

УДК 62-192: 519.248 + 629.7.017.1

© Сухорученков Б. И., О कोरोков М. В.
Sukhoruchenkov B., Okorokov M.**СПОСОБ ПЛАНИРОВАНИЯ ОБЪЕМОВ ИСПЫТАНИЙ НА БЕЗОТКАЗНОСТЬ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОДНОРАЗОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ****METHOD OF PLANNING OF VOLUMES OF TESTS ON FAULTLESSNESS MILITARY-
TECHNICAL SYSTEMS OF NON-PERMANENT APPLICATION**

Аннотация. Предлагается способ определения рационального числа автономных и комплексных испытаний военно-технических систем одноразового применения на безотказность с учетом различных факторов, в том числе численности создаваемой группировки, временных и технико-экономических затрат на испытания. Способ базируется на методах векторной оптимизации и позволяет обосновать значительное снижение рационального числа испытаний.

Annotation. The method of determination of rational number of autonomous and complex tests of the military-technical systems of non-permanent application is offered on faultlessness taking into account different factors, including quantity of the created groupment, temporal and techno-economic expenses on tests. A method is based on the methods of vectorial optimization and allows to ground the considerable decline of rational number of tests.

Ключевые слова. Техническая система, безотказность, автономные и комплексные испытания, число испытаний, метод векторной оптимизации.

Key words. Technical system, faultlessness, autonomous and complex tests, number of tests, method of vectorial optimization.

1. Постановка задачи

Рассматриваются военно-технические системы (ВТС) одноразового применения типа баллистических ракет и ракет-носителей. ВТС состоит из J основных подсистем, которые могут функционировать последовательно друг за другом. Одним из основных свойств ВТС является безотказность, которая характеризуется вероятностью безотказной работы (ВБР) в течение периода целевого применения. ВБР ВТС P зависит от ВБР j -х подсистем P_j , $j = 1, \dots, J$. Предполагается, что ВТС не имеет резервирования, так что ее ВБР связана с ВБР подсистем зависимостью

$$P = \prod_{j=1}^J P_j. \quad (1)$$

К ВТС предъявляются требования по ВБР $P_{TP} \geq 0,95$, которые обеспечиваются соответствующими показателями безотказности подсистем. Требования к ВБР подсистем определяются на основе методов нормирования надежности с учетом технико-экономических и временных затрат для обеспечения и подтверждения безотказности подсистем. В первом приближении требования к

ВБР подсистем определяются с учетом зависимости (1)

$$P_{jTP} = \sqrt[j]{P_{TP}}, \quad j = 1, \dots, J. \quad (2)$$

В соответствии с (2) требования к ВБР основных подсистем при $J \approx 10$ имеют уровень $P_{jTP} \geq 0,995$.

Для достижения высоких технических характеристик, в том числе показателей безотказности ВТС и их подсистем, для подтверждения соответствия их требованиям производится экспериментальная отработка в виде цикла автономных испытаний (АИ) подсистем и комплексных испытаний (КИ) ВТС (летных испытаний ракет и ракет-носителей). По результатам испытаний на безотказность оценивается ВБР подсистем и ВТС статистическими методами. На основе сравнения получаемых оценок с требуемыми значениями обосновывается решение о переходе от АИ к КИ или о принятии ВТС на вооружение. Однако для достоверного контроля соответствия ВБР ВТС и их подсистем требованиям необходим большой объем испытаний на безотказность, осуществить который практически не удастся. Поэтому возникает задача обоснования способов планирования рациональных

Сухорученков Борис Иванович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской инженерной академии, профессор кафедры баллистических ракет, Военная академия РВСН имени Петра Великого, тел. (495) 696-06-48;
О कोरोков Максим Владимирович – адъюнкт, кафедра баллистических ракет, Военная академия РВСН имени Петра Великого.

Sukhoruchenkov Boris – doctor of engineering sciences, professor, corresponding member of the Russian engineering academy, professor of department of ballistic rockets, the Military academy of RVSN of the name of Peter Great, tel. (495) 696-06-48;
Okorokov Maxim – adjunct, department of ballistic rockets, the Military academy of RVSN of the name of Peter Great.

объемов АИ и КИ ВТС в условиях технико-экономических ограничений, решение которой излагается далее.

2. Выбор статистического метода оценивания ВБР ВТС по результатам испытаний

Объем испытаний, необходимый для подтверждения требуемой ВБР ВТС, зависит от метода оценивания ВБР по экспериментальным данным. Получение оценок ВБР осложняется тем, что при АИ и КИ производится выявление и устранение различного рода дефектов, в результате чего ВБР подсистем и ВТС в процессе испытаний изменяется (обычно повышается). Анализ показал [1], что наибольшая точность оценивания переменной ВБР по результатам испытаний достигается при использовании модели динамики ВБР с учетом выявляемых и устраняемых дефектов и статистического метода несмещенных оценок (МНО). Практика испытаний ВТС свидетельствует, что наиболее трудно выявляются дефекты, которые имеют случайную природу проявления при испытаниях. Поэтому после ограниченного числа испытаний некоторые дефекты могут остаться не выявленными и снизить ВБР ВТС. Если проведено na_j АИ каждой подсистемы, среднее число которых равно na , и число nk КИ ВТС, то в соответствии с моделью динамики ВБР с учетом дефектов точечные оценки достигнутой ВБР j -х подсистем и ВТС практически не зависят от числа выявляемых дефектов и проводимых доработок для их устранения и определяются по МНО по зависимостям [2, 5]

$$\bar{P}_j = \frac{na_j + 1 - ma_j}{na_j + 2} \cdot \left(\frac{na_j + 1}{na_j + 2} \right)^{Ra_j}, \quad j = 1, \dots, J; \quad (3)$$

$$\bar{P} = \frac{nk + 1 - mk}{nk + 2} \cdot \left(\frac{na + nk + 1}{na + nk + 2} \right)^{Rk}, \quad (4)$$

где ma_j, mk – число случайных отказов j -х подсистем при АИ и ВТС при КИ; при этом не учитываются отказы из-за дефектов, которые выявляются и устраняются при доработках;

Ra_j, Rk – ожидаемое число дефектов, не выявленных при АИ j -х подсистем и при КИ ВТС.

