

Методология оценки надежности космических аппаратов при проектной и конструкторской проработке

Владимир Я. Геча, Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна», Российская Федерация, Москва

Руслан Н. Барбул, Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна», Российская Федерация, Москва

Николай И. Сидняев, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, Москва

Юлия И. Бутенко, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, Москва



Владимир Я. Геча



Руслан Н. Барбул



Николай И. Сидняев



Юлия И. Бутенко

Резюме. В статье рассматриваются вопросы эксплуатационной надежности космических систем (КС), эффективности сложных многоцепочных систем, использования резервирования при конструировании космических аппаратов (КА). Представлены методики прогнозирования надежности создаваемых устройств, проектирование устройств с заданной надежностью и сравнение надежности различных КС. С этой целью излагаются фундаментальные вопросы из теории надежности для проектирования КС, методы сбора и обработки данных о надежности аппаратуры по результатам эксплуатации и специальных испытаний на надежность. Разработаны методы, математические модели и проведен анализ структуры аппаратуры на этапе проектирования и при изготовлении. Приведены расчетные соотношения при различных видах резервирования в испытаниях, продления сроков эксплуатации блоков КА, основа которых – методология оценки остаточного ресурса. Систематизированы и изучены существующие методы анализа надежности. Изложены проблемы неопределенности информации по входным данным при расчетах классическими методами. Изучено влияние отклонения внешних воздействий от номинальных значений, непостоянность интенсивности отказов, нелинейный характер влияния внешних факторов на надежность. Исследован характер влияния внешних факторов на надежность и степень учета факторов в существующих методах. Отмечено, что качественные, организационно-технические (конструктивные и программные) требования по надежности, задаваемые в ТЗ для каждой стадии создания элементов КС в целом, должны выполняться и подтверждаться на соответствующей стадии работ. Представлены методики оценки ресурса технических объектов, среди которых важное место занимают методики, основанные на физических предпосылках расходования ресурса. Отмечена важность экономического аспекта исследования проблемы продления сроков эксплуатации КС.

Ключевые слова: надежность, методики, ресурс, проектирование, космический аппарат, оценка ресурса.

Формат цитирования: Геча В.Я., Барбул Р.Н., Сидняев Н.И., Бутенко Ю.И. Методология оценки надежности космических аппаратов при проектной и конструкторской проработке // Надежность. 2019. №2. С. 3-8. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-2-3-8

Введение

Стадии проектирования, начиная с разработки технического задания на систему и кончая выпуском технической документации на опытное производство, являются ключевыми в общей проблеме обеспечения надежности космического аппарата (КА). Важной работой, регламентирующей взаимоотношения всех участников разработки КА, является обоснование программы обеспечения надежности (ПОН) изделия в целом, его составных частей и элементов, а также выработка и согласование порядка подтверждения требований по надежности на всех стадиях создания [1-4]. С этой целью используют модели ПОН, типовые ПОН и модели (процедуры) подтверждения надежности. После выбора основных проектных, схемных и конструкторско-технологических решений перед окончательным оформлением проекта служб надежности предприятия совместно с подразделениями-разработчиками осуществляется оценка (экспертиза) результатов проектирования с позиций обеспечения надежности и корректировка принятых решений [5-8].

КА представляет собой сложный многокомпонентный комплекс, содержащий в себе как аппаратные, так и программные средства [9-12]. Соответственно, возникает необходимость оперативного контроля их характеристик и анализа состояния в процессе эксплуатации. Надежность является одной из важнейших характеристик технической системы [3]. Согласно ГОСТ, под надежностью принято понимать свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования [4]. Поскольку КА имеет сложную структуру (а, следовательно, и сложный характер взаимосвязей между отдельными компонентами), усложняется и сам процесс получения численных значений показателей надежности [5-8].

Методологические аспекты и цели поставленной задачи

Для предупреждения и выявления отказов конструктивного, производственного и эксплуатационного характера и защиты от их последствий элементов системы применяют различные методы и средства. Если в результате предварительных исследований эффективности системы определен объем потребности в данном виде изделий и требуемый уровень гарантии выполнения задач при их применении, тогда минимально необходимый уровень надежности изделий можно определить однозначно в результате оценки и минимизации суммарных затрат ресурсов на создание и применение, т. е. на выполнение программы в целом [6, 7].

