УДК 621.002

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.В. Горошко, В.П. Ройзман

Рассмотрены задачи обеспечения работоспособности технических систем, которые были формализованы как обратные задачи синтеза номинальных и допустимых значений первичных факторов, действующих на систему, решение которых осуществляется с помощью многокритериальной оптимизации. Показано, что успешное решение такой задачи связано с преодолением значительных трудностей математического моделирования, статистической обработки эмпирических данных, обеспечения устойчивости получаемых решений. Предложен метод создания гибридных статистически-детерминированных моделей, позволяющий значительно уменьшить количество необходимых экспериментов в методе активного планируемого эксперимента, метод статистической обработки данных с полимодальным законом распределений параметров, методы повышения устойчивости решения линейных некорректных задач. В качестве примера продемонстрирована эффективность изложенных подходов для обеспечения работоспособности самолетного ответчика.

Ключевые слова: *обратная задача, допуски, работоспособность, математическое моделирование, статистика, устойчивость, самолетный ответчик.*

INVERSE PROBLEMS SATISFY THE DESIRED LEVEL OF QUALITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

A.V. Goroshko, V.P. Royzman

Formalized task of ensuring operability of technical systems as inverse problem of synthesis of acceptable values of the primary factors affecting the system. The task of finding nominal and allowable values of the primary factors is reduced to the problem of multi-criteria optimization. It is shown that the successful solution of this problem is connected with overcoming serious difficulties of mathematical modeling, statistical processing of empirical data, the sustainability of the solutions obtained. A method for the creation of hybrid statistical-deterministic models, can significantly reduce the number of required experiments in the method of active planned experiment, the method of statistical data with a multimodal distribution law of parameters, methods to improve the stability of the solution of linear ill-posed problems. Partially it demonstrated the effectiveness of the approaches set out to ensure the efficiency of aircraft defendant.

Keywords: *inverse problem, tolerance, hard work, mathematical modeling, statistics, sustainability, the aircraft transponder.*

Введение

Создание любой сложной технической системы, например новой машины, механизма, технологического, медико-биологического и других систем и процессов начинается с задания технических условий (ТУ) на выходные параметры. Эти условия выражаются в виде номинальных значений выходных параметров и допусков на их значения. А далее перед разработчиками стоит задача спроектировать, сконструировать, изготовить и довести объект, выполняющий заданные функции, у которого выходные параметры лежали бы в пределах, оговоренных ТУ, чем будет обеспечен требуемый уровень качества.

При создании сложных объектов значения их выходных параметров в той или иной мере могут зависеть от номинальных значений и допусков на входные параметры (первичные факторы) сотен или тысяч деталей и узлов, составляющих конструкцию, взаимодействие которых и обеспечивает функциональное предназначение объекта. Известно, как длительно и нелегко проходит доводка сложных объектов, особенно не имеющих аналогов. И, конечно, важно как можно быстрее понять удовлетворяет ли создаваемая схема и конструкция при предполагаемой технологии производства заданным требованиям.

Известные методы оптимального выбора допусков по критерию стоимости [1, 2], геометрические методы назначения допусков [3]), метод «центровки» допусков [4] имеют ограниченное применение, в первую очередь из-за решаемой многократно прямой задачи. В работах [5–7] поиск номинальных значений показан без надлежащего учета степени критичности выходных характеристик к вариации первичных факторов. В работах [8, 9] ставятся и решаются задачи определения допустимых значений первичных параметров технических систем, но описанные в них методы в основном могут эффективно применяться в радиоэлектронной технике.

Представляют значительный интерес работы по многокритериальному синтезу сложных механических систем, где предложен уникальный метод исследования пространства параметров, позволяющий решать многокритериальные задачи проектирования и поиска множества [10]. По нашему мнению, метод может быть применен на этапе оптимизации допусков, в то же время в реальных практических задачах его эффективность будет резко снижаться без предварительного преодоления трудностей моделирования, а именно, решения проблем параметрической и структурной идентификации моделей, устойчивости получаемых решений, статистической обработки эмпирических данных, подставляемых в модель.

Не имея возможности глубоко проанализировать выполненные в разное время решения, укажем, что непрерывное развитие науки и техники делают эту проблему непрерывно меняющейся, усложняющейся, но всегда современной, ее решение определяется степенью использования последних достижений соответствующих наук.