Если нет гарантии, что все дефекты выявлены и устранены, то ожидаемое число дефектов любой технической системы (ТС), не выявленных после n испытаний, определяется по зависимости [2, 5]

$$R_i(n) = \left[\sum_{r=0}^{R_{max}} \left(\frac{n+1}{n+2} \right)^{n \cdot r} \right]^{-1} \sum_{r=0}^{R_{max}} r \cdot \left(\frac{n+1}{n+2} \right)^{n \cdot r}. \quad (5)$$

При $n \geq 10$ испытаний число возможных не выявленных дефектов практически не превышает $R_{max}=5$ [2, 5], а ожидаемое число дефектов ТС $R_i \in [0,6; 0,7]$.

Если подсистемы ВТС функционируют последовательно друг за другом, то в зависимости (4) вместо чис-

ла комплексных испытаний используется эквивалентное число испытаний [4].

3. Определение объема испытаний для подтверждения требований к ВБР ВТС и их подсистем

При существующем подходе планируемое число испытаний ВТС на безотказность определяется без учета возможных дефектов, не выявленных при испытаниях. При этом необходимое число АИ подсистем и КИ ВТС определяется из условий $\bar{P}_j \geq P_{jTP}$ и $\bar{P} \geq P_{TP}$, которые с учетом (3) и (4) при $Ra_j = Rk = 0$ записываются в виде

$$\frac{na_j + 1 - ma_j}{na_j + 2} \geq P_{jTP}, \quad j = 1, \dots, J; \quad (6)$$

$$\frac{nk + 1 - mk}{nk + 2} \geq P_{TP}. \quad (7)$$

Из соотношений (6) и (7) получаются следующие зависимости для числа необходимых АИ и КИ:

$$na_{jTP} \geq \frac{2P_{jTP} - 1 + ma_j}{1 - P_{jTP}}, \quad j = 1, \dots, J; \quad (8)$$

$$nk_{TP} \geq \frac{2P_{TP} - 1 + mk}{1 - P_{TP}}. \quad (9)$$

Число испытаний зависит от числа случайных отказов. При планировании можно только прогнозировать возможное число случайных отказов. При оптимистичных планах испытаний предполагается, что все испытания будут безотказными. Более реальные планы соответствуют числу случайных отказов $m \geq 1$. Вероятности числа случайных отказов m при n испытаниях ТС зависят от числа испытаний, от ВБР ТС P и определяются по биномиальному распределению

$$Вер(m) = C_n^m P^{n-m} (1-P)^m, \quad m = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

где C_n^m – число сочетаний из n по m .

Так как ВБР ВТС при испытаниях неизвестна, то обычно вероятности (10) определяются при предположении, что ВБР соответствует требуемой ($P = P_{TP}$).

Планирование числа испытаний на безотказность производится на основе (8) и (9) с учетом вероятностей (10) с привлечением ЛПР (лица, принимающего решение).

Пример. ВТС одноразового использования состоит из $J=10$ основных подсистем. К ВБР ВТС предъявляется требование $P_{TP} = 0,96$. Для обеспечения этой ВБР в соответствии с соотношением (2) предъявляются требования к ВБР подсистем $P_{jTP} = 0,996$. Согласно (8) и (9) для подтверждения требуемой ВБР необходимо:

- число КИ ВТС $nk=23$ при $mk=0$ и $nk=48$ при $mk=1$;
- число АИ каждой подсистемы одноразового применения: $na=248$ при $ma=0$ и $na=498$ при $ma=1$.

При числе возможных случайных отказов более одного необходимое число испытаний получается еще выше. Рассмотренный пример показывает, что в соответствии с существующим подходом к планированию объема испытаний ВТС на безотказность требуется значительный объем испытаний, которые практически не удастся провести при ограниченных ресурсах. При этом необходимый объем испытаний ВТС одноразового применения часто получается соизмерим с численностью создаваемой группировки ВТС или даже превышает ее. При создании баллистических ракет и ракет-носителей ограничиваются значительно меньшим числом комплексных (летных) и особенно автономных испытаний. Остается только предполагать, как при этом удастся достичь компромисса между заказчиком и изготовителем при принятии ВТС на вооружение. Из изложенного очевидна нерациональность определения объема испытаний для подтверждения требований к ВБР ВТС и их подсистем. При планировании рационального числа испытаний необходимо учитывать технико-экономические ограничения на проведение АИ и КИ и численность создаваемой совокупности ВТС. Такой способ излагается далее.

