Научная статья
УДК 623.5

Методика оптимизации процесса проведения натурных испытаний сложных технических комплексов в условиях финансовых ограничений

Владимир Герасимович Найденов, Константин Сергеевич Полиенко

Аннотация. В статье разработана новая методика оптимизации процесса проведения натурных испытаний сложных технических комплексов (СТК) в условиях финансовых ограничений, которая позволяет принимать научно обоснованные решения по оптимальному управлению количеством проводимых разнотипных натурных экспериментов при реализации планов испытаний сложных образцов СТК. Данная методика позволит повысить эффективность проведения натурных испытаний сложных технических комплексов с требуемой точностью и минимальными финансовыми затратами.

Ключевые слова: натурные эксперименты; сложные технические комплексы; испытания; точность оценки характеристик; оптимальное решение

Для цитирования: Найденов В.Г., Полиенко К.С. Методика оптимизации процесса проведения натурных испытаний сложных технических комплексов в условиях финансовых ограничений // Вооружение и экономика. 2024. №4(70). С. 16-25.

Original article

A Method for the Field Test Optimization Process of Complex Technical Systems under Financial Constraints Conditions

Vladimir G. Naidenov, Konstantin S. Polienko

Abstract. The article develops a new method for the field tests of complex technical systems (CTS) process optimization under financial constraints conditions. It allows to make scientifically based decisions on optimal management – the different types number of field experiments conducted in the course of complex CTS samples tests plans implemention. This method will increase the efficiency of complex technical systems field tests with the required accuracy and minimal financial costs.

Keywords: field experiments; complex technical systems; tests; accuracy of performance evaluation; rational solution

For citation: Naidenov V.G., Polienko K.S. A Method for the Field Test Optimization Process of Complex Technical Systems under Financial Constraints Conditions. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2024;70(4): 16-25. (In Russ.).

Известно, что в процессе испытаний сложных технических комплексов (СТК) проводятся натурные эксперименты, по результатам которых оцениваются их тактико-технические характеристики (ТТХ).

Несомненно, натурные испытания опытных образцов СТК представляют собой наилучший достоверный способ получения искомых оценок ТТХ испытываемых образцов, поскольку в процессе таких испытаний могут быть получены наиболее объективные статистические данные в условиях, адекватных условиям их дальнейшей эксплуатации[1]. Однако в практике испытаний СТК возможности проведения большого количества натурных испытаний, как правило, существенно ограничены. Это связано с тем, что для успешного проведения натурных испытаний требуются большие затраты времени, а также материальных и финансовых ресурсов. В это же время, необдуманное снижение количества проводимых натурных испытаний снижает объем получаемой статистическое информации и в конечном счете приводит к снижению точности и достоверности получаемых оценок ТТХ испытываемых сложных технических комплексов [1].

В связи со сказанным, возникла актуальная задача разработки научно обоснованного подхода к определению оптимального количества проводимых натурных экспериментов в условиях финансовых ограничений при проведении испытаний СТК и при обеспечении

[1] *См.*: Шаракшанэ А.С., Железнов Н.Г., Ивницкий В.А. Сложные системы: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1977. 247 с.; Шаракшанэ А.С., Железнов Н.Г. Испытания сложных систем: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1974. 184 с.

достижения максимальной точности и достоверности получаемых оценок тактико-технических характеристик испытываемых СТК.

Приведенная в данной статье методика основана на применении теоремы Чебышева[2], которая устанавливает тот факт, что при увеличении объема статистической информации оценка математического ожидания m_ξ случайной величины ξ сходится к значению ее истинного математического ожидания $m_\xi^{\text{ист}}$, а ее дисперсия D_ξ неограниченно убывает с увеличением объема получаемой статистики.

Как правило, при испытаниях опытного образца СТК проводится оценка не одной, а K его характеристик. При этом могут быть получены оценки характеристик образца СТК, которые являются, как правило, системой независимых случайных величин $\hat{\boldsymbol{\xi}} = \left[\hat{\xi}_1, \ldots, \hat{\xi}_k, \ldots, \hat{\xi}_K\right]^T$. Для оценки K характеристик образца СТК необходимо провести $\mathbf{N}_K$ разнотипных экспериментов, которые можно описать в виде матрицы-столбца вида $\mathbf{N}_K = [n_1, \ldots, n_k, \ldots, n_K]^T$, где n_k, количество экспериментов k-го типа.