Разработка системы ограниченного применения (десятки образцов). В этом случае приходится учитывать все составляющие суммарных затрат: затраты на раз-

работку системы, на изготовление и на эксплуатацию всего парка изделий, обеспечивающих выполнение задачи не менее $N_{тр}$ раз (потребное количество изделий) с гарантией не ниже $\gamma_{тр}$ [9-12]. Задание требований по надежности системы и ее элементов включает:

- выбор номенклатуры показателей надежности;
- нормирование надежности (установление требуемых количественных значений показателей надежности элементов системы);
- нормирование доверительных вероятностей или средних квадратичных отклонений, с которыми нормативные значения показателей надежности системы должны быть подтверждены к моменту завершения государственных испытаний;
- формирование для элементов системы организационных и технических требований по обеспечению надежности;
- установление порядка подтверждения требования по надежности по стадиям создания элементов системы.

В общей постановке задача нормирования надежности формулируется следующим образом [8, 9, 13].

Пусть КА состоит из N элементов, объединенных определенной структурой и выполняющих определенные функции. При этом известны [9, 10, 14]: вид совместной плотности распределения моментов отказов элементов КА $(\tau_i, f_s \{ \tau_i; i = \overline{1, N} \})$; требуемое значение (или ряд значений) показателя надежности системы P ; функции связи надежности и рассматриваемых факторов $\Phi_i \{ P_i; i = \overline{1, N}, \Phi_v, v = \overline{1, S} \}$, $l = \overline{1, L}$; функции распределения времени безотказной работы составных частей $F_i = P_i \{ f(\tau_i) \}$, $i = \overline{1, N}$; целевая функция (функционал) $g = g \{ P_i, i = \overline{1, N} \}$, где P_i – точечное значение оценки надежности i -го элемента; Φ_v – рассматриваемый v -й фактор; S – число рассматриваемых факторов; L – число функций связи.

Необходимо найти такие значения надежности элементов, которые оптимизируют целевую функцию g [1, 9].

Если необходимо спроектировать КА с минимальной стоимостью или массой, то в качестве целевой функции выбирают стоимость или массу $g = C$, $C = C \{ P_i, i = \overline{1, N} \}$, или $g = M$, $M = M \{ P_i, i = \overline{1, N} \}$.

В процессе решения отыскивают вектор $P = \{ P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N \}$, минимизирующий C или M , т. е. $C(\bar{P}) = \min C(\bar{P})$; $\bar{P} = \{ P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N \}$, или $M(\bar{P}) = \min M(\bar{P})$; $\bar{P} = \{ P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N \}$ при $\Phi(P) \geq \Phi_0$. Если ставится задача максимизации функции $\Phi(P)$ при заданных ограничениях на стоимость (или массу), то $g = \Phi$; $\Phi = \Phi \{ P_i, i = \overline{1, N} \}$. Решают задачу отыскания вектора P , максимизирующего $\Phi(\bar{P})$, т. е. $\Phi(\bar{P}) = \max \Phi(P)$ при $C(\bar{P}) \leq C_0$, или $\Phi(\bar{P}) = \max \Phi(P)$ при $M(\bar{P}) \leq M_0$. Часто нормирование производят при условии не только выполнения требований по надежности системы, но и требований по безопасности. Тогда задачу решают, используя в качестве функции $\Phi(\bar{P})$ функцию безопасности, т. е. $B = \Phi(\bar{P})$, а затем проверяют условие $B = \Phi(\bar{P}) \geq P_B$. Если оно выполняется, то решение зада-

чи окончено, если не выполняется, то решение задачи продолжают, начиная с вектора $P = \bar{P}_b$, т. е. вектора, удовлетворяющего решению на первом этапе.

Методы конкретной реализации задач

При создании изделий космической техники, не имеющих аналогов и прототипов, вместо жестких нормативных значений показателей надежности разрабатывают алгоритмы и методики задания и нормирования количественных требований по надежности, учитывающие специфику использования КА и элементов [15, 16], а также реальные ограничения.

