УДК 519.6 https://doi.org/10.15407/itm2023.02.013

В. П. ПОШИВАЛОВ, Ю. Ф. ДАНІЄВ

НАДІЙНІСТЬ І БЕЗПЕКА СТАРТОВИХ КОМПЛЕКСІВ РАКЕТ-НОСІЇВ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: poshivalov v.p@ukr.net

Розглянуто питання надійності і безпеки стартових комплексів ракет-носіїв. Виділені задачі, які необхідно вирішувати при оцінці надійності стартових комплексів, що включають розрахунки ймовірності безвідмовної роботи систем з постійним резервуванням при рівнонадійних і нерівнонадійних елементах; аналіз надійності при резервуванні заміщенням із цілою кратністю й ненавантаженим резервом; розрахунки значень імовірності безвідмовної роботи складових частин при виконанні технологічних операцій підготовки пуску ракети; розрахунки значень показників надійності складової частини в цілому й порівняння отриманих значень показників надійності з вимогами технічного завдання. В наслідок того, що стартовий комплекс складається як з відновлюваних, так і невідновлюваних елементів, показники надійності повинні вибиратися такими розрахунками, щоб з їхньою допомогою можна було оцінити надійність, як окремих елементів, так і в цілому системи, що складається з різнотипних елементів. Ці показники характеризуються розподілами часу безвідмовної роботи й часом відновлення та відображають імовірність знаходження елемента або системи в справному стані або в стані відмови. При умові, що безвідмовну роботу й час відновлення можна описати розподілом Вейбулла, отримано вирази для коефіцієнту оперативної готовності, тобто ймовірності того, що стартовий комплекс буде в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування стартового комплексу не передбачається. Безпека стартових комплексів оцінюється імовірнісними оцінками виникнення небезпечних ситуацій і визначення основних напрямків зі зниження їх наслідків та обліком ваги наслідків можливих ситуацій при експлуатації із оцінюванням імовірності їх виникнення. Встановлені показники безпеки стартових комплексів. Показано, що при оцінюванні безпеки повинні використовуватися показники, які придатні для практичного вирішення задач щодо обґрунтування та забезпечення заданих вимог безпеки при розробці стартових комплексів від можливих загроз. У якості показника безпеки прийнята ймовірність того, що кожна з небезпечних ситуацій, що виникають за певний час, буде ліквідована. Для опису випадкового числа виникнення небезпечних ситуацій використовується процес відновлення. Для визначення частоти небажаних подій рекомендовано використовувати статистичні дані по аварійності й надійності стартового комплексу; логічні методи аналізу «дерев подій», «дерев відмов», імітаційні моделі виникнення аварій; експертні оцінки.

Ключові слова: *стартові комплекси, ракети-носії, показники надійності, показники безпеки, розподіл Вейбулла.*

This paper is concerned with the reliability and safety of launch complexes. The problems to be solved in launch complex reliability evaluation are identified: calculations of the probability of no-failure operation of passive redundancy systems with equal- and nonequal-reliability elements, reliability analysis for replacement redundancy with integer multiplicity and unloaded reserve; calculations of the probability of no-failure operation of the launch complex components in launch preparation, and calculations of the reliability indices of a component part as a whole and a comparison of the calculated reliability indices with the specification requirements. Since a launch complex consists both of renewable elements and of nonrenewable ones, the reliability indices must be calculated so that one may evaluate the reliability both of individual elements and of a system of different-type elements as a whole. These indices are characterized by the nonfailure operation time and recovery time distributions and show the probability of a serviceable state or a failure state of an element and a system. On condition that the nonfailure operation time and the recovery time can be described by the Weibull distribution, expressions are obtained for the availability factor, i.e., the probability of the launch complex being operative at an arbitrary time, except for scheduled periods during which the launch complex is not envisaged for use. Launch complex safety is evaluated by the probability of hazards, the identification of main ways to mitigate their consequences, and account for weight of the consequences of possible hazards in service. Launch complex safety indices are identified. It is shown that safety must be evaluated using indices suitable for the practical solution of problems of the justification and assurance of specified safety requirements against possible threats in the development of launch complexes. The adopted safety index is the probability that each hazard that occurs in a certain time will be eliminated. A renewal process is used to describe a random number of hazard occurrences. To determine the hazard frequency, it is recommended to use statistical data on launch complex accident rate and reliability, logical methods of event tree and fault tree analysis, accident simulation models, and expert judgments.