Тогда в математическом виде задачу нахождения оптимального количества разнотипных натурных экспериментов, проводимых при испытаниях опытных образцов СТК, можно записать в следующем виде:

$$\text{определить } \mathbf{N}_{K_{opt}} = Arg \max_{\mathbf{N}_K \in \Psi} P_K(n_1, \ldots, n_k, \ldots, n_K),$$
$$\text{при ограничениях } \left[P_K\left(\left[\hat{\boldsymbol{\xi}} - \mathbf{m}_\xi\right] \le \mathbf{I}_\beta\right) \ge P_{\text{дов}}\right] \wedge \left[C_{\Sigma_\mathbf{N}} \le C_{\text{выд}}\right],$$

где $P_K(n_1, \ldots, n_k, \ldots, n_K)$ – многомерная функция, описывающая изменение величины комплексного интервального показателя точности оценки ТТХ испытываемого опытного образца СТК от количества проводимых разнотипных натурных экспериментов;
$P_{дов}$ – значение доверительной вероятности, которое выбирается близкой к единице;
$\boldsymbol{m}_\xi$ – матрица-столбец, составленная из значений математических ожиданий оцениваемых ТТХ образцов СТК;
$\boldsymbol{I}_\beta$ – матрица-столбец, составленная из значений доверительных интервалов для каждой оцениваемой ТТХ образца СТК;
C_{Σ_N} – линейная многомерная функция, описывающая изменение общей стоимости проведения испытаний образца СТК от значения количества проводимых разнотипных натурных экспериментов;
$C_{выд}$ – выделенный объем финансирования на проведение испытаний образца СТК.

В работе [2] авторами статьи был разработан комплексный интервальный показатель точности оценки ТТХ испытываемых опытных образцов СТК. Так, в случае оценки K характеристик испытываемого образца СТК для оценки уровня эффективности процесса проведения испытания такого образца может быть введен комплексный интервальный показатель мультипликативного типа, представляющий собой вероятность $P_K\left(\left[\hat{\boldsymbol{\xi}} - \boldsymbol{m}_\xi\right] \le \boldsymbol{I}_\beta\right)$ попадания системы случайных величин $\hat{\boldsymbol{\xi}}$ в многомерный доверительный параллелепипед с размерами $\boldsymbol{I}_\beta = [I_1, \ldots, I_k, \ldots, I_K]$, и который может быть записан следующим выражением:

$$P_K\left(\left|\hat{\boldsymbol{\xi}} - \mathbf{m}_{\hat{\xi}}\right| \le \mathbf{I}_\beta\right) = \prod_{k=1}^{K}\left\{\left[\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{\frac{I_{\beta(k)}}{2\sigma_{\hat{\xi}(k)}}} e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt\right] - 1\right\}, \tag{1}$$

где $\sigma_{\hat{\xi}_k}$ – среднеквадратическое отклонение погрешности оценки k-й характеристики образца СТК.

[2] *См.*: Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие. 3-е изд. М.: Академия, 2007. 464 с.; Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей: учеб. пособие. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1969. 368 с.

С использованием функции Лапласа выражение (1) может быть переписано в следующем виде:

$$P_K\left(\left|\hat{\boldsymbol{\xi}} - \mathbf{m}_{\hat{\xi}}\right| \leq \mathbf{I}_\beta\right) = \prod_{k=1}^{K}\left[2\Phi^*\left(\frac{t_{\beta(k)}\cdot\sigma_{\hat{\xi}(\text{треб})_k}}{\sigma_{\hat{\xi}_k}}\right) - 1\right], \tag{2}$$

где $\Phi^*(x)$ – нормальная функция распределения (функция Лапласа);

$\sigma_{\hat{\xi}(\text{треб})_k}$ – требование к среднеквадратической погрешности оценки k-й характеристики образца СТК;

$t_{\beta(k)}$ – число среднеквадратических отклонений, которое нужно отложить вправо и влево от центра рассеяния случайной величины для того, чтобы вероятность попадания в доверительный интервал была равна β для k-й оцениваемой характеристики.

Выражение (2) справедливо для случая, когда оценки ТТХ образцов СТК являются независимыми случайными величинами и распределены по нормальному закону, что чаще всего имеет место в практике испытаний СТК.

