

Постановка и решение задачи оптимизации требований к надежности составных частей и основных элементов технических комплексов космодромов для подготовки изделий ракетно-космической техники

© А.В. Синельщиков¹, Д.К. Драгун^{1,2}, В.В. Козьмин²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

² АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», Москва, 121309, Российская Федерация

Рассмотрены вопросы оптимизации надежности технических комплексов космодромов. При решении задачи оптимизации требований к надежности их составных частей и основных элементов в качестве критерия оптимальности был принят минимум затрат на создание и модернизацию технического комплекса. Доказано, что оптимальное значение вероятности безотказной работы i -го элемента технического комплекса будет линейно зависеть от разности соответствующих значений допустимой и предельно малой вероятностей отказа комплекса, а также будет определяться относительной нормированной стоимостью ее повышения при отработке данного элемента. В частности, получено выражение для определения оптимального числа необходимых опытных образцов i -го элемента технического комплекса космодрома по рассчитанному оптимальному значению вероятности безотказной работы данного элемента. Приведен пример практического применения представленного решения рассмотренной задачи оптимизации. Решение данной задачи может способствовать повышению эффективности создания и последующей эксплуатации технических комплексов, а также развитию наземной космической инфраструктуры в целом.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, космодром, наземная космическая инфраструктура, технический комплекс, технологическое оборудование, надежность, вероятность безотказной работы, оптимизация

Введение. В настоящее время в Российской Федерации (РФ) возвращены работы по наращиванию орбитальных группировок космических аппаратов, служащих как в общехозяйственных интересах, так и в интересах Министерства обороны Российской Федерации. Форсируются работы по созданию других перспективных изделий ракетно-космической техники (РКТ), способных обеспечить технологический суверенитет РФ и сохранение за ней статуса лидера в области освоения дальнего и околоземного космического пространства. Создаются объекты наземной космической инфраструктуры (НКИ), служащей для реализации наземной подготовки перспективных изделий РКТ и способной обеспечить успешное выполнение задач, поставленных перед отечественной ракетно-космической отраслью (РКО). Так, создаются и модернизируются технические комплексы (ТК), являющиеся неотъемлемой частью инфраструктуры космодрома, соответствующие

лучшим мировым практикам и отвечающие инновационным направлениям в развитии и эксплуатации НКИ в целом [1–5].

Как правило, при создании или модернизации ТК для повышения обоснованности управленческих и технических решений, принимаемых на всех стадиях проектирования, а также с целью выбора наиболее предпочтительного проектного облика создаваемого или модернизируемого ТК из множества допустимых вариантов-альтернатив осуществляется его качественная оценка. Однако в настоящее время в связи с трудностью учета всех возможных критериев и характеристик, при подобной качественной оценке во внимание принимаются только те показатели, которые наиболее полно отражают эффективность проводимых работ. В большинстве случаев в качестве подобных оценочных показателей выступают два основных параметра: надежность ТК и стоимость его создания. В частности, наиболее предпочтительным считается тот вариант проектного облика ТК, который при обеспечении выполнения всех заданных требований (в том числе и по надежности) имеет минимальную стоимость и может быть реализован в назначенный срок.

Необходимо отметить, что в настоящее время в отечественной РКО отсутствуют какие-либо четко представленные критерии и методики, позволяющие корректно решать подобные задачи оптимизации. Например, отсутствует методический аппарат для решения задачи оптимизации требований к надежности составных частей (СЧ) и основных элементов ТК космодромов при обеспечении минимальной стоимости их создания и модернизации.

Цель настоящей статьи — повышение эффективности создания и последующей эксплуатации ТК космодромов благодаря разработке и внедрению научно-обоснованного методического аппарата оптимизации требований к надежности их СЧ и основных элементов.

Постановка задачи оптимизации требований к надежности элементов ТК космодромов¹. Как правило, при создании и модернизации ТК космодромов, комплектов их технологического оборудования (ТО) и систем, с целью проведения расчета надежности, составляются специальные структурные или структурно-функциональные схемы надежности на ТК в целом и на входящие в его состав отдельные элементы [6–8]. На основе данных схем надежность ТК, представляющая собой вероятность безотказной работы (ВБР) его агрегатов и систем [9], может быть записана в следующем виде:

$$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

¹ Для сокращения и удобства записи далее по тексту настоящей статьи СЧ и основные элементы ТК космодрома будем называть элементами ТК.

где P_i — ВБР i -го элемента ТК; n — количество i -х элементов ТК ($n = 1, 2, 3, \dots$).

В данном случае предполагается, что ТК сохраняет свое работоспособное состояние и, как следствие, может находиться в готовности к применению тогда и только тогда, когда будут работоспособны все n элементов, входящие в его состав. Таким образом, выражение (1), определяющее ВБР, является основным ограничением решаемой задачи. Для получения целевой функции необходимо найти и установить связь между суммарными затратами на создание и модернизацию ТК и оптимизируемой ВБР его i -х элементов.