Цель работы заключается в повышении эффективности проектирования и обеспечения качества сложных технических систем путем создания комплексной методики назначения допустимых границ изменения первичных параметров деталей и узлов системы с позиций решения обратной задачи на различных стадиях создания объекта.

Постановка задачи

Представим модель технической системы в виде, показанном на рис. 1.

Пусть качество любого объекта оценивается по значениям его выходных параметров (характеристик), представленных вектором $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \ldots, y_m)^{\mathrm{T}}$. Обеспечение заданного уровня качества означает гарантировать выполнение соотношений

$$\left[y_i\right] \le y_i \le \left[Y_i\right],\ i = 1, 2, \ldots, m, \tag{1}$$

где $\left[y_i\right]$, $\left[Y_i\right]$ – соответственно нижняя и верхняя границы параметра y_i, задаваемые в ТУ.

Решение этой задачи следует искать в виде множества значений первичных факторов, которое может быть представлено следующим неравенством:

$$\left[x_i\right] \le x_i \le \left[X_i\right],\ i = 1, 2, \ldots, n, \tag{2}$$

где $[x_i]$, $[X_i]$ – соответственно нижняя и верхняя границы первичных факторов x_i, определяющие область работоспособности системы.

Принадлежность к этому множеству должно обеспечивать выполнение ограничений (1), наложенных на выходные параметры объекта.

Сформулированную задачу в дальнейшем будем называть множественной обратной задачей, подчеркивая тем самым, что ее решение предполагает определение множества значений (области) в пространстве первичных факторов. Этим обстоятельством она отличается от традиционно решаемых во многих отраслях техники точечных обратных задач, в которых должен быть определен только один вектор первичных факторов и (или) параметров модели, если вектор $\mathbf{y}$ задан заранее.

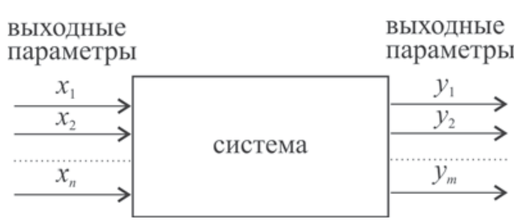

Рис. 1. Модель технической системы

Комплекс методов решения поставленной задачи

Формирование вектора **y** полностью определяется набором вектора значений первичных факторов $\mathbf{x} = (x_1,\ x_2,...,x_n)^{\mathrm{T}}$ с помощью оператора

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x},\ \mathbf{B}), \tag{3}$$

осуществляющего связь между этими векторами. Структура $\mathbf{f} = (f_1, f_2,..., f_m)^{\mathrm{T}}$ и вектор параметров математической модели $\mathbf{B} = (B_1,\ B_2,..., B_k)^{\mathrm{T}}$ соответствуют физической природе и функциональному предназначению объекта.

Как правило, производственные, физические, экономические и иные соображения позволяют указать самые широкие пределы множеств возможных значений первичных факторов. Тогда дополненную этими ограничениями систему (1) с учетом координатной формы оператора (3) можно записать в виде

$$\begin{cases} \mathbf{y} = \mathbf{f}(x_1,\ x_2,...,x_n,\ B_1,\ B_2,...,B_k),\ i = 1,2,...,m, \\ C_i < x_i < D_i,\ i = 1,2,...,n, \end{cases} \tag{4}$$

где C_i, D_i - известные величины.

Следует заметить, что структура функций или множеств значений первичных факторов могут быть различными. Например, один из первичных факторов x_i может принимать только дискретное или даже конечное множество значений. Тогда этот факт должен быть отражен в системе (4), например, таким образом: $x_i = 1, 2,..., N$.

Система ограничений (4) определяет в пространстве первичных факторов $\mathbf{R}^n$ некоторую криволинейную область – область работоспособности изделия. Отыскание содержащихся в ней множеств вида (2) геометрически означает вписывание в эту область n-мерных параллелепипедов. Такая задача имеет не единственное решение, так как таких параллелепипедов в указанную область можно вписать бесчисленное множество. При этом каждый из них может быть полностью определен точкой $\mathbf{x_0} = (x_{10},\ x_{20},...,x_{l0})^{\mathrm{T}}$, заведомо лежащей в данной области и соответствующей одному из базовых вариантов конструкции, и набором значений нижних δ_i и верхних Ω_i отклонений первичных факторов от их номинальных значений, соответствующих границам полей допусков первичных факторов, т.е. выбранной технологии.