Если обозначить стоимость проведения одного натурного эксперимента по оценке k-й ТТХ испытываемого образца через c_k, то функцию зависимости общей стоимости проведения испытаний образца СТК от количества $\boldsymbol{N}_K$ проводимых испытаний можно записать в следующем виде:

$$C_{\Sigma_\mathbf{N}} = c_1\cdot n_1 + \ldots + c_k\cdot n_k + \ldots + c_K\cdot n_K = \sum_{k=1}^{K} c_k\cdot n_k., \tag{3}$$

В случае если результаты проведения натурного эксперимента k-го типа будут использоваться для оценки S тактико-технических характеристик испытываемого образца СТК, то в функции (3) значение стоимости c_k проведения этого эксперимента необходимо уменьшить в S раз.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что в процессе проведения повторных экспериментов различного типа значение комплексного интервального показателя точности оценки ТТХ испытываемого образца и значение линейной функции C_{Σ_N}, описывающей общую стоимость затрат на проведение испытаний образцов СТК, будут возрастать. Поэтому решение о нахождении оптимального количества $\boldsymbol{N}_{K_{opt}}$ проводимых натурных экспериментов K типов должно приниматься в следующих двух случаях.

Первый случай связан с достижением ограничения на общую стоимость $C_{выд}$ проведения испытаний образца СТК. При этом будет достигнуто максимально возможно максимальное значение интервального показателя точности оценки ТТХ испытываемого образца СТК при выделенном объеме финансирования на проведение таких испытаний.

Второй случай связан с отсутствием жестких финансовых ограничений на проведение испытаний СТК или вообще их отсутствии. В этом случае решение об оптимальном количестве проводимых натурных экспериментов будет приниматься при достижении интервальным показателем точности оценки ТТХ испытываемого СТК значения заданной доверительной вероятности $P_{дов}$.

Решение поставленной научной задачи будем проводить с использованием комплексного метода крутого восхождения (метода Бокса – Уилсона) [3-5], включающего метод многофакторного планирования экспериментов, регрессионный анализ, а также градиентный метод поиска оптимальных решений.

Алгоритм, реализующий разработанную методику, приведен на рисунке 1.

В блоке 1 алгоритма проводится ввод исходных данных, к числу которых относятся количество оцениваемых характеристик СТК, стоимость $c_k(k = \overline{1,K})$ проведения K разнотипных натурных экспериментов.