Рассмотрим область применения вероятностных показателей надежности как основы для обеспечения гарантий в зависимости от объема программы применения КА [4, 5, 7]. Пусть целью единичной программы создания и применения спутника одноразового использования является удовлетворение потребности в $N_{тр}$ таких изделий. Необходимое время работы спутников задано, в качестве показателя надежности изделия используется вероятность безотказной работы R . Известна зависимость уровня надежности изделия от затрат в рамках программы обеспечения надежности $R = R_1 R_2 R_3$, где $R_1 = 1 - (1 - R_{10}) \exp[-\alpha_1 (C_1 - C_{10})]$ – составляющая надежности, учитывающая влияние отказов комплектующих изделий с учетом резервирования; $R_2 = 1 - (1 - R_{20}) \exp[-\alpha_2 (C_2 - C_{20})]$ – составляющая надежности, учитывающая уровень производства и контроля готовой продукции; $R_3 = 1 - (1 - R_{30}) \exp[-\alpha_3 (N_{от} - N_{от0})]$ – составляющая надежности, учитывающая уровень отработанности; R_{10}, R_{20}, R_{30} – начальные (минимальные) уровни составляющих R_1, R_2, R_3 , соответствующие минимальным реализуемым затратам $C_{10}, C_{20}, N_{от0}$ средств C_1, C_2 и изделий $N_{от}$, затраченных на экспериментальную отработку; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – параметры, определяющие темп роста составляющих показателя R при увеличении затрат.

Возможные варианты решений и стратегий строятся с учетом того, что обеспечить достижение поставленной цели можно как за счет увеличения расхода средств на обеспечение более высокого уровня надежности каждого образца, так и за счет расширения программы изготовления изделий [14].

Так как при изготовлении N КА число КА N_y успешно выполнивших свою задачу, случайно, речь может идти об обеспечении практической гарантии с уровнем γ , где $\gamma = P\{N_y \geq N_{тр}\}$. Каждое решение задается вектором составляющих R_1, R_2, R_3 или соответствующих затрат $C_1, C_2, N_{от}$, что однозначно определяет уровень R . Для заданных γ и $N_{тр}$ с учетом известного R однозначно можно определить число изготавливаемых КА $N_{г} = f(N_{тр}, \beta, R)$, гарантирующих успешную реализацию программы. Суммарные затраты на реализацию программы C_{Σ} могут быть определены на основе зависимости $C_{\Sigma} = (C_1 + C_2)(N_{от} + N_{г})$. Смысл рациональности

(оптимальности) принимаемого решения при задании необходимого уровня надежности изделия и выделении средств на обеспечение надежности заключается в минимизации суммарных затрат разработку и изготовление необходимого количества КА [11, 15], гарантирующего успешную работу $N_y \geq N_{тр}$ изделий. В качестве множества исходов используем пространство элементарных событий. Каждое из элементарных событий ω_i состоит в том, что в результате применения N КА произошло ровно $N_y = i$ успехов. С точки зрения достижения поставленной цели все множество исходов W можно разделить на два подмножества W_1 и W_2 такие, что

$$\forall (i = 0, 1, \dots, N) (w_i \in W_1) \leftrightarrow (i \geq N_{тр});$$

$$\forall (i = 0, 1, \dots, N) (w_i \in W_2) \leftrightarrow (i < N_{тр}).$$

С учетом этого вероятность события $w_i \leftrightarrow \{N_y = i\}$ при известной вероятности безотказной работы КА определяют по формуле [4]:

$$P\{w_i\} = C_N^i R^i (1 - R)^{N-i}.$$

Эта формула задает вероятностную меру на пространстве W . Событие W_1 является объединением всех ω_i при $i \geq N_{тр}$, поэтому его вероятность определяется как сумма вероятностей этих элементарных событий

$$P\{W_1\} = \sum_{i=N_{тр}}^N C_N^i R^i (1 - R)^{N-i}.$$

Эта вероятность и дает уровень практической гарантии успешного выполнения программы. Для обеспечения заданного уровня гарантии γ при известных значениях R и $N_{тр}$ можем увеличивать N и этим самым заново определять пространство W_1 до тех пор, пока не добьемся выполнения условия $P\{W_1\} \geq \gamma$ [2]. При этом величина N и будет равна искомому значению $N_{г}$. Таким образом, получим возможные пути построения функционального соответствия $\phi: R \rightarrow N$. Если множество R принять за пространство стратегий, среди которых необходимо выбрать значение $R_{оп}$, обеспечивающее минимум суммарных затрат на про реализацию программы $C_{\Sigma \min}$, соответствие ϕ решает часть задачи: для каждого R определяет $N_{г}$. Решение усложняется тем, что надежность R может быть обеспечена различными сочетаниями составляющих R_1, R_2, R_3 . В каждом частном случае может быть поставлена и решена задача вспомогательной оптимизации, например, найти вектор R_1, R_2 , обеспечивающий $R' = R_1 R_2$ при минимуме стоимости $C = C_1 + C_2$. Описание процедуры поиска экстремума приведено в работах [2, 9] в составе программы, определяющей зависимость удельных затрат $C_{уд} = C_{\Sigma} / N_{тр}$ и удельных нормированных затрат $C_{удн} = C_{уд} / C_0$, где $C_0 = C_{10} + C_{20}$, от объема потребности $N_{тр}$ для конкретных вариантов исходных данных [11]. Кроме этого, по результатам вычислений может быть определена доля