При этом номинальная точка может лежать внутри или на границе поля допуска, и очевидны соотношения

$$x_{i0} - \delta_i \le x_{i0} \le x_{i0} + \Omega_i,\ \ i = 1,2,...,n. \tag{5}$$

Далеко не всякое решение (5) сформулированной задачи может быть практически реализовано в силу различных конструкторских, технологических, экономических или другого рода соображений. Причиной тому могут послужить либо высокая стоимость, либо отсутствие необходимого оборудования, комплектующих, материалов, исполнителей соответствующей квалификации, особенности конструкции объекта и т.п. Эти ограничения аналитически можно записать в виде критериев оптимальности (целевых функций) экономического, производственного или другого смысла, выраженных через отклонения первичных факторов от их номинальных значений:

$$\begin{gathered} F_i = F_i(\delta_1,\ \delta_2,...,\delta_n,\ \Omega_1,\ \Omega_2,...,\Omega_n), \\ i = 1,2,...,L.\ \ F \in \mathbf{R}^L,\ \ \delta,\Omega \in \mathbf{R}^n. \end{gathered} \tag{6}$$

Очевидно, что из всех указанных параллелепипедов наиболее приемлемыми для практической реализации объекта являются те, в которых критерии (6) или некоторые из них будут оптимизированы, а остальные присоединены к ограничениям (4).

Возможны различные критерии оптимизации допусков на первичные факторы. Основным из них является минимизируемая функция стоимости. Поскольку зависимость этой функции от текущих значений допусков на каждый из первичных факторов неизвестна, можно попытаться заменить ее в определенном смысле эквивалентными критериями, например, потребовать максимизации всех или некоторых допусков. В таком случае в качестве частных критериев оптимальности будем рассматривать допуски на значения первичных факторов, взятые со знаком минус

$$F_i = -\delta_i \to \min,\ F_i = -\Omega_i \to \min,\ i = 1,2,...,n.$$

Таким образом, задача обеспечения заданного уровня качества объекта приводится к задаче многокритериальной (векторной) оптимизации с некоторыми ограничениями. Требуется определить такие отклонения δ_i и Ω_i от номинальных значений первичных факторов, при которых в области работоспособности (5) выполняются ограничения (1).

Решение сформулированной задачи связано с некоторыми трудностями, преодоление которых должно стать необходимыми пунктами решения.

Математическое моделирование технических систем

В практике существуют случаи, когда модель, требуемая для записи функциональной части ограничений (3), известна. Но, как правило, сложные объекты могут иметь неизвестные (неточные) параметры или неизвестную структуру, или и то, и другое. Определение параметров и (или) структуры модели называется соответственно параметрической и (или) структурной идентификацией. Поэтому необходимо разработать легко реализуемый подход к задаче установления функциональных зависимостей первичных факторов и выходных параметров, имеющих достоверные коэффициенты, приведенные к модели объекта. Основой алгоритмизации оперативного математического моделирования может стать активное регулируемое воздействие на объект.

Пусть модель опытного образца объекта представлена в виде (3).

Сначала предположим, что структура функций f_i известна, но параметры B_i неизвестны. Если в (3) подставить измеренные в реальных условиях функционирования объекта значения выходных характеристик и некоторых первичных факторов, то вместе с ними системе (3) должны удовлетворять также k неизвестных значений первичных факторов и j коэффициентов модели. Как правило, система (3) является недоопределенной $(k + j > n)$ и допускает бесчисленное множество решений. Поскольку объект реально существует и функционирует, то из этого множества естественно выбрать именно то решение, которое соответствует данному объекту. Следовательно, задачу требуется доопределить путем проведения дополнительных экспериментов. Практическим способом такого доопределения является предлагаемый метод пробных параметров.

Для его реализации в исследуемый объект поочередно вводят дополнительные элементы либо изменяют в нем $k + j - n$ элементы, и (или) выводят объект на пробные режимы функционирования, выбранные из числа указанных в ТУ, т.е. активно регулируют работу объекта. Воздействие этих пробных элементов (или режимов) совместно с элементами, характеристики которых идентифицируются, позволяют измерить недостающие значения выходных параметров, дополнить систему (3) до нормальной и, в случае независимости ее уравнений, идентифицировать искомые факторы и коэффициенты модели, т.е. найти решение обратной точечной задачи.