Keywords: *launch complexes, launch vehicles, reliability indices, safety indices, Weibull distribution.*

Вступ. Для запусків космічних апаратів (КА) різного призначення в багатьох країнах використовуються стартові комплекси (СК) [1 – 4].

СК повинен з однієї сторони бути універсальним для різних типів КА, а в перспективі й для різних типів ракет-носіїв (РН), а з іншої допускати багаторазове використання. Така багатофункціональність робить досить актуальними проблеми надійності й безпеки, а саме у процесі проєктування СК велика увага повинна приділятися розрахункам на надійність і безпеку його систем обладнання й агрегатів [2, 5, 6].

Надійність і безпека СК є, з одного боку, самостійними властивостями, а з іншого боку, досить близькими один одному. Найбільший ступінь зближення цих властивостей відбувається в тому випадку, коли у вигляді загрози безпечному стану СК виступає відмова елемента, яка пов’язана з витратою ресурсу. Така відмова за відсутності відповідних заходів захисту може стати небезпечним і привести до критичних наслідків. Нормативно-технічна документація включає вимоги, що представляються конкретними значеннями показників. Задачі, які повинні виконуватися СК і його технологічними системами, як правило, вимагають високий рівень надійності й безпеки. І якщо раніше задавалися тільки кількісні показники рівня надійності, то на сьогоднішній день вимоги встановлюють кількісні і якісні показники безпеки щодо кожного виду аварійних загроз.

Основними показниками для СК є показники надійності, оперативності й продуктивності. Надійність СК задається коефіцієнтом готовності, імовірністю успішної підготовки ракети-носія до пуску й імовірністю успішного здійснення пуску.

Надійність стартових комплексів. Оскільки основна ціль стартового комплексу є підготовка до пуску й пуск ракет-носіїв, то основним показником надійності для нього є ймовірність підготовки РН до пуску й пуск за час $\tau_n \le \tau_n^3$, тобто

$$P_{CK}\left(\tau_n^3\right) = Bep\left(\tau_n \le \tau_n^3\right),$$

де τ_n – фактичний час підготовки до пуску й пуску РН; τ_n^3 – заданий час підготовки до пуску й пуск РН.

Виділимо задачі, які необхідно вирішувати при оцінюванні надійності СК:

– розрахунки ймовірності безвідмовної роботи систем з постійним резервуванням при рівнонадійних і нерівнонадійних елементах;

– аналіз надійності при резервуванні заміщенням із цілою кратністю й ненавантаженим резервом;

– розрахунки значень імовірності безвідмовної роботи складових частин при виконанні технологічних операцій підготовки пуску ракети;

– розрахунки значень показників надійності складової частини в цілому й порівняння отриманих значень показників надійності з вимогами технічного завдання.

Надійність елементів, які входять до складу СК, характеризується імовірнісними показниками, найважливішими з яких є час безвідмовної роботи й час відновлення. Ці параметри мають імовірнісний сенс і описуються відповідними розподілами. Для оцінювання надійності елементів СК використовуються імовірнісні показники надійності.

СК складається як з відновлюваних, так і невідновлюваних елементів, тобто характеризується проміжками справної роботи і відновлення при відмовах, що періодично чергуються. У силу цього показники надійності обирають із такими розрахунками, щоб з їхньою допомогою можна було оцінити надійність як окремих елементів, так і в цілому системи, що складається з різнотипних елементів. Ці показники характеризуються розподілами часу безвідмовної роботи й часом відновлення та відображають імовірність знаходження елемента або системи в справному стані або в стані відмови [7, 8].

Для невідновлюваних елементів СК показники надійності наступні:

– імовірність безвідмовної роботи $P(t)$;

– щільність розподілу часу безвідмовної роботи $f(t)$;

– середній час безвідмовної роботи T_{CP};

– інтенсивність відмов $\lambda(t)$;

Для відновлюваних елементів СК показники надійності:

– імовірність безвідмовної роботи $P(t)$;

– середній час безвідмовної роботи T_{CP};

– інтенсивність відмов $\lambda(t)$;

– середній час відновлення T_{BCP};

– інтенсивність відновлення μ;

– імовірність безвідмовної роботи за час $(0,\tau)$;

– імовірність невідновлення за час $(0,\tau)$;

– імовірність безвідмовної роботи за час τ, $\nu(\tau)$;

– інтенсивність відновлення за час τ, $\mu(\tau)$.