затрат на компенсацию статистической неустойчивости результата относительно математического ожидания

$$\Delta C_\gamma = \frac{C}{C_\Sigma} \left(N_\Gamma - \frac{N_{\text{тр}}}{R} \right),$$

а также доля затрат на обеспечение надежности

$$\Delta C_R = 1 - \Delta C_\gamma - \frac{C_0}{C_\Sigma} (N_{\text{тр}} + N_{\text{от0}}).$$

Анализ последних двух формул позволяет выделить области значений массовости продукции с различными возможностями использования вероятностных требований в качестве основы для обеспечения гарантии успеха [1, 4, 12]. Для изделий массового производства ($N_{\text{тр}} > 10^3$) дополнительные затраты на обеспечение гарантированного результата, компенсирующие статистическую неустойчивость случайных явлений относительно средних, составляют единицы процентов от суммарной стоимости программы и незначительную часть суммарных расходов на программу обеспечения надежности. Для изделий серийного производства ($N_{\text{тр}} > 10^2$) затраты на компенсацию неустойчивости составляют до 10% суммарных расходов и порядка 20% расходов по программе обеспечения надежности. Для изделий мелкосерийного производства ($N_{\text{тр}}$ – десятки) затраты на компенсацию неустойчивости составляют до 25% суммарных расходов и до 50% стоимости ПОН. Наконец, для уникальных изделий ($N_{\text{тр}}$ – единицы) затраты на компенсацию статистической неустойчивости путем увеличения объема программы изготовления могут в несколько раз превышать первоначально планируемую стоимость программы, что является явно неприемлемым путем обеспечения гарантированного результата. Результаты анализа показывают возможности использования явления стохастического детерминизма для обеспечения гарантий. В условиях рассмотренного выше примера зависимость достигнутого уровня надежности изделия от затрачиваемых средств предполагается заданной в виде функционального соответствия $\phi: C \rightarrow R$ со свойствами:

$$\forall (s_i, s_j \in S) \exists (w_i = \phi(s_i), w_j = \phi(s_j)) : [w_i, R_w, w_j] \rightarrow [s_i, R_s, s_j],$$

что позволяет однозначно находить наилучшую стратегию распределения затрат, обеспечивающую максимум показателя R с точностью до задания допустимой ошибки процедуры поиска экстремума.

Единственный вид учитываемой неопределенности заключен в неоднозначности функционального соответствия, т. е. в случайности числа успехов. Принцип гарантированного результата позволяет устранить эту неоднозначность путем введения уровня практической гарантии и построения области $f: R \times N \rightarrow N_\Gamma$.

Следующий шаг приближения постановки задачи к реальной жизни состоит в учете неоднозначности соответствия $\phi: C \rightarrow R$, которое в достаточно общем случае может быть задано совместным распределением констант, входящих в соотношения. Последовательное применение принципа гарантированного результата

основано на построении доверительного интервала $[R(C), 1]$ с уровнем практической гарантии обеспечения $\gamma_{\text{об}}$. Причем практическая гарантия успешной реализации программы γ зависит теперь как от гарантии обеспечения $\gamma_{\text{об}}$, так и от гарантии успешного применения $\gamma_{\text{пр}}$: $\gamma = \gamma_{\text{об}} \gamma_{\text{пр}}$. При такой постановке задачи становится актуальным исследование вопроса о целесообразности использования стратегии экспериментального подтверждения достигнутого уровня надежности [2].