Исходя из многолетнего опыта создания и последующей эксплуатации ТК, накопленного в профильных предприятиях отечественной РКО, можно сделать вывод, что стоимость создания и модернизации ТК космодрома в основном определяется затратами на разработку и проведение разных видов испытаний его элементов. Например, стоимость создания комплекта механотехнологического оборудования ТК (как и любого другого комплекта ТО или системы ТК) будет пропорциональна количеству опытных образцов данного комплекта, успешно прошедших заводские, автономные и комплексные испытания и поставленных на объект планируемой эксплуатации для дальнейшего применения в летных испытаниях изделия РКТ в составе ТК.

На основании вышеизложенного суммарные затраты на создание и модернизацию ТК могут быть представлены в виде

$$C_{\text{ТК}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{сч ТК } i}, \quad (2)$$

где $C_{\text{сч ТК } i}$ — стоимость создания i -го элемента ТК.

В данном случае стоимость создания i -го элемента ТК может быть записана как произведение

$$C_{\text{сч ТК } i} = C_{\text{сч ТК } i0} \times n_i, \quad (3)$$

где $C_{\text{сч ТК } i0}$ — удельная стоимость создания i -го элемента ТК, приходящаяся на один опытный образец; n_i — количество опытных образцов i -го элемента ТК, необходимых для его отработки ($n_i = 1, 2, 3, \dots$).

С целью установления связи между количеством опытных образцов i -го элемента ТК и ВБР данного элемента может быть использована предложенная в работе [10] модель изменения надежности объекта от числа испытаний, в ходе которых проводятся доработки:

$$\begin{cases} P_j = P_\infty - (P_\infty - P_0) \times e^{-\Theta_j}; \\ \Theta = -\ln\left(1 - \frac{a \times n_{\text{пр}}}{P_\infty}\right) \times \frac{n_{\text{дор}}}{n_{\text{исп}}} \approx \frac{a \times n_{\text{пр}}}{P_\infty} \times \frac{n_{\text{дор}}}{n_{\text{исп}}}, \end{cases} \quad (4)$$

где P_j — ВБР объекта в период проведения j -го номера испытаний;
 P_∞ — предельное значение ВБР объекта, которое может быть достигнуто при числе испытаний, стремящемся к бесконечности ($n_{\text{исп}} \rightarrow \infty$); P_0 — начальное значение ВБР объекта (до проведения испытаний); Θ_j — параметр, характеризующий средний прирост ВБР объекта за счет проведения j -го номера испытаний, отнесенный к оставшейся ненадежности; Θ — параметр, характеризующий средний прирост ВБР объекта за счет проведения одного испытания, отнесенный к оставшейся ненадежности; $n_{\text{дор}}$ — количество доработок объекта в период проведения испытаний ($n_{\text{дор}} = 1, 2, 3, \dots$); $n_{\text{исп}}$ — число испытаний объекта ($n_{\text{исп}} = 1, 2, 3, \dots$); a — постоянный коэффициент, характеризующий эффективность устранения доработкой объекта одной из его возможных причин отказов; $n_{\text{пр}}$ — количество причин отказов, устраняемых в ходе одной доработки объекта ($n_{\text{пр}} = 1, 2, 3, \dots$).

При этом будем считать, что каждое новое проводимое испытание (заводское, автономное, комплексное или летное) i -го элемента ТК будет давать новую дополнительную информацию о возможных источниках отказов и, как следствие, после проведения соответствующих доработок будет способствовать повышению ВБР данного элемента. Таким образом, предложенному подходу будет соответствовать использование обобщенной и осредненной зависимости ВБР i -го элемента ТК от числа испытаний данного элемента при его отработке.

Зависимость ВБР i -го элемента ТК космодрома от числа испытаний данного элемента при его отработке приведена на рис. 1. В данном случае функция ВБР будет представлять собой непрерывно возрастающую, монотонную функцию (функция 1) без каких-либо участков падения, связанных с началом ($P_{\text{зи}i0}, P_{\text{аи}i0}, P_{\text{ки}i0}, P_{\text{ли}i0}$) и окончанием ($P_{\text{зи}i}, P_{\text{аи}i}, P_{\text{ки}i}, P_{\text{ли}i}$) того или иного этапа испытаний (функция 2).

Используя модель изменения надежности объекта, приведенную в виде выражения (4), зависимость ВБР i -го элемента ТК от количества опытных образцов данного элемента может быть записана в следующем виде:

$$P_i(n_i) = P_{i\infty} - (P_{i\infty} - P_{i0}) \times e^{-\Theta_i \times n_i}, \quad (5)$$

где $P_{i\infty}$ — предельное значение ВБР i -го элемента ТК, которое может быть достигнуто при числе испытаний, стремящемся к бесконечности ($n_i \rightarrow \infty$); P_{i0} — начальное значение ВБР i -го элемента ТК (до проведения испытаний); Θ_i — параметр, характеризующий средний прирост ВБР i -го элемента ТК за счет проведения одного испытания, отнесенный к оставшейся ненадежности.