Вважаємо, що час безвідмовної роботи й час відновлення можна описати розподілом Вейбулла [9]

$$P(t) = \exp\left(-\lambda t^{\beta}\right),$$

тоді маємо

$$\lambda(t) = \lambda\beta t^{\beta-1};$$

$$f(t) = \lambda\beta t^{\beta-1}\exp\left(-\lambda t^{\beta}\right);$$

$$T_{CP} = \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\lambda^{-\frac{1}{\beta}},$$

де λ, β – параметри розподілу; $\Gamma(x)$ – гама функція.

Коефіцієнт готовності (комплексний показник надійності СК)

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{CP}}{T_{CP} + t_{CP}}$$

і коефіцієнт відмови

$$K_B = 1 - K_{\Gamma}$$

є показниками надійності, що враховують час безвідмовної роботи T_{CP} й час простою елемента СК t_{CP}.

У якості показника надійності СК також використовується коефіцієнт оперативної готовності $K_{O\Gamma}(t)$, тобто ймовірність того, що СК виявиться в працездатному стані в довільний момент часу t, крім планованих періодів, протягом яких застосування СК не передбачаються.

Для розподілу Вейбулла будемо мати

$$K_{ОГ}(t) = K_Г \exp\left\{-\lambda t^{\beta}\right\}.$$

Показником якості функціонування усього СК є коефіцієнт готовності $K_Г^{СК}$.

Для його визначення всю сукупність технологічного обладнання (ТО) СК доцільно представити у вигляді багаторівневої ієрархічної структури, що містить види систем ТО, системи ТО й елементи систем ТО. У цьому випадку цей коефіцієнт буде функціонально залежати від значень коефіцієнтів готовності окремих елементів систем ТО

$$K_Г^{СК} = \varphi\left(K_{Г111}(\alpha_{111})...K_{Г11к}(\alpha_{11к}),...K_{Гijk}(\alpha_{ijk})\right),$$

де $K_{Гijk}(\alpha_{ijk})$ – коефіцієнт готовності k-го елемента СК j-ої системи, що входить до i-го виду ТО (безліч видів ТО, що включає: наземне стартове обладнання, наземне заправне обладнання, устаткування систем газопостачання й термостатування тощо).

СК протягом усього строку експлуатації повинен характеризуватися наступними показниками надійності:

– середнім наробітком на відмову;

– середнім часом відновлення працездатного стану після відмови;

– ресурсом.

Приведемо значення деяких показників надійності ракетно-космічного комплексу, які представляються в тактико-технічному завданні: імовірність успішного запуску не менше $0{,}985$; імовірність безвідмовної роботи ракети-носія Титан (США) – $0{,}941$. Коефіцієнт готовності СК $K_Г = 0{,}95$, ймовірність успішної підготовки ракети-носія до пуску $P_{ПП} \geq 0{,}960$ і ймовірність успішного проведення пуску $P_П(t_П) = 0{,}92$ [7, 8].

Безпека стартових комплексів. В загальному випадку під безпекою розуміється такий стан, при якому об’єкту не загрожує небезпека або є захист від небезпеки, а небезпека представляє можливість нанесення шкоди, майнового (матеріального), фізичного або морального збитку об’єкта [10].

Безпека СК характеризується здатністю СК і його систем не переходити у всіх заданих режимах експлуатації в стан, що загрожує життю обслуговуючого персоналу, об’єктам, що сполучаються, і природному середовищу [11, 12]

Основним (узагальненим) показником безпеки є ймовірність відсутності подій за заданий час при експлуатації протягом календарного року.

Безпека СК оцінюється із двох сторін:

– імовірнісними оцінками виникнення небезпечних ситуацій і визначення основних напрямків по зниженню їх наслідків;

– урахування тяжкості наслідків можливих ситуацій при експлуатації СК із оцінюванням імовірності їх виникнення.

СК є джерелами наступних видів небезпеки: вибухонебезпечності, механічної небезпеки, пожежної небезпеки, промислової небезпеки, термічної небезпеки, хімічної небезпеки й електричної небезпеки.

Вимоги до безпеки СК встановлюються технічними завданнями на підставі аналізу ризиків, який проводиться на проєктних стадіях.

Небезпечними для СК можна вважати як технологічний процес підготовки до пуску й пуск ракет космічного призначення, так і окремі операції, пов’язані з необхідністю роботи з компонентами ракетних палив, обладнанням, що перебуває під тиском, електроустановками, роботами на великій висоті, роботами з важкими й великогабаритними вантажами тощо.