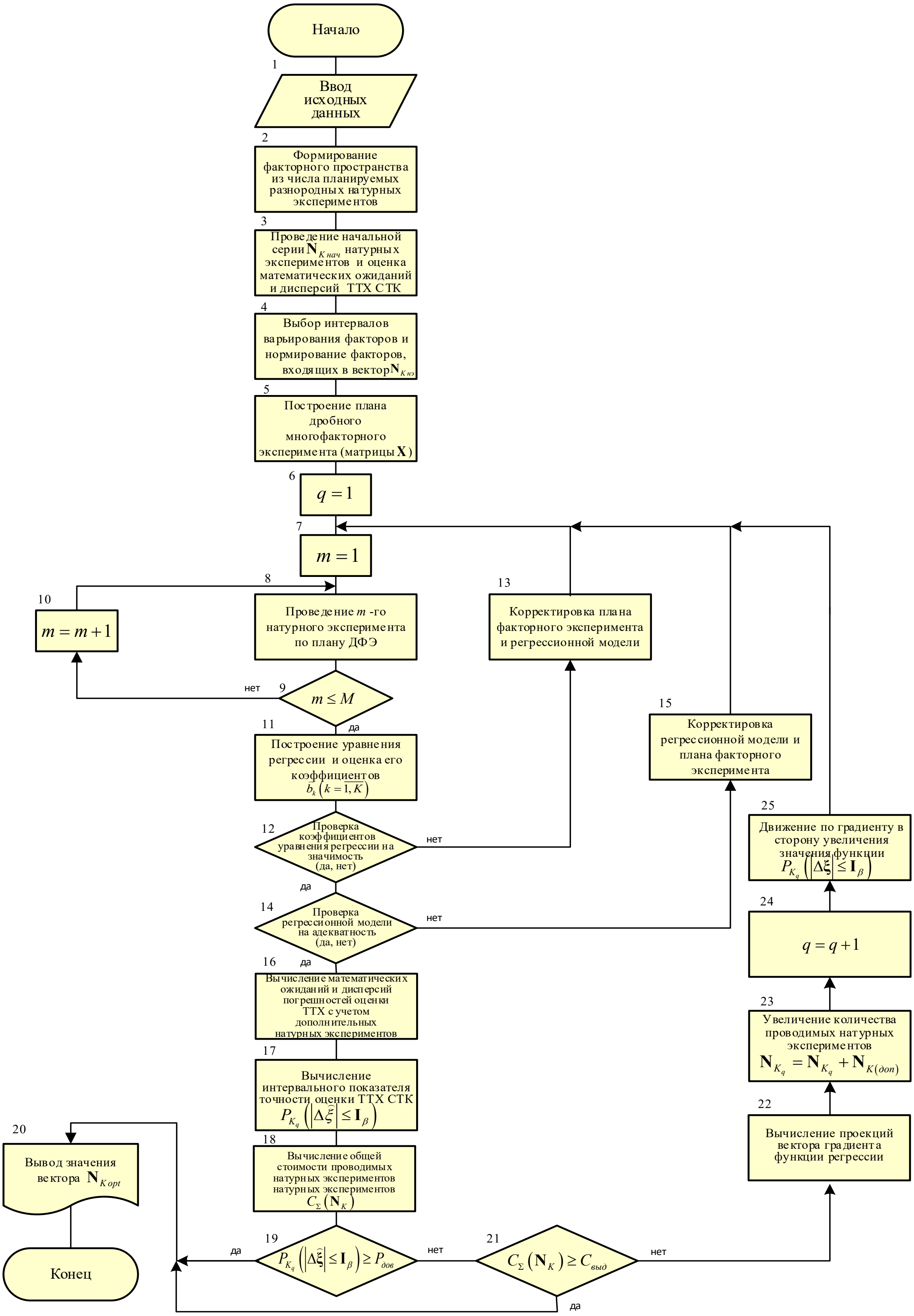

Рисунок 1 – Алгоритм решения задачи оптимизации процесса проведения натурных испытаний сложных технических комплексов в условиях финансовых ограничений

Далее в блоке 2 проводится формирование факторного пространства $\Phi_k\left(k=\overline{1,K}\right)$ из числа планируемых разнотипных натурных экспериментов, а в блоке 3 проводится выбор интервалов варьирования $\Delta\Phi_k\left(k=\overline{1,K}\right)$ и их нормирование в соответствии со следующим соотношением:

$$f_k=\frac{\Phi_k-\Phi_{0k}}{\Delta\Phi_k}, k=\overline{1,K},$$

где Φ_k – натуральное значение k-го фактора;
f_k – нормированное значение k-го фактора;
Φ_{0k} – натуральное значение основного уровня k-го фактора;
$\Delta\Phi_k=0{,}5\cdot\left(\Phi_k^B-\Phi_k^H\right)$ – интервал варьирования k-го фактора;
Φ_k^B,Φ_k^H – соответственно верхнее и нижнее натуральные значения k-го фактора.

В этом случае при изменении фактора Φ_k в пределах от Φ_k^B до $\Phi_k^{\text{Н}}$ значение f_k изменяется в пределах от – 1 до +1.

Далее (блок 5 алгоритма) проводится построение плана дробного многофакторного эксперимента [3-5] в виде матрицы $\boldsymbol{X}$, элементы которой для случая $K=3$ приведены в таблице 1.

Блоки 7-9 алгоритма предполагают проведение M серий натурных экспериментов согласно разработанному плану дробного многофакторного эксперимента.

Далее блок 11 алгоритма предполагает построение по результатам проведенных многофакторных экспериментов регрессионной линейной модели $W\left(\hat{\boldsymbol{B}}\right)$, аппроксимирующей в области проведения многофакторного эксперимента неизвестную нам многомерную функцию, описывающую изменение интервального показателя точности оценки ТТХ испытываемого образца СТК от количества проведенных натурных экспериментов следующего вида:

$$W\left(\hat{\mathbf{B}}\right)=\hat{b}_0+\hat{b}_1\cdot f_1+\ldots+\tilde{b}_k\cdot f_k+\ldots+\hat{b}_K\cdot f_K,$$

где $\hat{b}_0,\hat{b}_1,\tilde{b}_2,\ldots,\hat{b}_K$ – оценки коэффициентов уравнения регрессии, которые определяются с использованием метода наименьших квадратов [6].

Согласно этому методу, находятся такие значения оценок коэффициентов, которые минимизируют сумму квадратов невязок между значениями интервального показателя точности, полученными в опытных точках факторного пространства, и величинами этого показателя, предсказанными линейным уравнением регрессии. В этом случае матрица-столбец $\hat{\boldsymbol{B}}$ оценок коэффициентов уравнения регрессии находится из решения матричного уравнения следующего вида:

$$\hat{\mathbf{B}}=\left(\mathbf{X}^{\mathbf{T}}\cdot\mathbf{X}\right)^{-1}\cdot\mathbf{X}^T\cdot\hat{\mathbf{P}}_K,$$

где $\boldsymbol{X}$ – матрица многофакторного эксперимента;
$\hat{\boldsymbol{P}}_K$ – матрица-столбец результатов оценок значений функции $P_K\left(\left|\hat{\boldsymbol{\xi}}-\boldsymbol{m}_{\hat{\xi}}\right|\leq\boldsymbol{I}_\beta\right)$ в точках реализации плана многофакторного эксперимента.