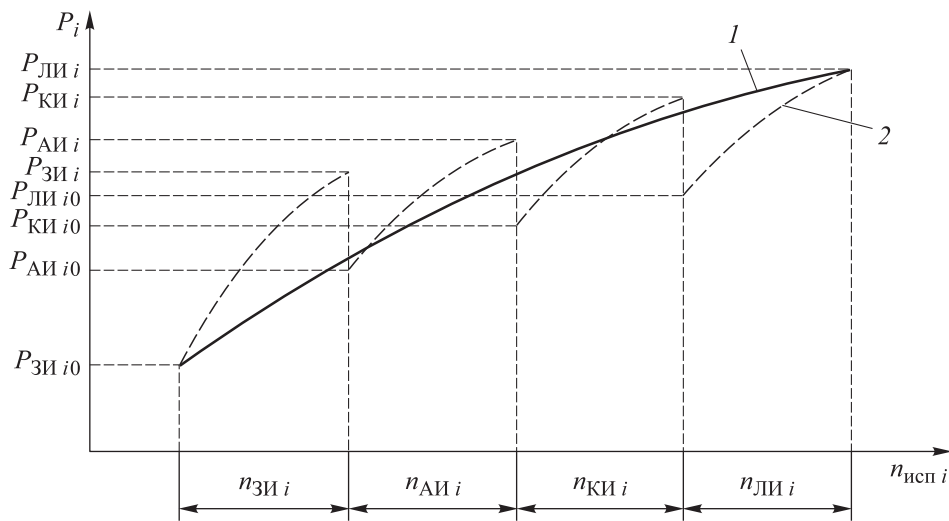


Рис. 1. Зависимость ВБР i -го элемента ТК космодрома от числа испытаний данного элемента при его отработке:
1, 2 — функции ВБР i -го элемента ТК

Решая выражение (5) относительно n_i , получим

$$n_i = \frac{1}{\Theta_i} \times \ln \frac{P_{i\infty} - P_{i0}}{P_{i\infty} - P_i}. \quad (6)$$

Подставив (6) и (3) в выражение (2), определим искомую целевую функцию, которую можно записать так:

$$C_{\text{ТК}} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{\text{СЧ ТК } i0}}{\Theta_i} \times \ln \frac{P_{i\infty} - P_{i0}}{P_{i\infty} - P_i}. \quad (7)$$

Тогда задачу оптимизации требований к надежности элементов ТК космодромов можно сформулировать следующим образом: найти такие значения ВБР i -х элементов ТК, при которых значение ВБР ТК в целом было бы не ниже требуемого, а стоимость его создания или модернизации была бы минимальной.

Математическая постановка данной задачи оптимизации, в соответствии с допущениями, сделанными в выражениях (1) и (7), примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{\text{ТК}} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{\text{СЧ ТК } i0}}{\Theta_i} \times \ln \frac{P_{i\infty} - P_{i0}}{P_{i\infty} - P_i} = \min; \\ \prod_{i=1}^n P_i \geq P_{\text{ТК тр}}; \\ P_{i0} < P_i < P_{i\infty} (i = 1, 2, 3, \dots, n), \end{array} \right. \quad (8)$$

где $P_{\text{ТК тр}}$ — требуемое значение ВБР ТК.

Решение задачи оптимизации требований к надежности элементов ТК космодронов. Анализируя математическую форму записи решаемой задачи оптимизации, можно сделать вывод, что при заданных значениях $C_{\text{СЧ ТК } i0}$, Θ_i , $P_{i\infty}$, P_{i0} и $P_{\text{ТК тр}}$ целевая функция и соответствующие функции ограничений будут иметь выпуклый вид, а сама задача будет нелинейной. Ограничение $P_{i0} < P_i < P_{i\infty}$ будет учитываться аналитической формой целевой функции (существуют натуральные логарифмы только положительных чисел) и, как следствие, оно может быть исключено из математической постановки решаемой задачи. Из-за выпуклости целевой функции и соответствующих функций ограничений неравенство в основном ограничении может быть заменено следующим строгим равенством:

$$\prod_{i=1}^n P_i = P_{\text{ТК тр}}. \quad (9)$$

Данный факт обусловлен тем, что невозможно обеспечить значение ВБР ТК больше требуемого при таких затратах, которые меньше, чем затраты, необходимые для соблюдения требуемого значения.

Для дальнейшего поиска аналитического решения рассматриваемой задачи оптимизации проведем линеаризацию выражения (9).

