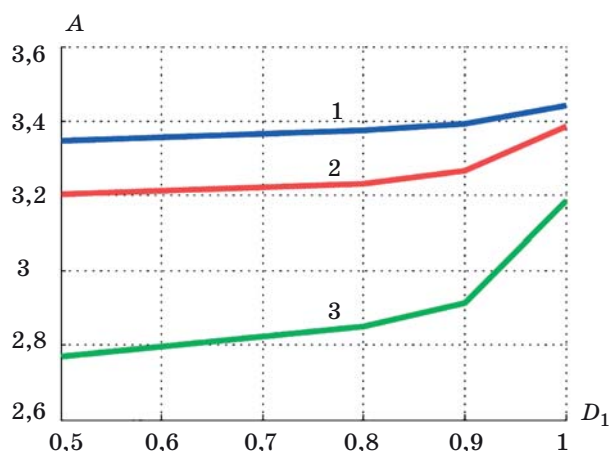
Представленные зависимости позволяют сделать вывод о влиянии характеристик средств диагностирования СИТО на уровень автономно-

сти КА и его изменение в пределах 14 % используемой шкалы. Данная величина приобретает значимый вес на фоне изменения уровня автономности КА двух последующих друг за другом поколений, которое достигает 10–24 % этой же шкалы (см. табл. 4).

Таким образом, на основе классификации уровней автономности КА и статистических данных было получено аналитическое выражение для определения уровня автономности КА ДЗЗ с учетом параметров, характеризующих продолжительность интервала автономного функционирования КА и его информационную производительность. Отметим, что рассмотренный подход ориентирован на использование по отношению к КА ДЗЗ, поскольку учитывает особенности их целевого применения, в частности, результат целевого применения в виде передачи на Землю специальной (целевой) информации — данных ДЗЗ. Кроме того, принятые допущения не учитывают перспективной технологии передачи с КА данных ДЗЗ с ретрансляцией [14], при использовании которой продолжительность сеансов передачи специальной информации с КА может быть существенно увеличена. При принятом определении уровня автономности A с учетом объема передаваемой с КА специальной информации это приведет к увеличению A , однако такой случай требует отдельного рассмотрения, поскольку при этом возможно нарушение равнозначности влияния на уровень автономности интервала автономного функционирования и информативности КА ДЗЗ.

Заключение

В настоящее время существуют различные подходы к вопросам классификации сложных беспилотных систем, которые можно адаптировать и использовать для определения уровня автономности КА. Повышение автономности является насущной задачей при создании перспективных КА ДЗЗ, о чем свидетельствует экспоненциальный рост уровня автономности аэрокосмических средств, наблюдаемый в последние десятилетия как у нас в стране, так и зарубежом. Одним из способов достижения высокой автономности КА является повышение отказоустойчивости их бортовой аппаратуры, в том числе путем совершенствования средств бортового и наземного сегментов СИТО в части диагностирования технического состояния и восстановления работоспособности бортовой аппаратуры КА. Представленные результаты качественно подтверждают данное утверждение, а предлагаемые способы определения уровня автономности могут быть использованы при оценке системных показателей КА с высоким уровнем автономности.



■ Рис. 4. Зависимости уровня автономности КА от достоверности автономного диагностирования технического состояния

Литература

1. Соловьев В. А., Лысенко Л. Н., Любинский В. Е. Управление космическими полетами. Ч. 1. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 476 с.
2. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Соллогуб А. В., Макаров В. П. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии. — М.: Машиностроение, 2010. — 384 с.
3. Филаретов В. Ф. Устройства и системы управления подводных роботов. — М.: Наука, 2005. — 270 с.
4. Борисов А. В., Ковальский Н. П., Любченко Ф. Н. Перспективные направления создания комплексов приема, обработки и распространения космической информации дистанционного зондирования Земли и связанные с этим проблемы // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 5. С. 9–15.
5. Кириллин А. Н., Аншаков Г. П., Ахметов Р. Н., Сторож Д. А. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». — Самара: Волга-Дизайн, 2011. — 280 с.
6. Ахметов Р. Н. Модели и методы автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2008. № 2. С. 194–210.
7. Мальцев Г. Н., Назаров А. В., Якимов В. Л. Имитационное моделирование процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования // Информационно-управляющие системы. 2016. № 4. С. 34–43. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.34
8. Ахметов Р. Н., Макаров В. П., Соллогуб А. В. Оценка автономности низкоорбитальных КА дистанционного зондирования Земли // Полет. 2009. № 10. С. 7–14.
9. Wang Y., Liu J. Evaluation Methods for the Autonomy of Unmanned Systems // Chinese Science Bulletin. 2012. Vol. 57. P. 3409–3428.
10. Curtin T., Crimmins D., Curcio J. Autonomous Underwater Vehicles: Trends and Transformations // Marine Technology Society Journal. 2005. Vol. 39. P. 65–75.
11. Химельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. — М.: Мир, 1973. — 957 с.
12. Назаров А. В., Козырев Г. И., Шитов И. В. и др. Современная телеметрия в теории и на практике. — СПб.: Наука и Техника, 2007. — 672 с.
13. Граничин О. Н. Введение в методы стохастической оптимизации и оценивания. — СПб.: СПбГУ, 2003. — 131 с.
14. Романов А. А. Основы космических информационных систем. — М.: Радиотехника, 2013. — 352 с.