4. Условия планирования объемов автономных и комплексных испытаний ВТС

Планирование объемов АИ и КИ ВТС будем проводить при следующих условиях и допущениях. Отработка ВТС проводится для создания группировки в составе $N_{гр}$ ВТС. Для этого планируется выделить ограниченные средства. Чтобы не рассматривать затраты в денежном выражении, введем в качестве единицы затрат суммарные расходы C_i на производство одного экземпляра ВТС. Поэтому будем полагать, что на выделяемые средства можно изготовить N_ϕ комплектов подсистем ВТС или N_ϕ экземпляров ВТС. В состав последних включаются также na комплектов подсистем для АИ, nk ВТС для КИ и nc ВТС для контрольных испытаний от серийных партий при производстве ВТС для создания группировки. Число контрольных испытаний N_c зависит от объема серийной партии Q_n и числа образцов nc ВТС, испытываемых от каждой серийной партии. Поэтому величина N_ϕ связана с численностью группировки зависимостью

$$N_\phi = N_{гр} + na + nk + nc \cdot \left[\frac{N_{гр}}{Q_n - nc} \right]_{цч}, \quad (11)$$

где $цч$ – оператор определения ближайшего целого числа справа.

В дальнейшем предполагается, что величина N_ϕ задана в пределах возможных (планируемых) затрат.

Подсистемы ВТС могут функционировать последовательно друг за другом, при этом система управления работает непрерывно. В состав ВТС типа баллистических ракет и ракет-носителей входят различные подсистемы разных уровней иерархии. Будем рассматривать только базовые подсистемы, число которых ограничено (для баллистических ракет и ракет-носителей число таких подсистем равно примерно 10). Разобьем подсистемы на две группы с учетом их особенностей и возможностей проведения АИ. Выделим главные (основные) подсистемы (ГПС) однократного применения, определяющие технический облик ВТС и обеспечивающие подсистемы (ОПС) для функционирования ГПС. Основные технико-экономические затраты на АИ ВТС обусловлены испытаниями ГПС. Для АИ ОПС требуется на порядок меньше расходов. Кроме того, АИ некоторых ОПС можно проводить многократно после их восстановления в случае отказа. Поэтому объем АИ ОПС без существенного увеличения затрат может быть выше по сравнению с АИ ГПС. Далее будем читать, что ВТС имеет в составе J_1 ГПС и J_2 ОПС. При этом объем АИ лимитируется основными подсистемами. Если среднее число АИ ГПС равно na , то для ОПС при тех же затратах можно провести эквивалентное число АИ в объеме $(1 + \delta)na$ испытаний, $\delta > 0$.

При проведении АИ каждой подсистемы объем испытаний может варьироваться в некоторых пределах в зависимости от особенностей подсистемы, требований к ВБР, квалификации производителя и имеющейся экспериментальной базы, а также от выделяемых средств. В период планирования объемов АИ невозможно учесть каждую подсистему. Поэтому при планировании АИ будем рассматривать только осредненное число na АИ ГПС как ориентир для уточненного планирования объемов АИ каждой подсистемы.

5. Показатели эффективности системы испытаний ВТС

Эффективность системы отработки ВТС, включающей автономные и комплексные испытания, характеризуется различными показателями, основными из которых являются показатели боевой эффективности создаваемой группировки ВТС и затраты на ее создание. Рассмотрим такие показатели.

5.1. Ожидаемое число дефектов подсистем R , не выявленных после АИ

Такие дефекты могут проявиться при КИ ВТС и привести к отказам ВТС, авариям или даже к катастрофам. Поэтому при АИ необходимо выявить все возможные дефекты подсистем.

Возможное число дефектов каждой подсистемы ВТС $Ra(na)$, не выявленных после na автономных испытаний, определяется по зависимости (5) при $n=na$ для ГПС и при $n=(1+\delta)na$ для ОПС. Суммарное ожидаемое число возможных оставшихся дефектов равно

$$R(na) = J_1 \cdot R_1(na) + J_2 \cdot R_1[na \cdot (1 + \delta)]. \quad (12)$$

5.2. Оценка ВБР ВТС P_0 после АИ

ВБР ВТС перед КИ влияет на число отказов ВТС при КИ, на сроки и затраты на отработку и испытания ВТС. Поэтому начальная ВБР ВТС перед КИ должна быть как можно выше.

Оценка начальной ВБР ВТС P_0 зависит от оценок ВБР ГПС и ОПС, полученных после АИ, и определяется с учетом (3) и (1) по зависимости

$$\bar{P}_0(na) = \left[\frac{(na + 1 - ma_2)}{(na + 2)} \cdot \left(\frac{na + 1}{na + 2} \right)^{Ra_2} \right]^{J_1} \times \left[\frac{\{na \cdot (1 + \delta) + 1 - ma_0\}}{\{na \cdot (1 + \delta) + 2\}} \cdot \left(\frac{na \cdot (1 + \delta) + 1}{na \cdot (1 + \delta) + 2} \right)^{Ra_0} \right]^{J_2}, \quad (13)$$

где Ra_2, Ra_0 – ожидаемое число дефектов каждой подсистемы ГПС и ОПС, не выявленных при АИ; определяется по зависимости (5) при $n=na$ для ГПС и $n=(1+\delta)na$ для ОПС;

ma_2, ma_0 – ожидаемое число случайных отказов (без учета отказов из-за дефектов) каждой ГПС и ОПС соответственно, зависящее от ВБР подсистемы и числа АИ; определяются по зависимостям

$$ma_2 = na \cdot (1 - P_j); \quad ma_0 = na \cdot (1 + \delta) \cdot (1 - P_j). \quad (14)$$

ВБР подсистем при планировании испытаний не известно, поэтому в зависимостях (14) ВБР принимается равной требуемой ВБР P_{jTP}

5.3. Ожидаемое число аварий ВТС $n_{ав}$ при КИ

Аварии ВТС при КИ приводят к дополнительным затратам на ликвидацию негативных последствий, к возрастанию сроков отработки ВТС, к снижению эквивалентных испытаний, по которым оценивается ВБР ВТС. Ожидаемое число аварий зависит от возможного числа дефектов (12), оставшихся после АИ, за исключением дефектов ВТС, не выявленных при КИ, а также от числа mk возможных случайных отказов ВТС

$$n_{ав}(na, nk) = R(na) - R_1(na, nk) + mk, \quad (15)$$

где $R_1(na, nk)$ – число дефектов ВТС, не выявленных при АИ и КИ; определяется по зависимости (5) при $n=na+nk$.