Потому, что, как правило, требуемое значение ВБР создаваемого или модернизируемого ТК составляет более 85 % ($P_{\text{ТК тр}} > 0,85$), а также с учетом данных, приведенных в работе [10], будут справедливы следующие приближенные зависимости:

$$\begin{aligned} \ln P_i &\approx -(1 - P_i); \\ \ln P_{\text{ТК тр}} &\approx -(1 - P_{\text{ТК тр}}). \end{aligned} \quad (10)$$

Прологарифмировав выражение (9), получим

$$\ln \left(\prod_{i=1}^n P_i \right) = \sum_{i=1}^n \ln P_i = \ln P_{\text{ТК тр}}. \quad (11)$$

Путем замены переменных в выражении (11) согласно выражению (10), равенство, записанное в (9), примет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^n (1 - P_i) \approx 1 - P_{\text{ТК тр}}. \quad (12)$$

Необходимо отметить, что погрешность, вызванная линеаризацией выражения (9), будет тем больше, чем меньше значения величин n и $P_{\text{ТК тр}}$. Так, при $n = 2$ и $P_{\text{ТК тр}} = 0,9$ погрешность будет составлять примерно 0,8 % от $(1 - P_{\text{ТК тр}})$ или 0,07 % от $P_{\text{ТК тр}}$ соответственно. При значениях $n = 2$ и $P_{\text{ТК тр}} = 0,8$ величина погрешности возрастет и будет примерно равна 4 % и 0,7 % от данных величин.

С учетом сделанных допущений, а также в соответствии с результатами анализа выражений (8) и (12) решаемая задача оптимизации может быть записана в виде

$$\begin{cases} C_{\text{ТК}} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{\text{СЧ ТК } i0}}{\Theta_i} \times \ln \frac{P_{i\infty} - P_{i0}}{P_{i\infty} - P_i} = \min; \\ \sum_{i=1}^n (1 - P_i) = 1 - P_{\text{ТК тр}}. \end{cases} \quad (13)$$

Анализируя выражение (13), заметим, что целевая функция будет выпуклой, а соответствующая функция ограничений будет линейной. Поскольку соответствующее ограничение задано в виде строгого равенства, данная задача может быть решена путем применения обобщенного метода неопределенных множителей Лагранжа.

В частности, для выражения (13) функция Лагранжа примет следующий вид:

$$L(P_i) = \sum_{i=1}^n \alpha \times \ln \frac{P_{i\infty} - P_{i0}}{P_{i\infty} - P_i} + \beta \times \left((1 - P_{\text{ТК тр}}) - \sum_{i=1}^n (1 - P_i) \right), \quad (14)$$

где α и β — соответствующие неопределенные множители Лагранжа.

В данном случае множитель α будет представлять собой относительную нормированную стоимость повышения ВБР i -го элемента ТК и может быть представлен выражением:

$$\alpha = \frac{C_{\text{СЧ ТК } i0}}{\Theta_i}. \quad (15)$$

Необходимые условия экстремума функции (14) могут быть записаны таким образом:

$$\begin{cases} \frac{dL}{dP_i} = 0 (i = 1, 2, 3, \dots, n); \\ \frac{dL}{d\beta} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Решения системы $(n + 1)$ -го уравнения выражения (16) будут являться искомыми оптимальными значениями ВБР i -х элементов ТК, при которых значение ВБР ТК в целом будет не ниже требуемого, а стоимость его создания или модернизации будет минимальной.

Запишем систему (16) в явном виде. В соответствии с выражением (14), она примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dL}{dP_i} = \frac{\alpha}{P_{i\infty} - P_i} + \beta (i = 1, 2, 3, \dots, n); \\ \frac{dL}{d\beta} = 1 - P_{\text{ТК тр}} - \sum_{i=1}^n (1 - P_i). \end{cases} \quad (17)$$

Таким образом, система (16) может быть представлена так:

$$\begin{cases} \frac{\alpha}{P_{i\infty} - \bar{P}_i} + \beta = 0 (i = 1, 2, 3, \dots, n); \\ 1 - P_{\text{ТК тр}} - \sum_{i=1}^n (1 - \bar{P}_i) = 0, \end{cases} \quad (18)$$

где $\bar{P}_i$ — оптимальное значение ВБР i -го элемента ТК.

Решая первое уравнение системы (18) относительно неизвестного $\bar{P}_i$, получим

$$\bar{P}_i = P_{i\infty} + \frac{\alpha}{\beta}. \quad (19)$$

Просуммируем левую и правую части полученного выражения (19) по i от 1 до n :

$$\sum_{i=1}^n \bar{P}_i = \sum_{i=1}^n P_{i\infty} + \frac{1}{\beta} \times \sum_{i=1}^n \alpha. \quad (20)$$

Преобразуем второе уравнение системы (18) так, чтобы его левая часть была равна левой части выражения (20):

$$\sum_{i=1}^n \bar{P}_i = n - (1 - P_{\text{ТК тр}}). \quad (21)$$

Как следствие, по причине равенства левых частей правые части выражений (20) и (21) также будут равны между собой:

$$\sum_{i=1}^n P_{i\infty} + \frac{1}{\beta} \times \sum_{i=1}^n \alpha = n - (1 - P_{\text{ТК тр}}). \quad (22)$$