У якості показника безпеки прийнята ймовірність того, що кожна з небезпечних ситуацій, що виникають за час t, буде ліквідована. На підставі формули повної ймовірності вираз для показника безпеки може бути представлено у вигляді

$$P(A)=\sum_{K=1}^{n} P(H_k)P(A/H_k),$$

де H_k – подія, яка полягає в тому, що за час t у системі виникне рівно k небезпечних ситуацій $(k=1,2,...,n)$; $P(H_k)$ – імовірність виникнення k небезпечних ситуацій; A – подія, яка полягає в тому, що всі небезпечні ситуації, що виникають за час t, будуть ліквідовані; $P(A/H_k)$ – умовна ймовірність ліквідації k небезпечних ситуацій.

При цьому відомі $P(H_k)$, $P(A/H_k)$, а події $H_1\, H_2\, ...\, H_n$ утворюють повну систему неспільних подій таким чином, що

$$\sum_{j=1}^{n} P(H_j)=1.$$

Для опису випадкового числа виникнення небезпечних ситуацій можна використовувати процес відновлення. Моменти відмов утворюють випадковий потік, який будемо називати процесом відновлення.

Якщо випадкові часи мають експонентний розподіл, то процес відновлення буде утворювати пуассоновський потік [13].

Тоді число виникнення небезпечних ситуацій може приймати будь-які цілочисленні значення $1,...,k$ з імовірністю

$$P(H_k)=\frac{(\nu t)^k}{k!}\exp(-\nu t),$$

де ν – параметр (інтенсивність) потоку небезпечних ситуацій.

Якщо роботи з ліквідації небезпечних ситуацій незалежні, то вираз для показника безпеки запишеться як

$$P(A)=\exp(-\nu t)\sum_{k=1}^{n}\left[\frac{(\nu t^k)}{k1}\prod_{i=1}^{k} P_i\right],$$

де $P_i = P(A/H_i)$.

При $P_i = p$

$$P(A) = \exp(\nu(1-p)t) \text{ .}$$

Показник безпеки СК, що враховує вагу наслідків можливих небезпечних ситуацій при експлуатації, представляє собою ризик

$$R = P^{*}C \text{ ,}$$

де R – показник безпеки, що характеризує ризик; P – імовірність виникнення порушення безпеки; C – показник ваги наслідків порушення безпеки.

Відзначимо основні задачі етапу оцінки ризику:

– визначення частот виникнення небезпечних подій;

– оцінка наслідків виникнення небезпечних подій.

Для визначення частоти небезпечних подій рекомендується використовувати:

– статистичні дані по аварійності й надійності СК;

– логічні методи аналізу «дерев подій», «дерев відмов», імітаційні моделі виникнення аварій;

– експертні оцінки шляхом урахування думки фахівців у цій галузі.

Аналіз ризиків проводять на етапі ескізного проєктування та уточнюють на наступних етапах.

Нижче наведено п'ять рівнів виникнення небезпечних ситуацій за частотою [4, 14]:

- повторювані $\nu \ge 10^{-3}$ $\nu \ge 10^{-3}$ 1/год;
- помірковано ймовірні $10^{-5} \le \nu < 10^{-3}$ 1/год;
- малоймовірні $10^{-7} \le \nu < 10^{-5}$ 1/год;
- украй малоймовірні $10^{-9} \le \nu < 10^{-7}$ 1/год;
- практично неймовірні $\nu > 10^{-9}$ 1/год.

У якості окремих показників безпеки експлуатації СК можуть бути прийняті:

1. імовірність безпечної експлуатації СК за строк експлуатації або за строк гарантії;
2. імовірність безпечної експлуатації СК за час технологічного процесу підготовки до пуску й пуск РН;
3. імовірність безпеки виконання i-ої небезпечної операції в s-му технологічному процесі в даний момент t;
4. кількість проведених в інтервалі $(0, t)$ експлуатації СК s-х технологічних процесів;
5. кількість небезпечних операцій у технологічному процесі.

Перераховані показники дозволяють оцінити степінь безпечної експлуатації СК.

Рівень безпеки групи систем визначається їхнім загальним числом аварійних сценаріїв і складністю кожної системи.

Ризик для СК дорівнює сумі виявлених ризиків усіх систем з урахуванням схованих погроз. З урахуванням складності системи число сценаріїв, що враховуються, буде

$$C_j = (C_{pi} + C_{\partial i})K_i \text{ ,}$$

де C_{pi} – число виявлених сценаріїв; $C_{\partial i}$ – число додаткових сценаріїв; K_i – коефіцієнт складності.