Таблица 1 – Матрица проведения дробного многофакторного эксперимента

Номер экспери-мента	Значения нормированных факторов				Номер экспери-мента	Значения нормированных факторов			
	f_0	f_1	f_2	f_3		f_0	f_1	f_2	f_3
1	+1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	4	+1	+1	+1	+1

В блоках 12 и 14 алгоритма проводится проверка найденных значений коэффициентов уравнения регрессии на значимость, а также проверка самой регрессионной модели на адекватность.

Проверка регрессионной модели на адекватность может быть проведена, например, с использованием F-критерия Фишера. При этом значение F-критерия может определяться по следующей формуле, приведенной в работе [3]:

$$F = \frac{D_{\text{адек}}}{D_{P_K}}, \qquad (4)$$

где $D_{адек}$ – остаточная дисперсия или дисперсия адекватности;
D_{P_K} – дисперсия воспроизводимости со своим числом степеней свободы.

Дисперсии воспроизводимости и адекватности при отсутствии повторных опытов оцениваются соответственно следующими выражениями:

$$D_{P_K} = \frac{\sum_{m=1}^{M}\left(W_{K(m)} - \hat{P}_{K(m)}\right)^2}{M-1}; \ D_{\text{адек}} = \frac{\sum_{m=1}^{M} \Delta P_{K(m)}}{f},$$

где $W_{K(m)}$ – значение регрессионной модели, полученное по статистической информации в m-м опыте многофакторного эксперимента;
$\hat{P}_{K(m)}$ – значение оценки интервального показателя точности, полученное в m-м опыте многофакторного эксперимента;
$\Delta P_{K(m)}$ – невязки между оценками значений интервального показателя точности и значениями, предсказанными уравнением регрессии;
M – количество строк, имеющихся в матрице многофакторного плана проведения эксперимента;
f – число степеней свободы, равное $M - K$, то есть разности между количеством проведенных экспериментов и числом коэффициентов в уравнении регрессии.

Гипотеза адекватности регрессионной модели отвергается, если рассчитанное согласно выражению (4) значение F-критерия превосходит табличное значение $F(\alpha_1, \beta_1)$ для выбранной величины значимости α_1 и β_1 степеней свободы.

Проверка коэффициентов уравнения регрессии на значимость для каждого коэффициента проводится независимо и может быть осуществлена по t_k-критерию Стьюдента. В этом случае значение t_k-критерия для каждого k-го коэффициента рассчитывается по следующей формуле:

$$t_k = \frac{|\hat{b}_k|}{\sigma(b_k)}, \qquad (5)$$

где $\sigma(b_k)$ – среднеквадратическая погрешность оценки k -го коэффициента уравнения регрессии, которая рассчитывается по формуле:

$$\sigma^2(b_k) = \frac{D_{P_k}}{M}, \ k = \overline{1, K}.$$

В этом случае коэффициент значим, если рассчитанное согласно выражению (5) значение величины t_k будет больше критического табличного значения $t(\alpha_2, \beta_2)$ при выбранной величине значимости α_2 и соответствующем числе степеней свободы β_2.

В случае отрицательного результата проверок, проводимых в блоках 12 и 14, требуется корректировка плана многофакторного эксперимента или вида используемой регрессионной модели (блоки 13 и 15 алгоритма).

В блоке 16 алгоритма проводится обработка полученных статистических данных и вычисление математических ожиданий и дисперсий погрешностей оценки ТТХ СТК с учетом статистики, полученной в дополнительных натурных экспериментах, а в блоке 17 проводится вычисление значения интервального показателя точности оценки тактико-технических характеристик испытываемого образца СТК.

В процессе проведения итерационных процедур по увеличению значения интервального показателя точности оценки ТТХ СТК на каждой итерации подсчитывается общая сумма C_{Σ_N} затрат на проводимые натурные эксперименты (блок 18 алгоритма).

Далее в блоке 19 проводится нахождение оптимального количества проводимых натурных экспериментов при выполнении условия вида:

$$P_K\left(\left[\hat{\boldsymbol{\xi}} - \mathbf{m}_{\xi}\right] \leq \mathbf{I}_{\beta}\right) \geq P_{\text{дов}},$$

а в случае невыполнения этого условия управление передается на блок 21, где проверяется выполнение условия непревышения общей стоимости C_{Σ_N} проведенных натурных экспериментов по отношению к выделенному значению стоимости проведения испытаний $C_{выд}$.