Ожидаемое число случайных отказов ВТС зависит от ВБР ВТС P и числа КИ

$$mk = nk \cdot (1 - P). \quad (16)$$

ВБР ВТС при планировании испытаний не известно, поэтому в зависимости (16) принимается равной требуемой ВБР: $P = P_{TP}$

5.4. Оценка ВБР ВТС P_K , достигаемой после mk КИ

ВБР РК является одним из основных показателей эффективности целевого применения ВТС. Поэтому одной из первостепенных задач системы АИ и КИ ВТС является повышение ВБР вплоть до требуемого значения. Подтверждение высокой ВБР ВТС производится на основе оценки ВБР по результатам КИ, которая определяется по зависимости (4) с учетом (5) при эквивалентном числе КИ $n_{экр}$:

$$\bar{P}_K(na, nk) = \frac{n_{экр} + 1 - mk}{n_{экр} + 2} \left(\frac{na + nk + 1}{na + nk + 2} \right)^{R_{вТС}}, \quad (17)$$

где $R_{вТС}$ – ожидаемое число не выявленных дефектов ВТС определяется по зависимости (5) при $n=na+nk$.

Эквивалентное число КИ ВТС, подсистемы которой работают последовательно друг за другом, определяется с учетом числа испытаний, при которых включались j -е подсистемы [4]. При планировании эквивалентное число испытаний можно определить в зависимости от числа КИ за исключением числа аварийных испытаний

$$n_{экр} = nk - u \cdot n_{ав}. \quad (18)$$

Если при КИ ВТС, у которой подсистемы работают последовательно друг за другом, отказывает первая подсистема ($j=1$), так что остальные подсистемы не успевают включиться, то в зависимости (18) доля $u \rightarrow 1$. Если отказывает последняя подсистема ($j=J$), так что до этого остальные подсистемы проработали нормально, то $u \rightarrow 0$. Поэтому при планировании в зависимости (18) можно использовать среднее (ожидаемое) значение $u=0,5$. При этом корректность зависимости (18) обеспечивается при $nk > 1 + 0,5n_{ав}$.

5.5. Показатель W эффективности целевого применения группировки ВТС

Основная задача создания группировки ВТС – обеспечение максимальной эффективности при ограниченных технико-экономических затратах. Эффективность группировки зависит от вероятности решения целевой задачи (ЦЗ) каждой ВТС. Показатель эффективности каждой ВТС W_1 зависит от ВБР ВТС P и от степени решения ЦЗ $W_{ЦЗ}$ при $P=1$

$$W_1 = P \cdot W_{ЦЗ}. \quad (19)$$

Допустим, что показатель эффективности группировки $W_{ГР}$ аддитивно зависит от показателей эффективности каждой ВТС. В этом случае эффективность группировки, достигаемой после КИ, можно определить по зависимости

$$W_{ГР} = P_K \cdot W_{ЦЗ} \cdot N_{ГР}, \quad (20)$$

где $N_{ГР}$ – состав группировки, определяемый на основе соотношения (11) в зависимости от объемов АИ, КИ и контрольных испытаний ВТС от серийных партий при вы-

деленных средствах (при фиксированном значении N_Φ)

$$N_{ГР} = \left[(N_\Phi - na - nk) \cdot \frac{Q_{II} - nc}{Q_{II}} \right]_{цч}, \quad (21)$$

где цч – оператор выделения целого числа.

Показатель $W_{ЦЗ}$ является сложной функцией от многих технических характеристик ВТС. Для решения задачи планирования объема испытаний ВТС на безотказность допустим, что такие характеристики доводятся до требуемых значений в процессе АИ и КИ ВТС независимо от показателей безотказности. Кроме того, в период планирования испытаний ВБР ВТС не известна, поэтому в качестве ВБР будем учитывать ее оценку, зависящую от объема испытаний. С учетом изложенного будем использовать нормированное значение показателя эффективности группировки при оценке ВБР ВТС (17) с учетом (21) в функции от числа АИ и КИ:

$$W(na, nk) = W_{ГР} / W_{ЦЗ} = \bar{P}_K(na, nk) \cdot N_{ГР}(na, nk). \quad (22)$$

5.6. Затраты C на автономные и комплексные испытания ВТС

Затраты на испытания ВТС составляют заметную долю общих расходов на создание группировки ВТС. Эти затраты зависят от стоимости производства образцов подсистем для АИ и ВТС для КИ, от расходов на подготовку и проведение АИ основных и обеспечивающих подсистем и КИ ВТС с учетом возможных аварий при КИ. Затраты на производство одного комплекта основных подсистем по отношению к общей стоимости всех подсистем ВТС C_1 обозначим в виде $C_{ПТС} = g \cdot C_1$, а расходы на изготовление комплекта обеспечивающих подсистем – в виде $C_{ОПС} = (1 - g) \cdot C_1$. С учетом этого общие затраты на испытания ВТС составляют

$$C_{ИСП} = [na \cdot C_1 \cdot g + na \cdot (1 + \delta) \cdot C_1 \cdot (1 - g)] \cdot (1 + q_a) + nk \cdot C_1 \cdot (1 + q_k) + n_{ав} \cdot C_1 \cdot q_{ав}, \quad (23)$$

где $q_a, q_k, q_{ав}$ – доли затрат по отношению к C_1 на подготовку и проведение АИ и КИ и затрат на устранение последствий аварий при КИ соответственно.

