УДК 658.345:629.78.08 https://doi.org/10.15407/itm2020.01.067

В. П. ПОШИВАЛОВ, Ю. Ф. ДАНІЄВ, Л. В. РЕЗНИЧЕНКО, І. І. ТЕЛЕГІНА

ПРО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ОБ’ЄКТІВ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ НА ЕТАПІ ПРОЕКТУВАННЯ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попіля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: vposhivalov@gmail.com

Розглянуто можливі підходи до вирішення задач надійності об’єктів ракетно-космічної техніки (РКТ) на етапі проектування.

Показано, що при проєктуванні об’єктів РКТ необхідно враховувати експлуатаційні навантаження на основі встановлених норм міцності, інших проєктних норм, що реалізуються спільно з правилами їхнього приймання, правилами експлуатації, нагляду, технічного обслуговування, відновлення. Проєктні дослідження надійності об’єктів РКТ повинні бути спрямовані на забезпечення заданих показників надійності в умовах наявних обмежень.

Розглянута процедура вибору показників надійності об’єкта РКТ і його складових частин.

Показано, що для обґрунтування числових значень показників надійності можуть використовуватися два підходи. Перший підхід (потрібність) полягає в тому, щоб забезпечити певний мінімальний рівень надійності. Другий підхід (можливість) полягає в тому, щоб забезпечити максимально можливий рівень показників надійності об’єкта РКТ при дотриманні заданих або об’єктивно існуючих обмежень на витрати (вартість, масу, об’єм, тощо) при одночасному дотриманні умови, що необхідний рівень надійності буде не нижче, ніж у аналога.

Охарактеризовано підходи до забезпечення надійності об’єктів РКТ на етапі проєктування, які включають: послідовність вирішення задач забезпечення і контролю надійності об’єктів РКТ на етапі проєктування; склад робіт з нормування надійності на етапі проєктування; вибір номенклатури показників надійності і обґрунтування їх числових значень.

Використання запропонованого підходу розглянуто на прикладі оцінки надійності деяких стартових комплексів.

Ключові слова: *ракетно-космічна техніка, стартовий комплекс, показники надійності, резервування, технічне обслуговування, довірча ймовірність, відпрацювання, льотні випробування.*

Рассмотрены возможные подходы к решению задач надежности объектов ракетно-космической техники (РКТ) на этапе проектирования.

Показано, что при проектировании объектов РКТ необходимо учитывать эксплуатационные нагрузки на основе установленных норм прочности, других проектных норм, которые реализуются совместно с правилами их приема, правилами эксплуатации, надзора, технического обслуживания, восстановления. Проектные исследования надежности объектов РКТ должны быть направлены на обеспечение заданных показателей надежности в условиях имеющихся ограничений.

Рассмотрена процедура выбора показателей надежности объекта РКТ и его составных частей.

Показано, что для обоснования численных значений показателей надежности могут использоваться два подхода. Первый подход (потребность) заключается в том, чтобы обеспечить определенный минимальный уровень надежности. Второй подход (возможность) заключается в том, чтобы обеспечить максимально возможный уровень показателей надежности объекта РКТ при соблюдении заданных или объективно существующих ограничений на затраты (стоимость, массу, объем, и т. п.) при одновременном соблюдении условия, что необходимый уровень надежности будет не ниже, чем у аналога.

Охарактеризованы подходы к обеспечению надежности объектов РКТ на этапе проектирования, которые включают: последовательность решения задач обеспечения и контроля надежности объектов РКТ на этапе проектирования; состав работ по нормированию надежности на этапе проектирования; выбор номенклатуры показателей надежности и обоснование их численных значений.

Использование предложенного подхода рассмотрено на примере оценки надежности некоторых стартовых комплексов.

Ключевые слова: *ракетно-космическая техника, стартовый комплекс, показатели надежности, резервирование, техническое обслуживание, доверительная вероятность, отработка, летные испытания.*

This paper considers possible approaches to the solution of problems of space hardware reliability assurance at the design stage.

It is shown that in the reliability design of space hardware one must take into account the service loads on the basis of prescribed strength norms and other design norms, which are realized together with the rules of acceptance, operation, inspection, maintenance, and recovery. Design studies of space hardware reliability must assure specified reliability indices under existing restrictions.

A procedure of choosing the reliability indices of a space hardware object and components thereof is considered.

It is shown that one can use two approaches to justifying the values of reliability indices. One approach (demand) consists in assuring a certain minimum reliability level. The other approach (possibility) consists in assuring the maximum possible reliability indices of a space hardware object under specified or inherent restrictions on cost (price, mass, volume, etc.), while keeping the required reliability level not lower than that of its counterpart.