В случае положительного решения проводится следующая дополнительная серия многофакторных экспериментов и управление передается на блок 22, а в противном случае в блоке 20 алгоритма выводится оптимальное количество проводимых натуральных экспериментов при максимально возможно высоком уровне интервального показателя точности оценки ТТХ испытываемого образца СТК.

Дальнейшее наращивание количества проводимых разнотипных натурных экспериментов должно проводиться целенаправленно в сторону максимальной скорости нарастания значения интервального показателя точности оценки ТТХ СТК.

Справедливо, что скорость нарастания функции $P_K\left(\left|\hat{\boldsymbol{\xi}} - \boldsymbol{m}_{\hat{\xi}}\right| \leq \boldsymbol{I}_{\beta}\right)$ будет наибольшей в направлении градиента гиперплоскости $W(\hat{\boldsymbol{B}})$, а сам градиент определяется в блоке 22 по следующей формуле:

$$grad\ W_K(\hat{\mathbf{B}}) = \frac{\partial W_K(\hat{\mathbf{B}})}{\partial f_1} i_1 + \ldots + \frac{\partial W_K(\hat{\mathbf{B}})}{\partial f_k} i_k + \ldots + \frac{\partial W_K(\hat{\mathbf{B}})}{\partial f_K} i_K, \quad (6)$$

где j_k – орты при $k = \overline{1, K}$.

Понятно, что направление дальнейшего поиска оптимального количества $\boldsymbol{N}_{K_{opt}}$ натурных экспериментов определяется значениями коэффициентов $\hat{b}_1, \tilde{b}_2, \ldots, \hat{b}_K$ уравнения регрессии (6). При этом изменение натуральных значений факторов $\Phi_1, \Phi_2, \ldots, \Phi_K$ должно проводиться пропорционально значениям полученных оценок коэффициентов $\hat{b}_1, \tilde{b}_2, \ldots, \hat{b}_K$ уравнения регрессии. Далее в блоке 23 алгоритма проводится изменение количества дополнительных натурных экспериментов, приводящее к увеличению значения интервального показателя $P_K\left(\left[\hat{\boldsymbol{\xi}} - \boldsymbol{m}_{\xi}\right] \leq \boldsymbol{I}_{\beta}\right)$ точности оценки ТТХ СТК. Затем алгоритм переходит на следующую итерацию наращивания количества проводимых дополнительных натурных экспериментов с целью увеличения объема получаемых статистических данных.

Апробация разработанной методики оптимизации процесса проведения испытаний сложных технических комплексов в условиях финансовых ограничений проводилась путем моделирования процесса крутого восхождения по поверхности многомерной функции, имитирующей изменение интервального показателя точности оценки ТТХ образца СТК, с целью поиска оптимального количества проводимых разнотипных натурных экспериментов. При этом делалось предположение, что среднеквадратические погрешности оценок характеристик испытываемого образца СТК уменьшаются по экспоненциальному закону при увеличении количества проводимых экспериментов в соответствии со следующей зависимостью:

$$\sigma(n_k) = \Xi_{\text{нач}(k)} \cdot e^{-\lambda_k \cdot n_k}, \ k = \overline{1, K},$$

где $\Xi_{\text{нач}(k)}$ – среднеквадратическая погрешность оценки k-й характеристики образца СТК, полученная после проведения начальной серии экспериментов;
λ_k – коэффициент, определяющий скорость уменьшения среднеквадратической погрешности оценки k-й характеристики образца СТК.

Исходные данные, необходимые для проведения модельных экспериментов по поиску оптимального значения количества проводимых натурных экспериментов при $K = 2$, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные, используемые при проведении модельных экспериментов

Название параметра, учитываемого при проведении модельных экспериментов	Значение параметра, характеризующего модельные эксперименты	
	n_{k_1}	n_{k_2}
Начальное количество испытаний	3	3
Коэффициенты крутизны убывания дисперсий оцениваемых параметров СТК	1,39	1,79
Значение доверительной вероятности	0,9	0,9
Начальная величина среднеквадратической погрешности оценки параметров СТК	30	30
Стоимость проведения одного натурного эксперимента, тыс. руб.	35	35

На рисунке 2 показан процесс поиска оптимального количества проводимых экспериментов при условии, что значение интервального показателя точности оценки ТТХ испытываемого образца СТК должно быть не менее $0{,}55$, а финансовые ограничения на проведение испытаний составляют 1300 тыс. рублей (вариант №1).