Структурная идентификация необходима тогда, когда неизвестны f_i. В этом случае предлагается их представить разложенными в ряды по любой полной системе функций, например, в ряды Тейлора, и проводить идентификацию несколькими последовательными этапами. Сначала, применяя нужное количество пробных параметров, следует определить коэффициенты линейного приближения. Введя дополнительные пробные параметры, можно отобрать те y_i, которые адекватны объекту. Для остальных функций рассматриваются квадратичные и другие приближения. Сходимость этого процесса легко доказывается. Для часто встречающихся практических ситуаций количество этапов обычно не превышает двух-трех.

Значительный вклад в развитие методов структурной идентификации моделей внес В.О. Эглайс [11]. Тем не менее, при построении сложных моделей растет количество необходимых экспериментов, и эта проблема часто ставит под вопрос применение самого метода активного планируемого эксперимента (АПЭ).

При реализации структурной идентификации следует сначала в качестве первичных факторов рассматривать характеристики крупных узлов и выявлять те из них, которые существенно влияют на функционирование объекта. Затем таким же образом можно установить зависимости отобранных характеристик крупных узлов от более мелких и т.д. Такой иерархический подход позволяет оперативно настраивать модель на исследуемый объект с учетом степени его идеализации и условий его функционирования, а также устранять необходимость учета и анализа несущественных первичных факторов.

Однако иерархическое моделирование допустимо только при возможности измерения на каждом этапе выходных характеристик отдельных узлов. В тех случаях, когда такая возможность конструктивно не предусмотрена, авторами предложен метод моделирования многокаскадных систем, позволяющий значительно снизить количество необходимых экспериментов.

Пусть взаимосвязь между выходными параметрами отдельных узлов (каскадов) и выходной характеристикой детерминирована, т.е. функция

$$y = f(\varphi_1,\ \varphi_2, \ldots, \varphi_k),\ \varphi_i \in \mathbf{R}^k,$$

$$\varphi_i = \varphi_i(x_{i1},\ x_{i2}, \ldots, x_{il_i}),\ i = 1, 2, \ldots, k,$$

где заданная φ_i – выходная характеристика i-го узла.

Тогда, фиксируя значения первичных факторов всех каскадов кроме одного, и измеряя выходную характеристику y, можно построить модель каждого каскада, а затем объединить эти модели в рамках общей модели при условии варьирования первичных факторов всех узлов. Авторами предложен метод построения гибридных статистически-детерминированных моделей многокаскадных объектов, позволяющий формировать статистические модели с учетом известных теоретических зависимостей.

Обозначив набор факторов векторами $\mathbf{x}_i(x_{i1},\ x_{i2}, \ldots, x_{il_i})^{\mathrm{T}}$, $i = 1, 2, \ldots, k$, искомая функция примет вид:

$$y = f(\varphi_1(\mathbf{x}_1), \varphi_2(\mathbf{x}_2), \ldots, \varphi_k(\mathbf{x}_k)).$$

Задача заключается в том, чтобы методом АПЭ построить полиномиальное представление функции y, выраженное через первичные факторы. Суть предлагаемой методики решения такой задачи заключается в моделировании зависимостей выходной характеристики изделия от первичных факторов каждого каскада отдельно (значение первичных факторов других каскадов в это время фиксируются на некотором уровне) и последующем объединении их в рамках общей модели объекта в соответствии с известной теоретической зависимостью.

Для реализации предложенной методики необходимо осуществить следующую последовательность действий.

Создадим для начала k вспомогательных функций

$$y_i = f_i(\varphi_{10},\ \varphi_{20}, \ldots, \varphi_{(i-1)0},\ \varphi_i(\mathbf{x}_i), \varphi_{(i+1)0}, \ldots, \varphi_{k0}),\ i = 1, 2, \ldots, k, \tag{7}$$

где φ_{j0} – фиксированное, но неизвестное значения функции φ_j при неизвестном фиксированном наборе первичных факторов $\mathbf{x}_{j0}$.

Применяя k раз полный факторный эксперимент (ПФЭ), получим полиномиальное представление каждой функции y_i в виде

$$y_i = b_0 + \sum_{i=1}^{l_i} b_i x_i + \sum_{i,j} b_{ij} x_i x_j + \ldots, \tag{8}$$

где b_0, b_i, b_{ij} – коэффициенты модели, записанной в кодированных значениях факторов.