The paper characterizes approaches to assuring the reliability of space hardware at the design stage, which include: successive solutions of reliability assurance and control problems at the design stage, a work package on reliability standardization at the design stage, and the choice of reliability indices with the justification of their values.

The proposed approach is illustrated by the example of reliability assessment for some launch complexes.

Keywords: *space hardware****,*** *launch complex, reliability indices, redundancy, maintenance, confidence probability, development, flight tests.*

При розробці ракетно-космічної техніки (РКТ) велика увага приділяється її надійності, проте відмов РКТ уникнути не вдається. Вони призводять до величезних втрат коштів, сил і часу, а іноді і до людських жертв. Тому проблема створення надійних виробів РКТ не тільки не знімається з порядку денного, але стає ще більш актуальною. Це пов’язане з ускладненням техніки, особливими умовами її експлуатації, зростанням складності задач, що вирішуються.

Незважаючи на жорстку конкуренцію на світовому ринку космічних виробів і послуг, Україна є одним з його ключових учасників в міжнародних космічних програмах. Серед спроектованих ракет-носіїв (РН) слід виділити діючі ракети-носії (РН) «Зеніт» та РН середнього класу «Циклон-4М» [1, 2].

Виходячи на міжнародний космічний ринок виробів і послуг, Україна повинна показати високий рівень вимог до якості зразків РКТ і враховувати те, що, з одного боку, українська система забезпечення надійності зразків РКТ піддається ретельному аналізу і верифікації, а з іншого боку, вимагає враховувати специфічні вимоги щодо якості та надійності, які встановлюють іноземні замовники.

Дослідження і вироблення заходів щодо забезпечення і контролю надійності об’єктів РКТ повинні проводитися на всіх стадіях життєвого циклу, але при цьому необхідно враховувати, що найбільш важливі технічні рішення приймаються в процесі проєктної розробки, тобто при розробці ескізних проєктів і робочої документації.

Розглянемо забезпечення надійності виробів РКТ на етапі проєктування.

Дослідження надійності виробів РКТ на цьому етапі повинне включати вирішення таких задач:

– обґрунтування вимог з надійності і вибір шляхів їх досягнення;

– оцінювання надійності при обраних технічних рішеннях;

– розподіл наявних ресурсів із забезпечення надійності на подальших стадіях створення і експлуатації.

Необхідно враховувати, що РКТ проєктується з урахуванням експлуатаційних навантажень на основі встановлених норм міцності, інших проєктних норм, що реалізуються спільно з правилами їх приймання, правилами експлуатації, нагляду, технічного обслуговування, відновлення. Це забезпечує практичну відсутність відмов протягом всього терміну служби. При такому підході необхідно в першу чергу обґрунтувати значення коефіцієнта запасу міцності і безпеки [1 – 4].

Для РКТ українського виробництва проєктні дослідження їхньої надійності повинні бути спрямовані на забезпечення заданих показників надійності в умовах наявних обмежень. При цьому слід враховувати те, що економічність не є головним критерієм надійності, тому що наслідки відмов можуть перевершити витрати на створення РКТ (наприклад, при вибусі РКН на старті). При такому підході необхідно проводити комплексний аналіз всіх заходів і засобів забезпечення і контролю надійності, включаючи всі види резервування, контролю, технічного обслуговування, заходів попередження і виявлення відмов і захисту від їхніх можливих наслідків.

Задачі дослідження надійності об’єктів РКТ на етапі проєктування повинні вирішуватися в такій послідовності: задання вимог до надійності; обґрунтування рішень, що забезпечують необхідну надійність; контроль виконання вимог до надійності.

Розглянемо можливі підходи щодо вирішення задач надійності об’єктів РКТ на кожному етапі.

Існують такі типові постановки задач із завдання вимог до надійності (за умови, що показник надійності заданий):

– пошук мінімально можливого значення показника надійності, при якому виконуються вимоги щодо ефективності застосування об’єктів РКТ (модель «надійність – ефективність»);

– пошук максимально можливого значення показника надійності об’єктів РКТ (при обмеженнях на витрати (модель «надійність – витрати»).

На цьому етапі необхідно вирішувати задачу вибору й обґрунтування номенклатури показників надійності.

Безліч можливих рішень може описуватися в термінах проектних параметрів, структури об’єктів, видів конструкції, технології виготовлення і контролю його елементів і складових частин, експлуатації та технічного обслуговування тощо.