Пусть с целью подтверждения некоторого уровня надежности R_n планируется испытать n КА. Результаты каждого исхода испытаний $\{n, m\}$, где m – число успешных испытаний, случайны и в предположении независимости исходов имеют вероятности

$$P\{n, m\} = \binom{n}{m} R_{\text{об}}^{n-m} (1 - R_{\text{об}})^m,$$

где $R_{\text{об}}$ – уровень обеспеченной надежности. Для каждого исхода $\{n, m\}$ можно построить условную плотность байесовской оценки подтвержденного уровня надежности R_n

$$\phi_{\text{усл}}(R_n/n, m) = \frac{R_n^{n-m} (1 - R_n)^m \phi(R_n)}{\int_0^{R_n^{n-m} (1 - R_n)^m \phi(R_n) dR_n}.$$

Средневзвешенная условная плотность распределения оценки подтвержденного уровня надежности будет:

$$\bar{\phi}_{\text{усл}}(R_n) = (n+1)! n! \times R_{\text{об}}^{n-m} (1 - R_{\text{об}})^m R_n^{n-m} \times \sum \frac{(1 - R_n)^m}{(m!)^2 [(n-m)!]^2}.$$

Используя эту зависимость, можно получить функциональное соответствие $\phi: R_{\text{об}} \times n \times R_n \rightarrow \gamma_n$. Для подтверждения уровня R_n при испытаниях n изделий с надежностью $R_{\text{об}}$ целесообразно использовать зависимость вида:

$$\gamma_n = (n+1) \sum_{m=0}^n R_{\text{об}}^{n-m} (1 - R_{\text{об}})^m \left[\frac{n}{m!(n-m)!} \right]^2 \int_{R_n}^1 z^{n-m} (1-z)^m dz.$$

При больших n (порядка 20 и более) и $m \geq 1$ вычисление γ_n можно упростить, используя нормальную аппроксимацию апостериорной плотности распределения с дисперсией $\sigma^2 = R_{\text{об}} (1 - R_{\text{об}}) / n$. Так, например, результаты решения задачи выбора оптимальных значений $R_{\text{об}}$, n , γ_n , C , N_Γ для уровня гарантии $\gamma = 0,9$ для различных объемов программы применений изделий свидетельствуют о недостаточной эффективности использования только вероятностных показателей для планирования программ создания уникальных изделий. В то же время для программ с объемом применения изделий более сотни для обеспечения гарантии 0,9 оптимальная доля затрат на подтверждение надежности составляет 10%, 5% и 2% полных затрат для объема применения 100, 500 и 2000 шт. соответственно; при этом разница между обеспеченным и подтвержденным уровнем гарантии снижается от 0,15 до 0,06.

Расчеты показывают, что подтверждение надежности более эффективно при больших объемах программ применения. При малых объемах программы целесообразнее расходовать средства на обеспечение надежности. Вид зависимости $R_{об} = f(C)$ определяется на основе опыта реализации ПОН изделий-аналогов, что не исключает возможности появления новых непредвиденных проблем, типов отказов и т.п. В этих условиях целесообразной является разработка в составе ПОН эффективных защитных мероприятий, которые благодаря повышению уровня организации процесса применения КА могут обеспечить решение задачи при большем уровне начальной неопределенности.

Выводы

Предложен новый подход к анализу эксплуатационной надежности многокомпонентных космических систем (КС), позволяющий существенно улучшить и упростить решение задач анализа и контроля надежности. Одним из достоинств разработанной методики является то, что в ситуациях, когда еще не накопилось достаточно статистической информации, источником первоначальных данных для настройки модели надежности являются экспертные суждения, а в дальнейшем – используются данные, поступающие в ходе эксплуатации. Тем самым на всех стадиях жизненного цикла системы удается поддерживать модель надежности в актуальном состоянии.

Систематизированы и изучены существующие методы анализа надежности. Выявлены проблемы недостатка информации при расчетах классическими методами, игнорирование таких факторов, как влияние отклонения режима работы или внешних воздействий от номинальных значений, непостоянность интенсивности отказов, нелинейный характер влияния внешних факторов на надежность. Изучен характер влияния внешних факторов на надежность и степень учета данных факторов в существующих методах. Сформулирована задача анализа надежности. Качественные, организационно-технические (конструктивные и программные) требования по надежности, задаваемые в ТЗ для каждой стадии создания элементов и КС в целом, должны выполняться и подтверждаться на соответствующей стадии работ. Для их подтверждения не требуется статистический эксперимент, и в этом их большое преимущество. Значительному сокращению затрат на экспериментальные исследования КА и вообще созданию высоконадежных изделий на стадиях проектно-конструкторской разработки способствуют создаваемые в отдельных отраслях ракетно-космической отрасли проектные нормы надежности – системы количественных и качественных требований и правил, выполнение которых обязательно при разработке КА. Следует при этом отметить, что предлагаемый метод оценки рассмотрен только для изделий космической техники в составе КС, который может послужить отправной точкой для разработки

частных методик оценки экономической эффективности продления сроков эксплуатации конкретных типов и видов космической техники.