Как видно из рисунка, при заданных исходных данных ограничение по точности оценки характеристик испытываемого образца СТК наступит раньше, чем будут израсходованы выделенные финансовые средства на проведение испытаний. Результаты модельного эксперимента показали, что при заданных исходных данных, потребуется проведение четырех циклов модельных многофакторных экспериментов. При этом необходимо провести 11 экспериментов первого типа и 12 экспериментов второго типа для выполнения требований по точности оценки тактико-технических характеристик образца СТК.

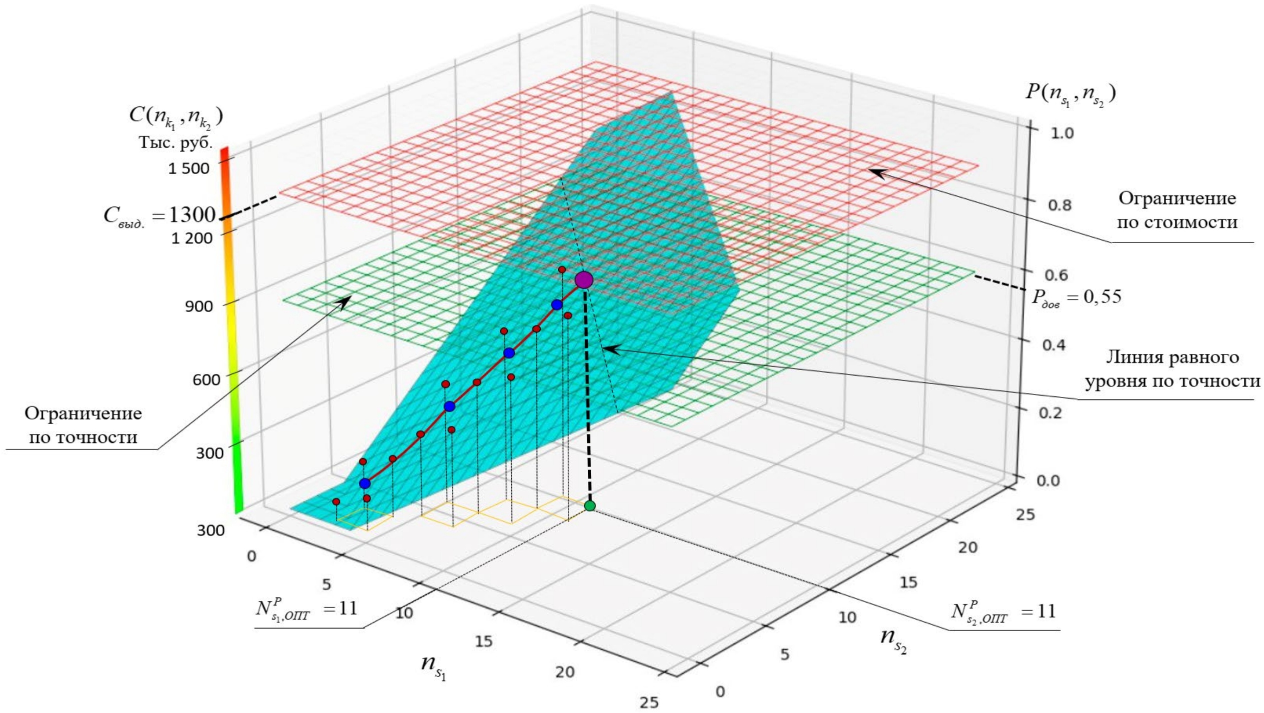

Рисунок 2 – Процесс поиска оптимального количества проводимых натурных экспериментов при проведении испытаний образца СТК (вариант №1)

На рисунке 3 показан процесс поиска оптимального количества проводимых экспериментов при условии, что значение интервального показателя точности оценки ТТХ испытываемого образца СТК должно быть не менее $0{,}9$, а финансовые ограничения на проведение испытаний составляют 800 тыс. рублей (вариант №2).

Как видно из этого рисунка, при заданных исходных данных ограничение по выделенным финансовым средствам на испытание образца СТК наступит раньше, чем будет достигнута требуемая точность оценки тактико-технических характеристик образца СТК. Результаты модельного эксперимента показали, что потребуется проведение шести циклов модельных многофакторных экспериментов до момента наступления ограничения на выделенные финансовые средства. При этом требуемая точность оценки ТТХ СТК не будет получена. Для достижения требуемой точности оценки тактико-технических характеристик потребуется проведение еще двух циклов модельных многофакторных экспериментов.