Тут рішення приймаються на основі моделей залежності рівня витрат і рівня надійності від досліджуваних параметрів.

На етапі проєктування критерії прийняття рішень щодо забезпечення надійності зводяться до такого:

– визначити хоча б один набір проектних параметрів, при якому забезпечуються вимоги до надійності (критерій придатності);

– знайти такий набір проєктних параметрів, при якому витрати на забезпечення надійності будуть мінімальними за умови забезпечення вимог щодо надійності об’єктів РКТ (критерій оптимальності).

В якості вихідних даних для можливих рішень можуть прийматися значення показників надійності елементів РКТ. Модель, що розробляється, встановлює залежність надійності виробу від надійності складових частин, тобто на цьому етапі повинна вирішуватися задача нормування надійності [3].

Стосовно об’єктів РКТ якісні вимоги до надійності повинні включати:

– розробку програм забезпечення надійності (ПЗН), забезпечення безпеки (ПЗБ), експериментального відпрацювання (КПЕВ) і контроль виконання всіх заходів цих програм у встановлені терміни;

– виконання КПЕВ в повному обсязі до початку льотних випробувань;

– виконання ПЗН в повному обсязі до моменту завершення відпрацювання.

Кількісні вимоги щодо надійності до об’єктів РКТ в цілому пред’являються в формі основного показника надійності для всіх періодів функціонування об’єкта або додаткових показників надійності і його складових частин.

Вимоги підлягають нормуванню, тобто встановленню в нормативно-технічній і (або) конструкторській (проєктній) документації кількісних і якісних вимог до надійності [5].

Такими нормативно-технічними документами є технічні завдання (ТЗ) на розроблювальний об'єкт і технічні умови (ТУ) на його складові частини (СЧ).

До відповідних робіт з нормування надійності включають:

– вибір номенклатури нормованих показників надійності (ПН);

– техніко-економічне обґрунтування значень показників надійності об'єкта РКТ і його складових частин;

– завдання вимог до точності і достовірності визначення показників надійності;

– формулювання критеріїв відмов і граничних станів;

– завдання вимог до методів контролю надійності на всіх етапах життєвого циклу об'єкта РКТ і вимог до розробки відповідних документів з надійності.

Початкові вимоги до надійності формуються на стадії досліджень і обґрунтування необхідності розробки (або модернізації) того чи іншого конкретного виду РКТ шляхом аналізу попередніх вимог замовника за бажаними рівнями надійності і ефективності з урахуванням узгоджених раніше характеристик призначення і умов експлуатації об'єкта РКТ, а також заданих (або об'єктивно існуючих) обмежень за всіма видами витрат, в тому числі за конструктивним виконанням (масогабаритні характеристики, матеріали, комплектуючі, вироби), технології виготовлення (з урахуванням передбачуваної серійності) і вартості експлуатації об'єкта РКТ протягом призначеного терміну служби.

На основі узгоджених результатів зазначеного аналізу вибирають номенклатуру, задаються ПН і їхні числові значення.

На етапах розробки технічної пропозиції (при наявності додаткових або уточнених вихідних даних) спочатку сформовані вимоги до надійності уточнюють шляхом повторних (уточнюючих) аналізів. Після узгодження з замовником уточнені вимоги включають в розділ «Вимоги до надійності» ТЗ на розробку (модернізацію) об'єкта РКТ і його складових частин.

На наступних етапах (ескізний проєкт, технічний проєкт, робоче проєктування, виготовлення та випробування дослідного зразка, коректування робочої документації) за погодженням між замовником і розробником допускається уточнювати (коригувати) вимоги до надійності при наявності об'єктивних змін в схемно-конструктивній побудові виробу, в прийнятій раніше моделі його експлуатації, в накладених обмеженнях тощо.

При наявності аналогів об'єкта РКТ і його складових частин з достовірно відомим рівнем надійності процедура нормування (ПН) може бути спрощена – скорочена за рахунок тих операцій і (або) показників, інформація за якими не потрібна або вже є на момент формування вимог до надійності.

Для об'єкта РКТ і його складових частин, процес створення яких передбачає експериментальне відпрацювання, за погодженням із замовником допускається поетапне нормування значень ПН за умови послідовного підвищення вимог до надійності і (або) посилення планів статистичного контролю.