Проведя элементарные преобразования выражения (22), получим

$$\beta = \frac{-\sum_{i=1}^n \alpha}{\left((1 - P_{\text{ТК тр}}) - \sum_{i=1}^n (1 - P_{i\infty}) \right)}. \quad (23)$$

Для окончательного определения искомых оптимальных значений ВБР i -х элементов ТК подставим полученное выражение (23) в (19):

$$\bar{P}_i = P_{i\infty} - \frac{\alpha}{\sum_{i=1}^n \alpha} \times \left((1 - P_{\text{ТК тр}}) - \sum_{i=1}^n (1 - P_{i\infty}) \right). \quad (24)$$

Для удобства дальнейшей записи введем следующие новые обозначения:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{\text{СЧ ТК } i0} &= \frac{\alpha}{\sum_{i=1}^n \alpha}; \\ P_{\text{ТК доп}} &= (1 - P_{\text{ТК тр}}); \\ P_{\text{ТК } \infty} &= \sum_{i=1}^n (1 - P_{i\infty}), \end{aligned} \quad (25)$$

где $\bar{C}_{\text{СЧ ТК } i0}$ — нормированное (отнесенное к общей сумме $\sum_{i=1}^n \alpha$) отношение удельной стоимости отработки i -го элемента ТК к показателю эффективности данной отработки; $P_{\text{ТК доп}}$ — значение допустимой вероятности отказа ТК; $P_{\text{ТК } \infty}$ — значение предельно малой вероятности отказа ТК, достижимой при его длительной опытной отработке ($n_i \rightarrow \infty$).

В итоге выражение (24) примет следующий вид:

$$\bar{P}_i = P_{i\infty} - \bar{C}_{\text{СЧ ТК } i0} \times (P_{\text{ТК доп}} - P_{\text{ТК } \infty}). \quad (26)$$

Анализируя полученное решение, заметим, что оптимальное значение ВБР i -го элемента ТК будет линейно зависеть от разности соответствующих значений допустимой и предельно малой вероятностей отказа ТК, а также при заданных значениях $P_{i\infty}$, $P_{\text{ТК доп}}$ и $P_{\text{ТК } \infty}$ соответственно будет определяться относительной нормированной стоимостью ее повышения при отработке данного элемента. Как следствие, может быть сделан вывод, что чем выше стоимость повышения ВБР i -го элемента ТК, тем ниже должно быть ее требуемое значение при соблюдении требований к ВБР ТК в целом.

Для случая, когда $P_{i\infty} = 1 (P_{\text{ТК } \infty} = 0)$, выражение (26) существенно упрощается, принимая вид

$$\bar{P}_i = 1 - \bar{C}_{\text{СЧ ТК } i0} \times P_{\text{ТК доп}}. \quad (27)$$

Необходимо отметить, что, используя зависимость, приведенную в выражении (5), а также с учетом соответствующего ей выражения (6), по оптимальному значению ВБР i -го элемента ТК космодрома может быть найдено оптимальное число необходимых опытных образцов данного элемента:

$$n_i = \frac{1}{\Theta_i} \times \ln \frac{P_{i\infty} - P_{i0}}{P_{i\infty} - \bar{P}_i}. \quad (28)$$

Таким образом, решена задача оптимизации требований к надежности элементов ТК космодромов. Несмотря на то что при решении данной задачи в качестве критерия оптимальности был принят минимум затрат на создание или модернизацию ТК, полученное решение будет также вполне справедливо при любом другом экономическом

критерии $C = \sum_{i=1}^n C_i$, связанном с ВБР соответствующих i -х элементов

ТК выражением типа:

$$C_i = a_{1i} \times \ln \left(\frac{a_{2i}}{(a_{3i} - P_i)} \right), \quad (29)$$

где a_{1i} , a_{2i} , a_{3i} — соответствующие постоянные коэффициенты i -го элемента ТК.

Следует отметить, что приведенное решение поставленной задачи оптимизации также может быть распространено на любой другой выходной показатель системы создания и последующей эксплуатации ТК космодронов, для которого будет справедливо следующее ограничение:

$$\sum_{i=1}^n (1 - y_i) = 1 - y_{\text{тр}}, \quad (30)$$

где y_i — соответствующий показатель i -го элемента ТК; $y_{\text{тр}}$ — требуемое значение соответствующего показателя i -го элемента ТК.

Пример практического применения приведенного решения поставленной задачи оптимизации. Проиллюстрируем решение рассмотренной выше задачи оптимизации на одном из возможных примеров.