Таким образом, путем реализации $2^{l_1} + 2^{l_2} + \ldots + 2^{l_k}$ экспериментов определим зависимости $y_i = y_i(\mathbf{x}_i)$. Далее, подставляя полученные функции поочередно в левую часть (7), выразим все $\varphi_i(\mathbf{x}_i)$ через $y_i(\mathbf{x}_i)$ и $k-1$ постоянную φ_{j0}:

$$\begin{cases} y_i(\mathbf{x}_{i0}) = f_i\big[\varphi_{10}, \varphi_{20}, \ldots, \varphi_{(i-1)0}, \\ \varphi_i(\mathbf{x}_i),\ \varphi_{(i+1)0}, \ldots, \varphi_{k0}\big], \\ \varphi_i(\mathbf{x}_i) = g_i\big[y_i(\mathbf{x}_i), \varphi_{10}, \varphi_{20}, \ldots, \varphi_{(i-1)0}, \\ \varphi_i(\mathbf{x}_i), \varphi_{(i+1)0}, \ldots, \varphi_{k0}\big]. \end{cases} \tag{9}$$

Измерив значение моделируемой выходной характеристики при фиксированных значениях первичных факторов, записываем соотношение

$$y_0 = f\big[\varphi_1(\mathbf{x}_{10}), \varphi_2(\mathbf{x}_{20}), \varphi_3(\mathbf{x}_{30}), \ldots, \varphi_k(\mathbf{x}_{k0})\big] = \\ = f(\varphi_{10},\ \varphi_{20}, \ldots, \varphi_{k0}).$$

Как видно из (7),

$$y_i(\mathbf{x}_{i0}) = f(\varphi_{10}, \varphi_{20}, \ldots, \varphi_{(i-1)0}, \varphi_i, \varphi_{(i+1)0}, \ldots, \varphi_{k0}) = y_0.$$

Подставляя выражение (9) в y, после преобразования получаем функцию y, зависящую теперь от первичных факторов $\mathbf{x}_1,\ \mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_k$ и фиксированных неизвестных чисел $\varphi_{10},\ \varphi_{20}, \ldots, \varphi_{k0}$:

$$y = \psi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_k, \varphi_{10}, \varphi_{20}, \ldots, \varphi_{k0}). \tag{10}$$

Поскольку при $\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_{i0}$, $i = 1, 2, \ldots, k$ имеет место $y = y_0$, верным будет равенство

$$y_0 = \psi(\mathbf{x}_{10}, \mathbf{x}_{20}, \ldots, \mathbf{x}_{k0}, \varphi_{10}, \varphi_{20}, \ldots, \varphi_{k0}), \tag{11}$$

позволяющее отказаться в (10) от неизвестных φ_{i0}, выразив их через измеренные значения y_0, и, таким образом, получить искомый вид моделирующей функции.

Предложенный метод построения гибридных статистически-детерминированных моделей многокаскадных объектов дает значительный выигрыш в количестве экспериментов при постановке АПЭ по сравнению с построением чистых статистических моделей. Количество экспериментов $2^{l_1}+2^{l_2}+\ldots+2^{l_k}$ существенно меньше количества экспериментов $2^{l_1+l_2+\ldots+l_k}$, необходимого для реализации стандартного ПФЭ. Следует подчеркнуть, что этот способ математического моделирования сам по себе является частным случаем решения обратной задачи.

Обеспечение устойчивости модели

Рассмотренные модели имеют практическое значение только тогда, когда погрешности экспериментальной входной информации не могут вызвать недопустимо большие погрешности определяемых величин, т.е. когда модели устойчивы.