У тому випадку, коли відмови можуть призвести до тяжких наслідків (загибелі людей, порушення екологічного середовища, великого матеріального збитку), допускається нормування показників з урахуванням тяжкості наслідків (рівня критичності) відмов, наприклад ставити їх як за сумарним потоком відмов, так і роздільно за критичними і істотними відмовами. При цьому в ТЗ відповідно повинні бути встановлені окремо і критерії для кожного виду відмов, різних за ступенем тяжкості їхніх наслідків (за рівнем критичності).

Номенклатура показників надійності вибирається відповідно до чинних норм для виробів РКТ.

Розглянемо процедуру вибору показників надійності об’єкта РКТ і його СЧ.

Процедура вибору номенклатури ПН, що задаються, складається з трьох незалежних етапів вибору показників: безвідмовності і ремонтопридатності і (або) комплексних, довговічності, зберігання.

Числові значення ПН встановлюються в ТЗ з урахуванням призначення об’єкта РКТ і його СЧ, досягнутого рівня і виявлених тенденцій підвищення надійності, техніко-економічного обґрунтування, можливостей виробників, вимог і можливостей замовника, вихідних даних обраного плану контролю.

У загальному випадку числові значення показників надійності встановлюються виходячи з умов забезпечення заданих значень при мінімальних витратах на розробку і виготовлення.

При створенні нових об’єктів РКТ завдання вимог може здійснюватися на основі експертного аналізу або задаватися від досягнутих значень на аналогах і прототипах.

Для обґрунтування числових значень ПН можуть використовуватися два різних підходи (принципи).

Перший підхід (потрібність) полягає в тому, щоб забезпечити певний мінімальний рівень надійності $R_{\min}$, при якому створення і застосування об’єкта РКТ за призначенням ще має сенс, тобто буде ефективніше, ніж у існуючого прототипу (при прийнятних витратах)

$$R_{тр} > R_{\min}, \tag{1}$$

де $R_{тр}$ – необхідний рівень надійності.

Другий підхід (можливість) полягає в тому, щоб забезпечити максимально можливий рівень ПН об’єкта РКТ при дотриманні заданих або об’єктивно існуючих обмежень на витрати (вартість, масу, об’єм тощо) при одночасному дотриманні умов, що $R_{тр}$ буде не нижче, ніж у аналога.

Кількісні вимоги щодо надійності як на об’єкт РКТ в цілому, так і на його складові частини задаються у вигляді:

– нормативного значення показника надійності $R^{н}$;

– контрольного рівня показника надійності – нижньої односторонньої довірчої границі, якщо підвищенню надійності відповідає більше значення показника, і верхньої односторонньої довірчої границі $\overline{R}^{B}$, якщо підвищенню надійності відповідає менше значення показника;

– нормативного значення довірчої ймовірності $\beta_{н}$, з якою повинен бути підтверджений контрольний рівень показника надійності до моменту завершення відпрацювання або льотних випробувань.

Форма завдання вимог запишиться у вигляді:

$$R \geq R^{н} \tag{2}$$

або

$$R \le R^{B}, \tag{3}$$

де R – фактичне значення показника надійності.

Співвідношення (2) використовується в разі, коли підвищенню надійності відповідає більше значення показника, співвідношення (3) – в іншому випадку.

При цьому в ТЗ встановлюються вимоги щодо контролю надійності в формі

$$\underline{R}^{\beta} \ge R^{н}, \tag{4}$$

$$\overline{R}^{\beta} \le R^{B}, \tag{5}$$

де $\underline{R}^{\beta}, \overline{R}^{\beta}$ – оцінки контрольного рівня показника надійності, що визначені з довірчою ймовірністю β.

Співвідношення (4) використовується в разі, якщо вимоги щодо надійності задані у формі (2); співвідношення (5) – при заданні вимог у формі (3).

Якщо розглянути стартовий комплекс (СК) як об’єкт РКТ, то для нього можна виділити основні і додаткові показники надійності [6, 7].

Основним показником надійності стартового комплексу, призначеного для підготовки до пуску, і пуску ракети космічного призначення (РКП), буде ймовірність $P_{СК}$ підготовки РКП з відповідною готовністю за час $\tau_{\text{п}} \le \tau_{\text{зад.п}}$, тобто

$$P_{СК}\left(\tau_{\text{зад.п}}\right) = P\left(\tau_{\text{п}} \le \tau_{\text{зад.п}}\right), \tag{6}$$

де $\tau_{\text{п}}$ – включає фактичний час підготовки до пуску і час пуску РКП; $\tau_{\text{зад.п}}$ – заданий час підготовки до пуску і час пуску РКП.