Розподіл величин ризиків по групах систем проводиться пропорційно числу сценаріїв

$$Q_i = \frac{QC_j}{\sum_{j=1}^{N} C_j}.$$

Для кожної окремої системи рівень нормативного ризику буде

$$Q_{\partial i} = \frac{Q_i}{C_{\partial i}}.$$

У технічному завданні на проєктування СК встановлюються вимоги, основні технічні та експлуатаційні характеристики, які мають бути оцінені при розробці комплексу, наступним підтвердженням під час випробувань та подальшої експлуатації.

Висновки. Наведені показники надійності СК на етапі проєктування при розподілі Вейбулла часу безвідмовної роботи. Розглянуті основні показники безпеки СК.

Оцінка безпеки СК повинна проводитися з використанням показників, які придатні для практичного вирішення задач щодо обґрунтування та забезпечення заданих вимог безпеки при розробці стартових комплексів від можливих загроз.

До складу цих показників можуть бути включені ймовірності небезпечного стану і його відсутності, середній і гамма-процентний наробіток до настання небезпечної події, інтенсивність небезпечних подій, імовірність захисту від загрози певного виду тощо.

Дослідження виконані за рахунок фінансування наукових проєктів за КПКВК 6541230.

1. *Дегтярев А. В., Пилипенко О. В., Гудрамович В. С., Даниев Ю. Ф., Клименко Д. В., Пошивалов В. П.* О классификации стартового оборудования ракетно-космических комплексов при обосновании норм прочности. Косм. наука і технологія. 2016. Т. 22. № 1. С. 3–14. https://doi.org/10.15407/knit2016.01.003
2. *Пошивалов В. П., Данієв Ю. Ф., Резниченко Л. В., Телегіна І. І.* Про забезпечення надійності об’єктів ракетно-космічної техніки на етапі проектування. Технічна механіка. 2020. № 1. С. 67–74. https://doi.org/10.15407/itm2020.01.067
3. *Даниев Ю. Ф., Демченко А. В., Зевако В. С.* и др. Космические летательные аппараты. Введение в космическую технику, под ред. *А. Н. Петренко*, АРТ-Пресс, Днепропетровск. 2007. 456 с.
4. *Бармин И. В., Каджаев В. Л.* Принципы обеспечения надежности и безопасности функционирования ракетно-космического комплекса на этапе предпусковой подготовки. Полет. 2013. № 8. С. 53–64.
5. *Jeremy Straub, Ronald Arthur Marsh David J.* Whalen Small Spacecraft Development Project-Based Learning. Springer International Publishing Switzerland. 2017. 238 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23645-2
6. Spacecraft systems engineering. Fourth Edition. Edited by *Peter Fortescue, Graham Swinerd, John Stark, John Wiley & Sons*, Ltd. 2011. 710 p.
7. *Переверзев Е. С., Даниев Ю. Ф.* Вероятностные распределения и их применения. Днепропетроск. ИТМ НАН Украины. 2004. 418 с.
8. *Куренков В. И., Капитонов В. А.* Методы расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов: учеб пособие. Самара Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 320 с.
9. *Бирюков Г. П.* Структурный анализ и обоснование тактико-технических характеристик технологического оборудования ракетно-космических комплексов. М.: Изд-во МАИ, 2003. 312 с.
10. *Алпеев А. С.* Основные понятия безопасности. Надёжность и контроль качества. 1994. № 7. С. 29–40.

11. *Харченко В. С., Скляр В. В., Тарасюк О. М.* Анализ рисков аварий для ракетно-космической техники. Радіоэлектроника і компютерні систем. Х.: ХАІ. 2003. С. 125–149.
12. *Горбенко А. В., Засуха С. А., Рубан В. И., Тарасюк О. М., Харченко В. С.* Безопасность ракетно-космической техники и компьютерных систем. Авиационно-космическая техника и технологии. 2011. № 1. С. 9–20.
13. *Гнеденко Б. В. Беляев Ю. К. Соловьев А. Д.* Математические методы в теории надежности. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ ». 2017. 584 с.
14. *Ковалевич О. М.* Риск в техногенной сфере. М.: Идательский дом. МЭИ. 2006. 152 с.

Отримано 22.05.2023,
в остаточному варіанті 07.06.2023