Пусть решается система уравнений типа

$$(\mathbf{A}+\Delta\mathbf{A})(\mathbf{x}+\Delta\mathbf{x})=\mathbf{y}+\Delta\mathbf{y}, \qquad (12)$$

где элементы матрицы **A**, искомого вектора **x** и правой части имеют некоторые неизвестные абсолютные погрешности – $\Delta\mathbf{A}$, $\Delta\mathbf{x}$ и $\Delta\mathbf{y}$ соответственно, зависящие от точности контрольно-измерительной аппаратуры и других факторов. При этом, очевидно, ошибки измеренных величин малы по сравнению с истинными значениями этих величин **A**, **x** и **y**. В работе [3] определяется понятие устойчивости модели по всем или по группе факторов, выводится оценка относительной погрешности идентифицируемых с помощью линейной модели параметров

$$\begin{aligned}\|\Delta\mathbf{x}\|/\|\mathbf{x}\| &\le \mathrm{cond}(\mathbf{A})\cdot(\|\Delta\mathbf{y}\|/\|\mathbf{y}\|)+\\ &+[\mathrm{cond}(\mathbf{A})]^2\cdot(\|\Delta\mathbf{A}\|/\|\mathbf{A}\|),\end{aligned} \qquad (13)$$

выраженная через число обусловленности cond (**A**) матрицы **A** и погрешности измеряемых характеристик и элементов матриц **A**. Оценка (13) позволяет обосновать ухудшение устойчивости модели с ростом порядка **A**, т.е. указать на необходимость поиска компромиссного варианта между стремлением точнее описать объект за счет привлечения большего числа факторов и обеспечением устойчивости его модели. Из (13) видно, что регуляризировать модель можно не только воздействием на оператор **A**, что в силу различных причин не всегда возможно в производственных условиях. Одним из способов сужения множества возможных решений до класса корректности служит способ многократного решения (12) и нахождения искомого решения как математического ожидания всех полученных решений. При этом допускается, что погрешности $\Delta\mathbf{A}$, $\Delta\mathbf{x}$ и $\Delta\mathbf{y}$ случайны и имеют распределения вероятностей с нулевым средним. В определенных условиях к тому же результату можно прийти, если, произведя измерения, усреднить их и подставлять в качестве компонент вектора **y** их математического ожидания. Такой метод является некоторой реализацией метода наименьших квадратов (МНК), а полученные при этом решения – оценками МНК (ОНК).

Авторами установлена зависимость между абсолютной ошибкой решения $\Delta\mathbf{y}$ и количеством измерений k, необходимых для получения гарантированной ошибки, не превышающей $\Delta\mathbf{x}$:

$$(\Delta\mathbf{y})^{\mathrm{T}}\sum{}^{-1}\Delta\mathbf{y}=[n(k-1)/(k(k-n))]F_{1-P}, \qquad (14)$$

где $\sum=\mathrm{cov}(\mathbf{y})$ – квадратная неотрицательно определенная симметричная ковариационная матрица размером $n\times n$, на диагонали которой расположены дисперсии компонент вектора, а внешнедиагональные элементы это ковариации между компонентами y_i; F_{1-P} – значение F-статистики, отвечающее уровню значимости $\alpha=1-P$ при числах степеней свободы $f_1=n$ и $f_2=k-n$.

Предложен итерационный алгоритм поиска минимального необходимого значения k для достижения заданной точности $\Delta\mathbf{x}$ [3].

Описанный метод статистического решения наиболее эффективен в сочетании с методами воздействия на оператор **A**. Оценка ошибки решения из (13) представляет интерес и в чисто практическом плане, так как она устанавливает зависимость между экономическими факторами (точностью метода и точностью аппаратуры) и теоретическим (точностью модели), а, следовательно, позволяет выбирать одно из этих условий для обеспечения двух других, заданных априори.

Тем не менее, ОНК обладает неустойчивостью, и при достаточно больших числах обусловленности матрицы **A** в модели (12) ОНК малоэффективны. Для обеспечения устойчивости решений линейных некорректно поставленных задач предложено использование метода усеченной оценки. Метод основан на привлечении метода главных компонент как линейной фильтрации оценок наименьших квадратов. Суть фильтрации заключается в таком действии на ОНК, которая бы существенно сузила эллипсоид рассеивания ОНК с помощью сжатия информации, содержащейся в матрице рассеивания, благодаря «усечению хвоста» спектра матрицы Фишера.

Пусть вместо (12) решается уравнение

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{y} + \Delta\mathbf{y}, \qquad (15)$$

где $\mathbf{y}$ – истинное значение; $\Delta\mathbf{y}$ – вектор значений «шума», компоненты которого распределены нормально $\Delta y_i \sim N(0, \sigma_i)$.

Тогда $\Delta\mathbf{y}$ является многомерной нормальной величиной с нулевым средним $\langle \Delta\mathbf{y} \rangle = 0$ и ковариационной матрицей $\sum = \mathrm{cov}(\Delta\mathbf{y})$.