Додатковим показником надійності СК є коефіцієнт готовності, що характеризує готовність СК до проведення операцій з підготовки до пуску і пуск РКП.

Таким чином, для СК основним показником надійності можна вважати ймовірність своєчасного завершення операцій з підготовки до пуску і пуск РКП.

Цей показник зв’язує воєдино одиничні показники надійності: безвідмовність і ремонтопридатність і існує при наявності допустимого часу відновлення протягом підготовки до пуску РКП, тобто допускається тимчасова затримка пуску РКН на час $\Delta\tau_{B}$. Цей показник надійності також є додатковим показником.

Вираз для $P_{СК}\left(\tau_{\text{п}}\right)$ можна записати так:

$$P_{СК}\left(\tau_{\text{п}}\right) = \prod_{i=1}^{n} P_{СЧ_i}\left(\tau_{\text{п}_i}\right), \tag{7}$$

де $P_{СЧ_i}\left(\tau_{\text{п}_i}\right)$ – ймовірність своєчасного завершення операції складової частини СК (агрегату, системи) за час її функціонування при підготовці до пуску з урахуванням відновлення при відмові.

Значення $P_{СЧ_i}\left(\tau_{\text{п}_i}\right)$ обчислюється за формулою

$$P_{СЧ_i}\left(\tau_{п_i}\right) = P_{Б_i}\left(\tau_{п_i}\right) + \left[1 - P_{Б_i}\left(\tau_{п_i}\right)\right] \cdot P_{В_i}\left(\Delta\tau_В\right), \tag{8}$$

де $P_{Б_i}\left(\tau_{п_i}\right)$ – ймовірність безвідмовної роботи i-ої СЧ за час $\tau_{п_i}$; $P_{В_i}\left(\Delta\tau_В\right)$ – ймовірність відновлення i-ої СЧ за час $\Delta\tau_В$.

Обчислення значення $P_{Б_i}\left(\tau_{п_i}\right)$ суттєво залежить як від структури складової частини СК, так і від надійності її елементів.

Імовірність відновлення обчислюється за формулою

$$P_В = 1 - \exp\left(-\frac{\Delta\tau_В}{T_В}\right), \tag{9}$$

де $P_В$ – ймовірність відновлення за допустимий час $\Delta\tau_В$; $T_В$ – середній час відновлення.

Сказане справедливо лише при допущенні, що кожна СЧ СК послідовно вступає в роботу, тобто закінчення роботи $(i-1)$-ої складової частини передує початку роботи i-ої складової частини.

Наступною задачею нормування надійності є розподіл заданих кількісних вимог до показників надійності СК в цілому між його СЧ.

У загальному випадку алгоритм рішення являє собою таку задачу нелінійного програмування.

Знайти

$$\min C\left(\overline{P}, N\right), \tag{10}$$

$$F\left(\vec{P}_i, N\right) - P_{СК} = 0, \tag{11}$$

при обмеженнях

$$\begin{cases} P_i - P_{H_i} < 0; \\ P_{B_i} - P_i \le 0, \quad i = \left(\overline{1, N}\right), \end{cases} \tag{12}$$

де $P_{СК}$ – значення показника надійності СК; $C(\cdot)$ – функція витрат; $F(.)$ – модель надійності СК; $\vec{P}_i$ – вектор значень показників надійності СЧ СК; N – кількість СЧ СК; P_{H_i}, P_{B_i} – відповідно мінімально та максимально можливі значення показника надійності i-ої складової частини.

Вектор $\vec{P}_i$, для якого значення функції витрат (10) при обмеженнях (11) і (12) є мінімальним, визначає шукане рішення задачі нормування.

Для розв’язання задачі розподілу вимог до надійності між СЧ СК, можна застосовувати два методи [8]:

– метод на основі регресійних моделей;

– метод на основі принципу збереження співвідношень СЧ-аналогів.

У загальному випадку задача розподілу заданого показника надійності СК між СЧ має вигляд

$$F\left(P_1, P_2, \ldots, P_n\right) \ge P_{СК}, \tag{13}$$

де P_i – значення показника надійності i-ої СЧ.

Для розв’язання цієї задачі приймемо такі припущення:

– відмови СЧ відбуваються незалежно;

– кожна СЧ може перебувати тільки в двох станах: працездатному і непрацездатному;

– параметр потоку відмов СЧ постійний в період нормальної експлуатації.