Пусть известно, что при расчете надежности ТК космодрома можно представить соответствующей структурно-функциональной схемой, включающей в себя пять последовательно соединенных элементов, характеризующихся следующими основными параметрами: $P_{i\infty} = 0,990$; $\Xi_i = 0,1$; $C_{\text{СЧ ТК } 10} = 1,0$; $C_{\text{СЧ ТК } 20} = 1,5$; $C_{\text{СЧ ТК } 30} = 2,0$; $C_{\text{СЧ ТК } 40} = 2,5$ и $C_{\text{СЧ ТК } 50} = 3,0$ условных единиц. Требуется найти

такие оптимальные значения $\bar{P}_i$, при которых $\prod_{i=1}^n P_i = P_{\text{ТК тр}} = 0,90$.

В соответствии с выражением (25) и исходными данными вычислим значения допустимой и предельно малой вероятностей отказа ТК:

$$P_{\text{ТК доп}} = (1 - 0,90) = 0,10;$$

$$P_{\text{ТК } \infty} = \sum_{i=1}^5 (1 - 0,99) = 0,05.$$

А в соответствии с выражением (15) и исходными данными рассчитаем значения относительных нормированных стоимостей повышения ВБР этих элементов ТК:

$$\alpha_{10} = \frac{1,0}{0,1} = 10;$$

$$\alpha_{20} = \frac{1,5}{0,1} = 15;$$

$$\alpha_{30} = \frac{2,0}{0,1} = 20;$$

$$\alpha_{40} = \frac{2,5}{0,1} = 25;$$

$$\alpha_{50} = \frac{3,0}{0,1} = 30.$$

Тогда согласно (25), определим значения нормированных отношений удельных стоимостей обработок данных элементов ТК к показателям эффективности соответствующих обработок:

$$\bar{C}_{\text{СЧ ТК10}} = \frac{10}{(10 + 15 + 20 + 25 + 30)} = \frac{10}{100} = 0,10;$$

$$\bar{C}_{\text{СЧ ТК20}} = \frac{15}{100} = 0,15;$$

$$\bar{C}_{\text{СЧ ТК30}} = \frac{20}{100} = 0,20;$$

$$\bar{C}_{\text{СЧ ТК40}} = \frac{25}{100} = 0,25;$$

$$\bar{C}_{\text{СЧ ТК50}} = \frac{30}{100} = 0,30.$$

С учетом рассчитанных выше данных, а также согласно выражению (26), могут быть получены следующие оптимальные значения ВБР данных элементов ТК:

$$\bar{P}_1 = 0,99 - 0,10 \times (0,10 - 0,05) = 0,99 - 0,005 = 0,985;$$

$$\bar{P}_2 = 0,99 - 0,15 \times (0,10 - 0,05) = 0,99 - 0,0075 = 0,983;$$

$$\bar{P}_3 = 0,99 - 0,20 \times (0,10 - 0,05) = 0,99 - 0,01 = 0,980;$$

$$\bar{P}_4 = 0,99 - 0,25 \times (0,10 - 0,05) = 0,99 - 0,0125 = 0,978;$$

$$\bar{P}_5 = 0,99 - 0,30 \times (0,10 - 0,05) = 0,99 - 0,015 = 0,975.$$

Для наиболее наглядного представления полученных результатов, а также для повышения обоснованности управленческих и технических решений, принимаемых на всех стадиях проектирования, приведенное решение поставленной задачи оптимизации может быть также представлено в графической форме (рис. 2).

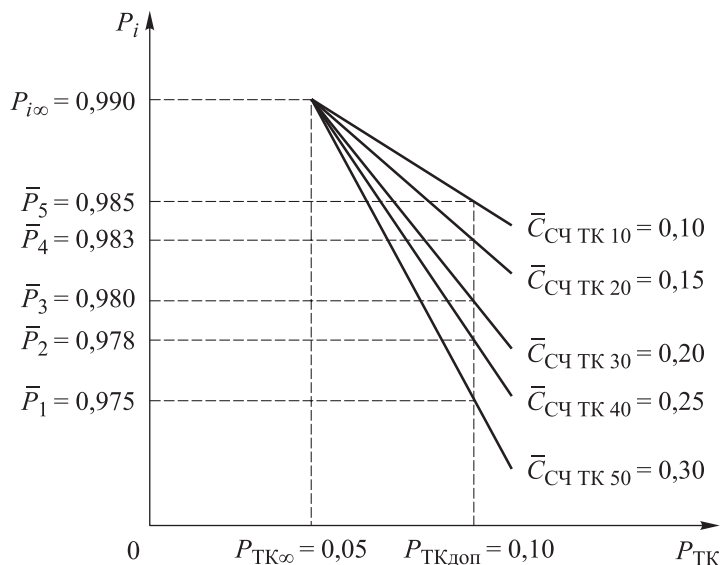


Рис. 2. Графическое представление полученных результатов возможной решаемой задачи оптимизации