Обозначив ОНК как $\hat{\mathbf{x}}$, определим соответствующую ей матрицу рассеивания

$$\Omega = ((\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})^{\mathrm{T}}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})).$$

Учитывая, что $\Omega = \mathbf{I}^{-1}$, где $\mathbf{I}$ – матрица Фишера, и проведем спектральное разложение

$$\mathbf{I} = \mathbf{VDV}^{\mathrm{T}},\ \mathbf{D} = diag(\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n),$$
$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \ldots \lambda_n > 0,$$

где $(\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n)$ – собственные значения матрицы Фишера; $\mathbf{V}$ – ортогональная матрица, в которой столбцы $(V_1, V_2, \ldots, V_n)$ задают направления главных осей эллипсоидальной области допустимых оценок некорректно поставленной задачи (15).

Произведем разложение ОНК по системе собственных векторов матрицы Фишера как

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{V}\hat{\mathbf{p}},$$

где $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \ldots, \hat{p}_n$ – главные компоненты ОНК. Отсекая «хвост» спектра матрицы Фишера, т.е. наименьшие собственные значения, вносящие наибольшую дисперсию в ОНК, и выбирая нужное количество главных компонент ν, после несложных преобразований получаем регуляризированное решение в виде усеченной оценки

$$\mathbf{x}_{tr} = \mathbf{V}_\nu \mathbf{V}^{\mathrm{T}} \hat{\mathbf{x}}. \qquad (16)$$

Методы, связанные с задачей оптимизациии

Конкретный метод оптимизации выбирается применительно к решаемой задаче из достаточно большой библиотеки подробно разработанных алгоритмов оптимизации.

Очевидно, что результаты многокритериальной оптимизации существенно зависят от выбора базового варианта объекта, т.е. точки. Предлагаем некоторые, связанные с этим рекомендации, а именно: реализовывать алгоритм, выполняя оптимальным образом построение расширяющихся от базовой точки областей первичных факторов с проверкой на каждом шагу справедливости ограничений (1). Эта базовая точка часто может быть определена из физических или практических соображений. Но существуют случаи, когда эта точка неизвестна и задача ее определения становится очень сложной.

Выбор базовой точки основывается на следующих соображениях. В качестве базовых следует выбирать такие точки пространства первичных факторов, у которых первой координатой служит одно из математических ожиданий случайных величин, описывающих распределение первого первичного фактора, второй – второго и т.д.

Статистическая обработка эмпирических данных

В силу многих случайных ситуаций при производстве и эксплуатации изделий, а также из-за нестабильности свойств конструкционных материалов их характеристики можно принять за случайные величины. Тогда по реализациям этих величин можно получить оценки истинных значений, например, методом доверительных интервалов, если известны законы распределения.

Долгое время наиболее удачной аппроксимацией было принято считать нормальное распределение или его модификации, для которых и применимы большинство статистических критериев и оценок. Однако в последнее время появилось много практических задач, указывающих на то, что нормальный закон распределения вероятностей не обладает той универсальностью, которой ему приписывали раньше. Ситуации, возникающие при изучении реальных процессов, свидетельствуют о том, что многие параметры объектов имеют отличающиеся от нормальных, а зачастую даже не одновершинные функции плотностей вероятностей. Поэтому в работе рассматриваются физическая сущность и новые технические схемы таких вероятностных процессов [4]. Эти схемы основаны на представлении каждой выборки реализаций случайной величины в виде совокупности подвыборок, объединенных некоторыми доминирующими причинами разброса значений исследуемой величины. При-меры таких ситуаций показывают, что иногда они описываются линейными комбинациями Гауссовых функций с некоторыми весовыми коэффициентами ρ_i, определяющими значимость вклада каждой выборки в общую выборку реализаций:

$$f(x,\ \mu_i,\ \sigma_i,\ \rho_i) = \\ = (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^{k} \sigma_i^{-1} \rho_i \exp\left[-(x-\mu_i)^2 (2\sigma_i^2)^{-1}\right], \\ i = 1,2,\ldots,k,\ \ 2 \le k < \infty, \quad (17)$$

где μ_i – оценка математического ожидания i-й выборки; σ_i – ее выборочная дисперсия.