При розподілі вимог до надійності СК розглядається у вигляді системи послідовно з’єднаних елементів. Відмова будь-якого елементу (СЧ) призводить до відмови системи (СК). У цьому випадку основний показник надійності СК, а саме, ймовірність підготовки РКН до пуску і пуск в заданий час, буде визначатися в залежності від показників надійності його СЧ за формулою (7).

Завдання розподілу вимог до надійності СК має вигляд:

$$\prod_{i=1}^{n} P_{СЧ_i} \geq P_{СК}\left(\tau_{\text{п}i}\right). \tag{14}$$

Якщо усі СЧ СК є рівнонадійні, тобто має місце рівність їхніх інтенсивностей потоку відмов, то із залежності (14) маємо:

$$P_{СЧ_i} = \left[P_{СК}\left(\tau_{\text{п}i}\right)\right]^{\frac{1}{n}}. \tag{15}$$

В реальному випадку СЧ не є рівнонадійними. Тому доцільно при розподілі вимог по надійності використовувати залежність

$$P_{СЧ_i} = \left[P_{СК}\left(\tau_{\text{п}_i}\right)\right]^{\frac{1}{\alpha_i}}, \tag{16}$$

де α_i – «вага» кожної СЧ.

При відомих параметрах потоку відмов СЧ $\omega_{СЧ_i}$ ваги α_i визначаються за формулою

$$\alpha_i = \omega_{СЧ_i} \Big/ \sum_{i=1}^{N} \omega_{СЧ_i}. \tag{17}$$

Розподіл значення показників надійності СК між його СЧ, в основному, залежить від структури самого СК і СЧ аналогів, які можуть бути використані при його розробці. В цьому випадку можна використовувати залежність

$$P_{СЧ_i} = 1 - K_{СЧ_i}\left(1 - P_{СЧ(ан)}\right), \tag{18}$$

де $K_{СЧ_i}$ – коефіцієнт співвідношення надійності i-ої і «базової» СЧ-аналога.

Цей коефіцієнт визначається, як правило, експертним опитуванням провідних фахівців-розробників конкретної СЧ.

Висновки. Охарактеризовано підходи до забезпечення надійності об’єктів РКТ на етапі проєктування, які включають:

– послідовність вирішення задач забезпечення і контролю надійності об’єктів РКТ на етапі проєктування;

– склад робіт з нормування надійності на етапі проєктування;

– вибір номенклатури показників надійності і обґрунтування їхніх числових значень.

Використання запропонованого підходу розглянуто на прикладі оцінки надійності деяких стартових комплексів[1, 3, 4, 7].

1. *Hudramovich V. S., Sirenko V. N., Klimenko D. V., Daniev Yu. F., Hart E. L.* Development of the normative framework methodology for justifying the residual resource of starting buildings constructions of space launch vehicles. Strengths of Materials. 2019. V. 51, No. 3. P. 333–340. https://doi.org/10.1007/s11223-019-00079-4
2. Шестьдесят лет в ракетостроении и космонавтике / Под общ. ред. А. В. Дегтярева. Днепропетровск : АРТ Пресс, 2014. 540 с.
3. *Гудрамович В. С., Даниев Ю. Ф., Пошивалов В. П.* О подходах к нормированию прочности и обеспечению надежности ракетных космических комплексов. Актуальні проблеми механіки: монографія / Під редакцією М. В. Полякова. Дніпро: Ліра, 2018. С. 216–224. https://doi.org/10.15407/itm2018.03.112
4. *Дегтярев А. В, Пилипенко О. В., Гудрамович В. С., Сиренко В. Н. , Даниев Ю. Ф., Клименко Д. В. , Пошивалов В. П.* О классификации стартового оборудования ракетно-космических комплексов при обосновании норм. Космічна наука і технология. 2016. Т. 22, №1. С. 3–13. https://doi.org/10.15407/knit2016.01.003
5. *Пошивалов В. П., Даниев Ю. Ф., Резниченко Л. В.* Системный подход к обеспечению надежности сложных систем. Системні технології. Дніпро: НМАУ, 2017. С. 27–34.
6. *Бирюков Г. П., Смирнов В. И.* Элементы теории проектирования ракетно-космических комплексов. М.: Изд-во МАИ, 2003. 286 с.
7. *Бирюков Г. П., Кукушкин А. В., Торпачев А. В.* Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов. М.: Изд-во МАИ. 2002, 264 с.
8. Надежность и эффективность в технике: Справочник: в 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдуевский (предс.) и др. Т. 5. Проектный анализ надежности. М.: Машиностроение, 1988. 316 с.

Отримано 01.11.2019,
в остаточному варіанті 21.02.2020