Библиографический список

1. **Гнеденко Б.В.** Математические методы в теории надежности [Текст] / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
2. **Сидняев Н.И.** Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебное пособие [Текст] / Н.И. Сидняев. – М.: Издательство Юрайт, ИД Юрайт, 2011. – 399 с.
3. **Морозов Д.В., Чермошенцев С.Ф.** Методика повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете при возникновении отказа в бортовой контрольно-проверочной аппаратуре [Текст] // Надежность. – 2019; – №19(1). – С.30-35.
4. **Сидняев Н.И.** Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники [Текст] / Н.И. Сидняев, Г.С. Садыхов, В.П. Савченко – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 382 с.
5. **Morris S.F.** Use and application of MIL-HDBK-217 [Text] / S.F. Morris // Solid Slate Technology. – 1990. – Vol. 33. – No. 6. – Pp. 65-69.
6. **Сидняев Н.И.** Математическое моделирование оценки надежности объектов сложных технических систем [Текст] / Н.И. Сидняев. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – № 4. – С.24-31.
7. **Brennom T.R.** Should us MIL-HDBK-217 be 8888 [Text] / T.R. Brennom // IEEE Trans. Reliab. – 1988. – Vol. 37. – No. 5. – Pp. 474-475.
8. **Сидняев Н.И.** Обзор и исследование физики отказов для оценки показателей надежности радиоэлектронных приборов современных РЛС [Текст] / Н.И. Сидняев // Физические основы приборостроения. – 2017. – Т. 6. – № 2(23). – С. 4-52.
9. **Барлоу Р.** Математическая теория надежности [Текст] / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.
10. **РД 50-690-89.** Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным [Текст]. – Введ. 1991-01-01. – М.: Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990.
11. **Сидняев Н.И.** Факторы космической погоды, влияющие на бортовые элементы низкоорбитальных космических аппаратов [Текст] / Н.И. Сидняев, Л.А. Макриденко, В.Я. Геча, В.Н. Онуфриев / Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Труды Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – С. 90-10.
12. **Похабов Ю.П.** Что понимать под расчетом надежности уникальных высокоответственных систем при-

менительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов [Текст] // Надежность. – 2018; – №4. – С.28-35.

13. **Антонов С.Г., Климов С.М.** Методика оценки рисков нарушения устойчивости функционирования программно-аппаратных комплексов в условиях информационно-технических воздействий [Текст] // Надежность. – 2017. – №17(1). – С.32-39.

14. **Сидняев Н.И.** О современных подходах развития теории эффективности космических систем [Текст] / Н.И. Сидняев, В.Я. Геча, Р.Н. Барбул / Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста: Всероссийская научно-практическая конференция (Москва, 18 апреля 2018 г.): материалы конференции / Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – С. 69-75.

15. **Климов С.М., Поликарпов С.В., Федченко А.В.** Методика повышения отказоустойчивости сетей спутниковой связи в условиях информационно-технических воздействий [Текст] // Надежность. – 2017. – №17(3). – С.32-40.

16. **Колобов А.Ю., Дикун Е.В.** Интервальные оценки безотказности единичных космических аппаратов [Текст] // Надежность. – 2017. – №17(4). – С.31-35.

Сведения об авторах

Владимир Я. Геча – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора, Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна», Российская Федерация, Москва, e-mail: vniiem@orc.ru, vniiem@vniiem.ru

Руслан Н. Барбул – старший научный сотрудник, заместитель генерального директора по качеству и надежности, Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна», Российская Федерация, Москва, e-mail: vniiem@orc.ru, vniiem@vniiem.ru

Николай И. Сидняев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, Москва, e-mail: Sidn_ni@mail.ru

Юлия И. Бутенко – кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, Москва, e-mail: iuliiabutenko2015@yandex.ru

Поступила: 17.12.2018