При планировании объемов испытаний будем учитывать нормированные (относительно C_1) затраты на испытания в зависимости от числа АИ и КИ

$$C(na, nk) = C_{ИСП} / C_1 = [na \cdot g + na \cdot (1 + \delta) \cdot (1 - g)] \cdot (1 + q_a) + nk \cdot (1 + q_k) + n_{ав} \cdot q_{ав}. \quad (24)$$

5.7. Период T проведения испытаний ВТС

Период отработки и испытаний ВТС влияет на оперативность принятия на вооружение и создание группировки ВТС. Сроки испытаний ВТС зависят от числа испытаний, от сроков подготовки, проведения и анализа результатов каждого испытания а также от дополнитель-

ных потерь времени на устранение последствий возможных аварий. Обозначим средний период между КИ ВТС в виде T_1 . Тогда ожидаемый период испытаний ВТС в зависимости от числа АИ и КИ определяется по формуле

$$T(na, nk) = na \cdot T_1 \cdot b_a + nk \cdot T_1 + n_{ав} \cdot T_1 \cdot b_{ав}, \quad (25)$$

где $b_a, b_{ав}$ – множители, учитывающие средние сроки между АИ основных подсистем и осредненные сроки устранения последствий возможных аварий ВТС по сравнению с периодом T_1 ; множитель $b_a < 1$; множитель $b_{ав}$ может варьироваться в широких пределах от 0 до нескольких единиц. Однако осредненное значение множителя можно ограничить пределами $b_{ав} \in [0; 1]$.

При выборе плановых объемов АИ и КИ ВТС необходимо обеспечить максимальные значения показателей P_0, P_K, W и минимальные значения показателей $R, n_{ав}, C$ и T . Эти требования противоречивы, поэтому для выбора объемов испытаний необходимо использовать методы векторной оптимизации. Заметим, что такие показатели эффективности системы испытаний ВТС, как P_K и W, R и $n_{ав}$, взаимно коррелированы. Поэтому при выборе объемов испытаний ВТС можно сократить число показателей и (или) учесть это при назначении степени важности каждого показателя.

6. Способы выбора объемов планируемых автономных и комплексных испытаний ВТС на безотказность

Планирование объемов испытаний ВТС на безотказность по показателям, приведенным в п.5, осуществляется на основе методов векторной (многокритериальной) оптимизации [3]. Для компактного представления этих методов пронумеруем показатели и обозначим их в виде $\Pi_1 = P_0, \Pi_2 = P_K, \Pi_3 = W, \Pi_4 = C, \Pi_5 = T, \Pi_6 = R, \Pi_7 = n_{ав}$. Представим показатели эффективности в нормированной форме в диапазоне возможных вариаций показателей $[\Pi_{i\min}; \Pi_{i\max}]$. Нормированные значения показателей приведем к единой шкале полезности, чтобы лучшему варианту испытаний ВТС соответствовало большее значение нормированных показателей:

- для показателей P_0, P_K, W

$$\Pi_{iH} = \frac{\Pi_i - \Pi_{i\min}}{\Pi_{i\max} - \Pi_{i\min}}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (26)$$

- для показателей C, T, R и $n_{ав}$

$$\Pi_{iH} = \frac{\Pi_{i\max} - \Pi_i}{\Pi_{i\max} - \Pi_{i\min}}, \quad i = 4, \dots, 7. \quad (27)$$

Показатели эффективности, изложенные в п. 5, зависят от числа АИ и КИ ВТС. Рациональные объемы испытаний можно определить различными методами. Рассмотрим основные из них, которые более других подходят для решения поставленной задачи.

6.1. Метод «Эффективность-затраты-сроки»

Метод учитывает только три основных показателя. Рациональные значения числа АИ и КИ ВТС определяются по критерию

$$S_1(na, nk) = \frac{W(na, nk)}{C(na, nk) \cdot T(na, nk)} = \max. \quad (28)$$

6.2. Метод обобщенного показателя

Метод позволяет учесть все показатели, изложенные в п. 5, с учетом их важности. Для этого назначаются коэффициенты важности каждого i -го показателя $\gamma_i \in [0; 1]$, удовлетворяющие равенству $\sum \gamma_i = 1$. Объемы АИ и КИ определяются по критерию

$$S_2(na, nk) = \sum_{i=1}^7 \Pi_{ин}(na, nk) \cdot \gamma_i = \max. \quad (29)$$

6.3. Метод «идеальной точки»

Метод учитывает все показатели качества системы испытаний ВТС с учетом близости их к наилучшим значениям. Степень близости характеризуется взвешенными расстояниями нормированных показателей от их идеальных (максимальных или минимальных) значений, которые в соответствии с (26) и (27) равны 1. В соответствии с методом объемы испытаний ВТС определяются по критерию

$$S_3(na, nk) = \sum_{i=1}^7 [\Pi_{ин}(na, nk) - 1]^2 \cdot \gamma_i = \min. \quad (30)$$

Метод определения объемов испытаний ВТС выбирается с привлечением ЛПР (лица, принимающего решение). Рациональные объемы АИ и КИ определяются на основе (28)-(30) численными способами. При этом показатели эффективности представляются в виде функций от na и nk на основе зависимостей, приведенных в п. 5. Заметим, что кроме изложенных могут использоваться и другие методы оптимизации [3]. Если при этом получаются разные значения объемов АИ и КИ, то рациональный вариант выбирает ЛПР. При окончательном выборе объемов АИ и КИ учитывается также необходимость подтверждения других технических характеристик ВТС предъявляемым требованиям.