UDC 629.78

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.34

Modern Approaches to Determining Spacecraft Autonomy Level

Maltsev G. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, georgy_maltsev@mail.ru.

Yakimov V. L.^a, PhD, Tech., Associate Professor, yakim78@yandex.ru.

^aA. F. Mozhayskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197082, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Our goal is to analyze and systematize the modern approaches to classifying sophisticated unmanned systems by their operation autonomy level, to introduce a constructive index of the autonomy level and to build a uniform classification of spacecrafts by their autonomy level. **Results:** We have analyzed the approaches to assessing sophisticated unmanned system autonomy level, and adapted the considered classification schemes to spacecrafts. On the base of statistical data analysis, we have obtained an expression which approximates the dependence of the autonomy level of Earth remote sensing spacecrafts on the throughput of the control paths and information transmission channels, on the control session duration and on the independent operation interval. We have demonstrated how the possibilities of onboard and terrestrial devices for the diagnostics of the onboard equipment of spacecrafts affect the level of their self-sufficiency. **Practical relevance:** The obtained results can be used to evaluate the system indices of various spacecrafts, and to substantiate the ways of providing the required operational reliability for spacecrafts with a high level of autonomy by choosing the periodicity of control sessions and diagnosing the technical state of the onboard equipment.

Keywords — Autonomy, Spacecraft, Diagnosing, Technical State.

References

1. Solov'ev V. A., Lysenko L. N., Liubinskii V. E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Mission Control]. Part 1. Moscow, MGTU imeni N. E. Baumana Publ., 2009. 476 p. (In Russian).
2. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Sollogub A. V., Makarov V. P. *Metody obespecheniia zhivuchesti nizkoorbital'nykh avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov zondirovaniia Zemli: matematicheskie modeli, komp'iuternye tekhnologii* [Methods of Support of Survivability of Low-Orbit Automatic Spacecrafts of Earth Sounding: Mathematical Models, Computer Technologies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 384 p. (In Russian).
3. Filaretov V. F. *Ustroistva i sistemy upravleniia podvodnykh robotov* [Devices and Management Systems of Underwater Robots]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 270 p. (In Russian).
4. Borisov A. V., Koval'skij N. P., Ljubchenko F. N. The Perspective Directions of Creation of Complexes of Reception, Processing and Distribution of Space Information of Remote Sensing of Earth and Problems Connected to it. *Kosmonavtika i raketrostroenie*, 2008, no. 5, pp. 9–15 (In Russian).
5. Kirillin A. N., Anshakov G. P., Akhmetov R. N., Storozh D. A. *Kosmicheskoe apparatostroenie: nauchno-tekhnicheskie issledovaniia i prakticheskie razrabotki GNPRKTs «TsSKB-Progress»* [Space Vehicle Building: Scientific and Technical Research and Practical Development of SSPRSC «TsSKB-Progress»]. Samara, Volga-Dizain Publ., 2011. 280 p. (In Russian).
6. Ahmetov R. N. Models and Methods of Off-Line Control by Survivability of Earth Remote Sensing Automatic Space-

- crafts. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2008, no. 2, pp. 194–210 (In Russian).
7. Maltsev G. N., Nazarov A. V., Yakimov V. L. The Simulation Modeling of Complex Technical System Diagnosing Process with the Autonomy High Level of Functioning. *Informatcionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 4, pp. 34–43 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.34
 8. Akhmetov R. N., Makarov V. P., Sollogub A. V. Assessment of Low-Orbit Spacecraft Autonomy of Earth Remote Sensing. *Polet*, 2009, no. 10, pp. 7–14 (In Russian).
 9. Wang Y., Liu J. Evaluation Methods for the Autonomy of Unmanned Systems. *Chinese Science Bulletin*, 2012, vol. 57, pp. 3409–3428.
 10. Curtin T., Crimmins D., Curcio J. Autonomous Underwater Vehicles: Trends and Transformations. *Marine Technology Society Journal*, 2005, vol. 39, pp. 65–75.
 11. Himel'blau D. *Analiz processov statisticheskimi metodami* [The Analysis of Processes by Statistical Methods]. Moscow, Mir Publ., 1973. 957 p. (In Russian).
 12. Nazarov A. V., Kozyrev G. I., Shitov I. V., et al. *Sovremennaya telemekhanika v teorii i na praktike* [Modern Telemetry in Theory and Practice]. Saint-Petersburg, Nauka i Tekhnika Publ., 2007. 672 p. (In Russian).
 13. Granichin O. N. *Vvedenie v metody stokhasticheskoi optimizatsii i otsenivaniia* [Introduction in Methods of Stochastic Optimisation and Estimation]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2003. 131 p. (In Russian).
 14. Romanov A. A. *Osnovy kosmicheskikh informatsionnykh sistem* [Fundamentals of Space Information Systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013. 352 p. (In Russian).

**Научный журнал
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»
выходит каждые два месяца.**

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4800 рублей, для подписчиков стран СНГ — 5400 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу: «Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»
Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,
эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,
сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru,

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru,

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>;

РУКОНТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru/>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2016 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/>

journal/n/informatsionno-upravlyayushchiesistemy).