Заключение. Сформулирована и решена задача оптимизации требований к надежности СЧ и основных элементов ТК космодромов. При ее решении в качестве критерия оптимальности был принят минимум затрат на создание или модернизацию ТК, включающий затраты на создание или модернизацию комплектов ТО и систем. Доказано, что оптимальное значение ВБР i -го элемента ТК будет линейно зависеть от разности соответствующих значений допустимой и предельно малой вероятностей отказа ТК, а также будет определяться относительной нормированной стоимостью ее повышения при отработке данного элемента. По итогам решения данной задачи было получено выражение для определения оптимального числа необходимых опытных образцов i -го элемента ТК космодрома по рассчитанному оптимальному значению ВБР данного элемента. На примере продемонстрировано практическое применение представленного решения рассмотренной задачи оптимизации. Данное решение указанной задачи может способствовать повышению эффективности создания и последующей эксплуатации ТК, а также развитию НКИ в целом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бармин И.В., ред. *Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники (инженерное пособие)*. В 3 кн. Кн. 1. Москва, Полиграфикс РПК, 2005, 416 с.
- [2] Бирюков Г.П., Смирнов В.И. *Элементы теории проектирования ракетно-космических комплексов*. Москва, Изд-во МАИ, 2003, 288 с.
- [3] Бирюков Г.П., Кобелев В.Н. *Основы построения ракетно-космических комплексов*. Москва, Изд-во МАИ, 2000, 293 с.

- [4] Александров А.А., Бармин И.В., Денисов О.Е., Чугунков В.В. Инновационные направления в развитии и эксплуатации наземной космической инфраструктуры технических комплексов космодромов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 5 (77), с. 1–14.
DOI: 10.18698/2308-6033-2018-5-1765
- [5] Матвеева О.П., Чугунков В.В., Семячков Д.А. Системное проектирование наземного технологического оборудования технических и стартовых ракетных комплексов. *Сборник научных трудов: Контроллинг в экономике, организации производства и управлении: шансы и риски цифровой экономики*. Москва, Объединение контролеров, 2019, с. 158–162.
- [6] Куренков В.И., Капитонов В.А. *Методы расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов*. Самара, Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2007, 320 с.
- [7] Дедков В.К., Татуев А.И. *Обеспечение надежности технических объектов по стадиям их жизненного цикла*. Москва, Машиностроение, 2010, 216 с.
- [8] Авдусевский В.С. ред. *Надежность и эффективность в технике: справочник*. В 10 т. Москва, Машиностроение, 1986, т. 1, 224 с.
- [9] Бармин И.В., Каджаев В.Л. Обеспечение приемлемого уровня надежности и безопасности стартового комплекса. *Космонавтика и ракетостроение*, 2012, № 3 (68), с. 135–143.
- [10] Волков Л.И. *Управление эксплуатацией летательных комплексов*. Москва, Высшая школа, 1987, 400 с.

Статья поступила в редакцию 11.01.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Синельщиков А.В., Драгун Д.К., Козьмин В.В. Постановка и решение задачи оптимизации требований к надежности составных частей и основных элементов технических комплексов космодромов для подготовки изделий ракетно-космической техники. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 6.
EDN MEROAQ

Синельщиков Артем Викторович — аспирант 3-го курса обучения кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 15 научных работ в области ракетно-космической техники. e-mail: Sinelshchikov.AV@mail.ru

Драгун Дмитрий Константинович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, главный специалист по производственно-экономическим вопросам ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, вице-президент (исполнительный директор) МОО «Российская академия космонавтики имени К.Э. Циолковского», лауреат Государственной премии РФ, премии Правительства РФ имени Ю.А. Гагарина в области космической деятельности; награжден орденами «За заслуги перед Отечеством» IV степени, «Трудового Красного Знамени» и орденом «Почета»; автор более 150 научных работ в области ракетно-космической техники. e-mail: DragunDK@mail.ru

Козьмин Владимир Владимирович — главный специалист по созданию технических комплексов космодромов АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», почетный член МОО «Российская академия космонавтики имени К.Э. Циолковского», заслуженный испытатель космической техники, награжден орденами «Почета» и «Дружбы», отмечен различными ведомственными наградами и грамотами; автор более 50 научных работ в области ракетно-космической техники. e-mail: V.Kozmin1950@yandex.ru

Setting and Solving the Problem of Optimizing Reliability Requirements for Component Parts and Basic Elements of Technical Complexes at Cosmodromes for Preparing Rocket and Space Technology Products

© A.V. Sinelschikov¹, D.K. Dragun^{1, 2}, V.V. Kozmin²

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

² Khrunichev State Research and Production Space Center JSC,
Moscow, 121309, Russian Federation

The issues of optimizing the reliability of technical complexes at cosmodromes are considered. In particular, the problem of optimizing reliability requirements for their component parts and basic elements is formulated and solved. In solving this problem, the minimum cost of creating/upgrading the technical complex was adopted as the optimality criterion. The optimal value of the probability of failure-free operation of the i-th element of the technical complex was shown to depend linearly on the difference between the corresponding values of the allowable and extremely low probabilities of failure of the complex and to be determined by the relative normalized cost of increasing this probability during the development of the given element. In particular, an expression was obtained for determining the optimal number of required prototypes of the i-th element of the cosmodrome technical complex based on the calculated optimal value of the probability of failure-free operation of this element. An example of the practical application of the proposed solution to the considered optimization problem is presented. The solution of this optimization problem may contribute to improving the efficiency of the creation and subsequent operation of technical complexes, as well as to the development of ground-based space infrastructure as a whole.