7. Демонстрация способа планирования объемов испытаний ВТС на безотказность

7.1. Условия и исходные данные для планирования объемов испытаний

Для проверки работоспособности и возможностей изложенных в п. 6 методов с учетом показателей эффективности, приведенных в п. 5, рассмотрим планирование объемов АИ и КИ ВТС типа баллистической ракеты, которая состоит из $J=10$ подсистем, в числе которых $J_1=5$ основных подсистем и $J_2=5$ обеспечивающих подси-

стем. К ВБР ВТС предъявляется требование $P_{TP} \geq 0,96$. Планируется создать группировку из $N_{TP} = 100$ ВТС. Для этого предполагается выделить средства, на которые можно произвести $N_\phi = 130$ комплектов подсистем ВТС или ВТС в сборе.

Планируется отработка всех технических характеристик ВТС, в том числе показателей безотказности на основе циклов автономных и комплексных (летных) испытаний. Необходимо определить рациональные объемы АИ и КИ ВТС.

Для планирования объемов испытаний на безотказность примем следующие значения параметров, от которых зависят показатели эффективности, изложенные в п. 5:

- доли затрат в зависимостях (23) и (24) $q_a=0,1$;
- $q_k=0,4$; $q_{ав}=0,4$;
- относительная стоимость ГПС в зависимостях (23) и (24) $g=0,8$;
- степень повышения эквивалентного числа АИ для ОПС в зависимостях (12)–(14), (23), (24) $\delta=1$;
- объем серийной партии $Q_{II}=10$; число образцов для контрольных испытаний от партии $nc=1$;
- период между комплексными испытаниями ВТС $T_I=1$; осредненный относительный период между автономными испытаниями ГПС $b_a=0,2$; ожидаемый период устранения последствий аварийного испытания по отношению к T_I равен $b_{ав}=2$;
- минимальное число АИ и КИ $na_{\min}=nk_{\min}=4$;
- максимальное число АИ и КИ $na_{\max}=nk_{\max}=30$;
- минимальное значение показателей $R_{\min}=n_{ab\min}=0$;
- максимальные значения показателей R_{\max} и $n_{ab\max}$ определяются при na_{\min} ;
- минимальные значения показателей P_0, P_k, W, C и T определяются при na_{\min} и nk_{\min} ;
- максимальные значения показателей $P_{0\max}=P_{k\max}=P_{TP}$;
- $W_{\max}=N_\phi \cdot P_{TP}$;
- максимальные значения показателей C и T определяются при na_{\max} и nk_{\max} ;
- коэффициенты важности показателей с номерами, как в (26), (27): $\{\gamma_i\} = \{0,1; 0,1; 0,3; 0,2; 0,1; 0,1; 0,1\}$.

7.2. Зависимости показателей эффективности системы испытаний ВТС от числа автономных и комплексных испытаний

Зависимости показателей, описанных в п. 5, от числа автономных и комплексных испытаний показаны на рис. 1. Для наглядности некоторые показатели приведены в уменьшенном масштабе. Из рис. 1 видно, что при изменении числа испытаний все показатели меняются.

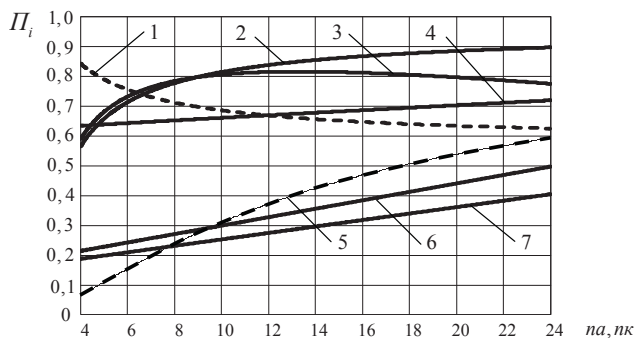


Рис. 1. Зависимости показателей P_k , W , $n_{ав}$, C и T от числа комплексных испытаний при $na = 10$ и показателей R и P_0 от числа автономных испытаний (в измененных масштабах):
 1 – $0,1R(na)$; 2 – $P_k(nk)$; 3 – $0,01W(nk)$; 4 – $0,1n_{ав}$; 5 – $P_0(na)$;
 6 – $0,01C(nk)$; 7 – $0,01T(nk)$

7.3. Определение рациональных объемов автономных и комплексных испытаний ВТС

Определение объемов испытаний ВТС на основе методов, изложенных в п.6, проводилось в системе вычислений MathCAD.

А. Планирование объемов испытаний по методу «Эффективность-затраты-сроки». Карта уровней показателя (28) в зависимости от числа АИ и КИ показана на рис. 2. Видно, что максимум показателя достигается при $na=5$, $nk=5$. Зависимости показателя (28) от числа АИ и КИ показаны на рис. 3.

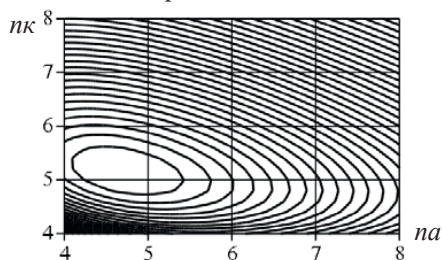


Рис. 2. Карта уровней показателя S_1

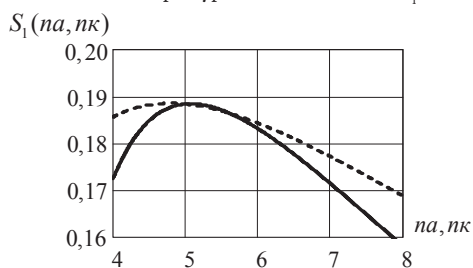


Рис. 3. Зависимости показателя S_1 :
 от na при $nk=5$ (пунктирная); от nk при $na=5$ (сплошная)

Заметим, что показатель (28) учитывает не все показатели эффективности системы испытаний ВТС. При этом по критерию (28) получаются сильно заниженные объемы АИ и КИ.