Апробация разработанной методики оптимизации процесса проведения натурных испытаний сложных технических комплексов в условиях финансовых ограничений путем проведения модельных экспериментов показала правильность поставленной задачи исследования, работоспособность разработанной модели, адекватность полученных аналитических выражений и возможность практического применения данной методики при испытаниях опытных образцов СТК.

Таким образом, в статье разработана новая методика оптимизации процесса проведения натурных испытаний сложных технических комплексов в условиях финансовых ограничений, которая позволяет принимать научно обоснованные решения по оптимальному управлению количеством проводимых разнотипных натурных экспериментов при реализации планов испытаний сложных образцов СТК.

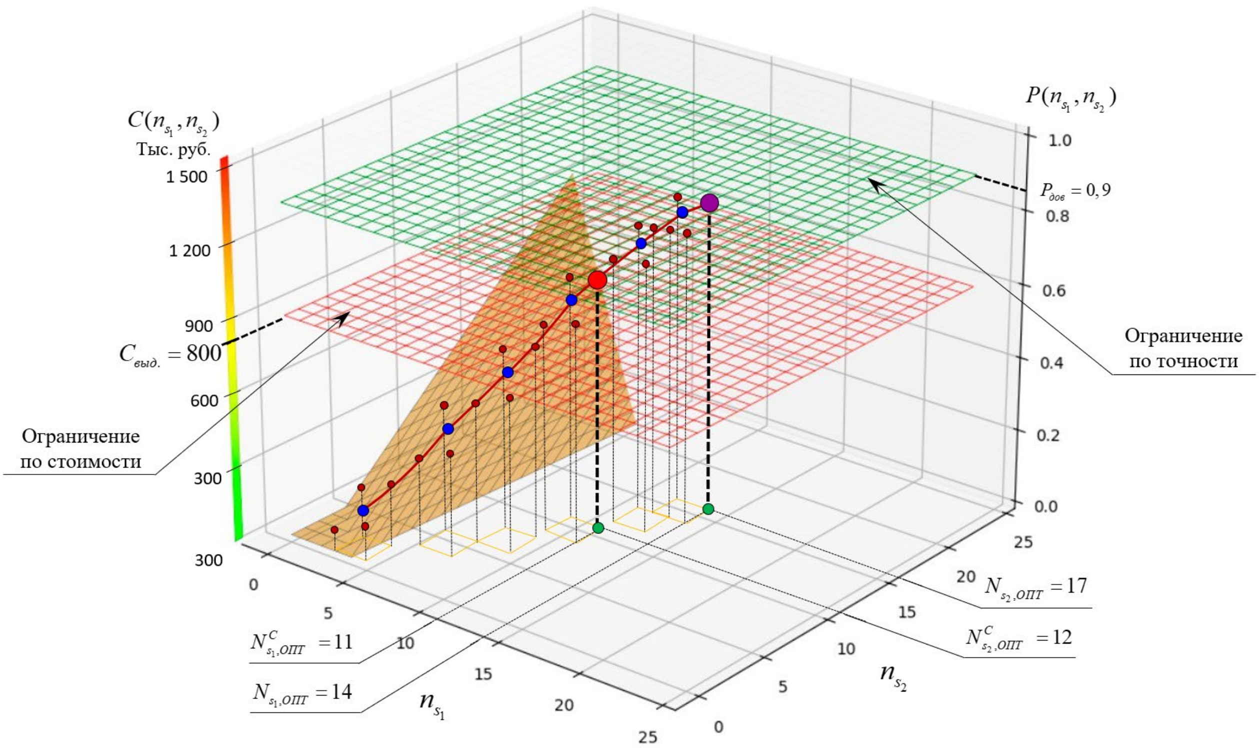

Рисунок 3 – Процесс поиска оптимального количества проводимых натурных экспериментов при проведении испытаний образца СТК (вариант №2)

Список источников

1. Иванющенко А.С., Пирожник В.В., Третьяков Ю.Н. Информационное обеспечение испытаний летательных аппаратов. М.: Знание, 2013. 724 с.

2. Найденов В.Г., Полиенко К.С. Разработка комплексного интервального показателя точности оценки тактико-технических характеристик испытываемых технических комплексов // Качество и жизнь. 2023. №4(40). С. 71-74.

3. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. 2-е изд. М.: Наука, 1976. 278 с.

4. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1976. 392 с.

5. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента. М.: Радио и связь, 1983. 248 с.

6. Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н. Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Физматгиз, 1960. 657 с.

Информация об авторах

В.Г. Найденов – доктор технических наук, старший научный сотрудник.

К.С. Полиенко – SPIN код автора 6031-8249.