Keywords: rocket and space technology, cosmodrome, ground-based space infrastructure, technical complex, technological equipment, reliability, probability of failure-free operation, optimization

REFERENCES

- [1] Barmin I.V., ed. *Tekhnologicheskie ob"ekty nazemnoy infrastruktury raketno-kosmicheskoy tekhniki (inzhenernoe posobie)* [Technological Objects of Ground Infrastructure of Rocket and Space Technology (Engineering Manual)]. In 3 books. Book 1. Moscow, Poligrafiks RPK, 2005, 416 p.
- [2] Biryukov G.P., Smirnov V.I. *Elementy teorii proektirovaniya raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Elements of the Theory of Design of Rocket and Space Complexes]. Moscow, MAI Publ., 2003, 288 p.
- [3] Biryukov G.P., Kobelev V.N. *Osnovy postroeniya raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Fundamentals of Construction of Rocket and Space Complexes]. Moscow, MAI Publ., 2000, 293 p.
- [4] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Denisov O.E., Chugunkov V.V. Innovatsionnye napravleniya v razvitii i ekspluatatsii nazemnoy kosmicheskoy infrastruktury tekhnicheskikh kompleksov kosmodromov [Innovative directions in the development and operation of ground-based space infrastructure of cosmodrome technical complexes]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 5 (77), pp. 1–14.
DOI: 10.18698/2308-6033-2018-5-1765

- [5] Matveeva O.P., Chugunkov V.V., Semyachkov D.A. Sistemnoe proektirovanie nazemnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya tekhnicheskikh i startovykh raketnykh kompleksov [System design of ground technological equipment for technical and launch rocket complexes]. In: *Sbornik nauchnykh trudov: Kontrolling v ekonomike, organizatsii proizvodstva i upravlenii: shansy i riski tsifrovoy ekonomiki* [Proceedings: Controlling in Economics, Production Organization and Management: Opportunities and Risks of the Digital Economy]. Moscow, Ob"edinenie kontrolerov, 2019, pp. 158–162.
- [6] Kurenkov V.I., Kapitonov V.A. *Metody rascheta i obespecheniya nadezhnosti raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Methods of calculation and ensuring reliability of rocket and space complexes]. Samara, SSAU Publ., 2007, 320 p.
- [7] Dedkov V.K., Tatuev A.I. *Obespechenie nadezhnosti tekhnicheskikh ob"ektov po stadiyam ikh zhiznennogo tsikla* [Ensuring the Reliability of Technical Objects at the Stages of Their Life Cycle]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2010, 216 p.
- [8] Avduevskiy V.S., ed. *Nadezhnost i effektivnost v tekhnike: spravochnik* [Reliability and Efficiency in Engineering: Handbook]. In 10 vols. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1986, vol. 1, 224 p.
- [9] Barmin I.V., Kadzhaev V.L. Obespechenie priemlegomogo urovnya nadezhnosti i bezopasnosti startovogo kompleksa [Ensuring an acceptable level of reliability and safety of the launch complex]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye — Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2012, no. 3 (68), pp. 135–143.
- [10] Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiyey letatelnykh kompleksov* [Operation Management of Flight Systems]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1987, 400 p.

Sinelschikov A.V., 3rd-year postgraduate student of the Department of Launch Rocket Complexes, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 15 scientific publications in the field of rocket and space technology.
e-mail: Sinelschikov.AV@mail.ru

Dragun D.K., Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Launch Rocket Complexes, Bauman Moscow State Technical University, Chief Specialist in Production and Economic Issues, Khrunichev State Research and Production Space Center, Vice President (Executive Director) of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky; laureate of the State Prize of the Russian Federation, and of Yuri Gagarin Government Prize in the field of space activities; awarded the Order of Merit for the Fatherland" (IV class), the Order of the Red Banner of Labour, and the Order of Honour; author of more than 150 scientific publications in the field of rocket and space technology. e-mail: DragunDK@mail.ru

Kozmin V.V., Chief Specialist in the Development of Cosmodrome Technical Complexes, Khrunichev State Research and Production Space Center JSC, Honorary Member of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky; Honoured Tester of Space Technology; awarded the Order of Honour and the Order of Friendship, awarded various departmental awards and certificates of merit; author of more than 50 scientific publications in the field of rocket and space technology.
e-mail: V.Kozmin1950@yandex.ru