Б. Планирование объемов испытаний по методу обобщенного показателя. Карта уровней показателя (29) показана на рис. 4. Видно, что максимум показателя достигается при $na=11$, $nk=9$. Зависимости показателя (29)

от числа АИ и КИ показаны на рис. 5. Из рис. 5 следует, что имеется область максимальных значений, в которой показатель S_2 изменяется незначительно. Поэтому в качестве рациональных объемов испытаний можно принять значения на левой границе области максимальных значений $na_{рац} = 10$, $nk_{рац} = 8$.

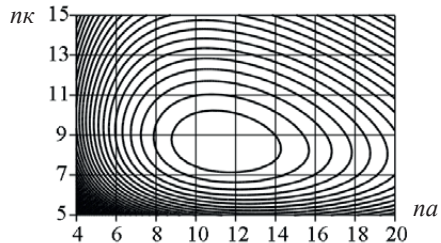


Рис. 4. Карта уровней показателя S_2

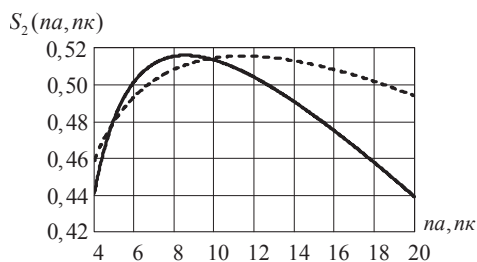


Рис.5. Зависимости показателя S_2 :
 от na при $nk=9$ (пунктирная); от nk при $na=11$ (сплошная)

В. Планирование объемов испытаний по методу «идеальной точки». Карта уровней показателя (30) изображена на рис. 6. Видно, что минимум показателя достигается при $na=14$, $nk=10$. Зависимости показателя (30) от числа АИ и КИ показаны на рис. 7. Видно, что имеется область минимальных значений, в которой показатель S_3 изменяется незначительно. Поэтому в качестве рациональных объемов испытаний можно принять значения на левой границе области минимальных значений $na_{рац} = 13$, $nk_{рац} = 9$.

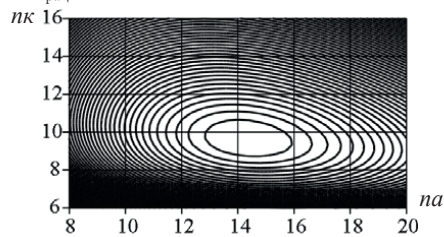


Рис. 6. Карта уровней показателя S_3

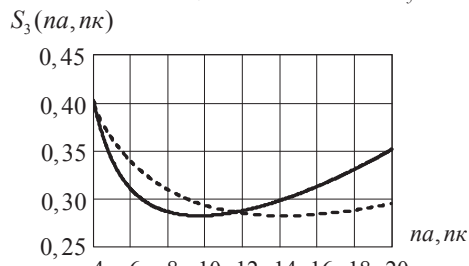


Рис. 7. Зависимости показателя S_3 :
 от na при $nk=10$ (пунктирная); от nk при $na=14$ (сплошная)

Анализ приведенных данных показывает, что разные методы векторной оптимизации приводят к разным результатам. Выбор метода планирования объемов испытаний ВТС осуществляется субъективно. Однако следует учесть, что метод «Эффективность-затраты-сроки» не учитывает все показатели качества системы испытаний ВТС, приведенные в п. 5. Поэтому при выборе объемов АИ и КИ ВТС целесообразно использовать критерии (29) и (или) (30).

Характерно, что получаемые рациональные объемы АИ и КИ ВТС значительно ниже, нежели полученные в примере п. 3 для подтверждения требуемой ВБР подсистем и ВТС. Если принять рациональные объемы испытаний $na=13$, $nk=9$, то оценки ВБР ВТС достигают значений перед КИ $P_0=0,40$ и после КИ $P_k=0,80$. Анализ результатов, полученных выше, а также других результатов при вариациях параметров, приведенных в п. 7.1, свидетельствует, что оценка ВБР ВТС после АИ при рациональном числе АИ значительно ниже требуемой ВБР. Поэтому при наземной отработке подсистем целесообразно доводить оценку ВБР ВТС только до значений $P_0 \in [0,4; 0,5]$, что позволит значительно снизить объемы АИ, а следовательно, и затраты на их проведение.

При ограниченных рациональных объемах испытаний не удастся подтвердить соответствие ВБР ВТС и их подсистем предъявляемым требованиям. Однако если повышать число испытаний, то снижается эффективность системы испытаний ВТС, а главное снижается численность создаваемой группировки на число испытаний, так что снижается эффективность группировки. Получаемые по разработанному способу ограниченные рациональные объемы АИ и КИ ВТС соответствуют современной практике отработки баллистических ракет и ракет-носителей, когда цикл отработки ограничивается 10-15 автономными испытаниями основных подсистем и примерно 10 летними испытаниями. После этого ВТС принимается на вооружение, хотя при этом не гарантируется соответствие ВБР требованиям. Невозможно объективно обосновать, что при ограниченном объеме испытаний ВБР подсистем соответствуют требованиям $P_{гр} \geq 0,995$, а ВБР ВТС соответствует требованию $P_{гр} \geq (0,95-0,97)$ и систему можно принимать на вооружение. Изложенный способ дает возможность более объективно обосновать рациональное число автономных и комплексных испытаний ВТС с учетом различных факторов и интересов как заказчика, так и изготовителя. Конечно, в дальнейшем необходимо будет уточнять ВБР ВТС и подтверждать соответствие ее требованиям на основе контрольных испытаний ВТС от серийных пар-

тий, результатов эксплуатации ВТС и дополнительных испытаний ВТС по спецпрограммам.

7.4. Зависимости рациональных объемов испытаний от численности создаваемой группировки ВТС

Планируемое число АИ и КИ ВТС зависит от многих факторов. Степень влияния этих факторов можно исследовать на основе вариаций показателей, принятых в п. 7.1. Особый интерес представляют зависимости числа испытаний от численности создаваемой группировки ВТС и объема средств, выделяемых для ее создания. Для построения таких зависимостей определяются объемы АИ и КИ при вариациях величины $N_{гр}$ и ставятся в соответствие численности группировки, которая вычисляется по зависимости (21). Полученные зависимости рационального числа АИ и КИ ВТС по методу «идеальной точки» от состава группировки при сохранении остальных параметров, приведенных в п. 7.1, показаны на рис. 8. Здесь дискретные значения числа испытаний для наглядности соединены плавными линиями. Видно, что при ограниченной численности группировки рациональный объем АИ и КИ ВТС становится соизмерим с числом ВТС $N_{гр}$ в группировке. С увеличением численности группировки рациональный объем испытаний возрастает и при $N_{гр} > 100-150$ стабилизируется на уровне $na_{рац} \in [15; 17]$, $nk_{рац} = 10$. При $N_{гр} > (150-200)$ рациональный объем испытаний практически не зависит от численности группировки и выделяемых средств на ее создание.

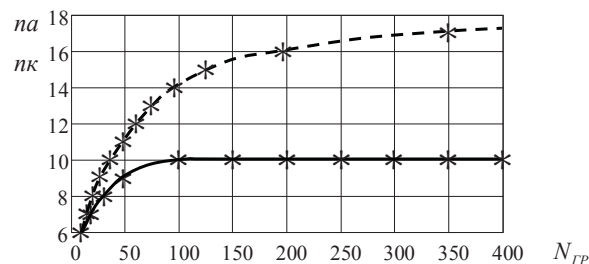


Рис. 8. Зависимости рационального числа АИ na (пунктирная) и КИ nk (сплошная) по методу «идеальной точки» от численности создаваемой группировки

Следует учитывать, что при вариациях значений показателей, приведенных в п. 7.1, и при использовании других методов векторной оптимизации результаты могут быть другими. Однако получаемые при этом рациональные объемы испытаний получаются существенно (в несколько раз) ниже, нежели необходимо для подтверждения требуемой ВБР ВТС, см. пример в п. 3.

Выводы

На основе проведенных исследований получены следующие основные результаты.

1. Показано, что для подтверждения требований к показателям безотказности ВТС одноразового применения и их подсистем необходим большой объем испытаний, который не удастся реализовать при существующих ограниченных технико-экономических ресурсах (п. 3).

2. Приведены зависимости для оценок ВБР ВТС и их подсистем по результатам автономных и комплексных испытаний по методу несмещенных оценок с учетом возможных не выявленных дефектов (п. 2).

3. Получены зависимости основных показателей эффективности системы испытаний ВТС от числа автономных и комплексных испытаний с учетом численности создаваемой группировки ВТС и ограниченных технико-экономических затрат на ее создание (п. 5).

4. Изложены способы выбора рациональных объемов автономных и комплексных испытаний ВТС на основе методов векторной оптимизации (п. 6).

5. Проведена демонстрация способа планирования объемов испытаний ВТС (п. 7). Показано, что рациональные объемы автономных и комплексных испытаний значительно (в несколько раз) ниже числа испытаний, необходимых для подтверждения требований к ВБР ВТС и их подсистем. При небольшой численности группировки ВТС рациональное число испытаний соизмеримо с числом ВТС в группировке. При увеличении численности создаваемой группировки $N_{гр}$ рациональные объемы автономных и комплексных испытаний ВТС возрастают, однако остаются ограниченными при $N_{гр} > (100-200)$.

Разработанный способ позволяет обосновать рациональное число испытаний ВТС и может использоваться при планировании автономных и комплексных испытаний на безотказность создаваемых и модернизируемых ВТС с учетом интересов заказчика и изготовителя.

Литература

1. Волков Л. И., Лукин В. Л., Сухорученков Б. И. Методы статистического контроля надежности технических систем. Юбилейный: ЗАО «ПСТМ», 2008.
2. Меньшиков В. А., Сухорученков Б. И. Методы мониторинга надежности ракетно-космических систем. М.: НИИ КС, 2006.
3. Подиновский В. В. Математическая теория выработки решений в сложных ситуациях. М.: МО, 1981.
4. Соломонов Ю. С., Сухорученков Б. И. Метод контроля динамики вероятности безотказной работы технических систем с переменной структурой по результатам отработочных испытаний. // Двойные технологии, № 1 (42). СИП РИА, 2008, С. 2-12.
5. Сухорученков Б. И. Математическая модель и методы оценивания и прогнозирования динамики надежности военно-технических систем при экспериментальной отработке. // Двойные технологии, № 2 (27). СИП РИА, 2004, С. 4-12.

Материал поступил в редакцию 29. 11. 2012 г.