В работе [4] приводятся различные способы определения неизвестных параметров функции (17) в зависимости от выбранного критерия приближения гистограмм и необходимой точности расчетов. Найденные значения позволяют записать интегральную функцию, а по ней – уравнение для определения допустимого значения $[x]$:

$$\gamma = P\{x < [x]\} = F^x([x]) = \\ = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^{k} \sigma_i^{-1} \rho_i \int_{-\infty}^{[x]} \exp\left[-(x-\mu_i)^2 (2\sigma_i^2)^{-1}\right] dx.$$

При обработке экспериментальных данных важно иметь обоснованную методику построения гистограмм, чтобы избежать, с одной стороны, нивелирования распределения при слишком большом шаге разбиения, а с другой – проявления малозначительных подвыборок при слишком малом шаге. Предлагается начинать построение гистограмм с минимального, сравнимого с точностью измерения шага, и аппроксимировать гистограмму функцией вида (17) с количеством слагаемых, равным количеству интервалов разбиения. Определенные весовые коэффициенты ρ_i, меньшие заданной вероятности $\alpha = 1 - \gamma$, укажут малозначительные подвыборки, объединяемые с соседними. Затем шаг разбиения увеличивается, и вновь производится та же процедура, пока все весовые коэффициенты не станут сравнимыми с α.

Описанный метод обработки статистической информации позволяет, во-первых, вскрыть внутреннюю структуру данных эксперимента и, во-вторых, определяет методологию работы с этими данными, в частности, при изучении производственных погрешностей, составлении нормативной документации, а также при разработке оперативных методов контроля и сравнения качества объектов.

В случае полимодального распределения вероятностей измеренных свободных членов системы уравнений (15) обоснован переход от таких систем к k системам уравнений с нормально распределенными векторами свободных членов, где k – наибольшее число гауссиан, полученных при декомпозиции смеси гауссовых распределений, аппроксимирующей эмпирические данные измерений параметра.

При построении областей при расширении от базовой точки проверка выполнения ограничений (1) на каждом шагу оптимизации процесса может осуществляться на множестве равномерно распределенных точек, принадлежащих к построенной области. Но в некоторых практических ситуациях эта проверочная техника может быть упрощена. Например, когда частные производные функций (3) имеют неизменные знаки, проверку можно осуществлять только в угловых точках области.

Поскольку количество базовых точек может быть больше одной, естественно реализовывать алгоритм оптимизации для каждого возможного базового варианта отдельно и выбирать наиболее оптимальный из них с точки зрения критериев (1).

Анализ результатов и выводы

Предложенный подход, формализующий в общем виде проблему оптимального обеспечения требований ТУ на выходные характеристики изделия или технологического процесса, позволяет:

– устанавливать взаимосвязь задач выбора базового варианта объекта, определяемого номинальными значениями его первичных факторов, и назначения конструкторских и технологических допусков на них, исходя из ограничений, накладываемых в ТУ на выходные параметры объекта, чем, в частности, предусматривается исследование возможности отбора уже известных, отработанных узлов, процессов, технологических решений для использования в создаваемом изделии или технологическом процессе;

– ставить и решать задачу синтеза конструкторских вариантов изделий, обладающих оптимальной чувствительностью к производственным и эксплуатационным отклонениям их первичных факторов, т.е. связать непосредственно выбор базового варианта объекта с особенностями его практической реализации;

– формализовать большое количество важных разнородных задач проектирования, конструирования, производства и испытаний независимо от отрасли техники.

Из этих же условий на этапах проектирования, изготовления и доводки изделий можно получить рекомендации по назначению допусков как на первичные факторы объекта в целом, так и его отдельных узлов, а также по селективной сборке изделий, группируя входящие в сборку элементы и материалы по фактическим значениям характеристик так, чтобы образовывались наиболее благоприятные сочетания.

На этапе же серийного производства решение обратной множественной задачи с учетом статистической природы параметров позволяет прогнозировать уровень брака продукции и определять условия, необходимые для обеспечения требований ТУ.

Этот же подход позволяет решать и другого типа проблемы. Например, выяснить, возможно ли вообще в данной конструкции или при данных технологических режимах достичь желаемого результата по всем или по ряду выходных параметров, т.е. существует ли решение соответствующей множественной обратной задачи. Если оно не существует или лежит за разумными с точки зрения конструктора или технолога пределами, то это означает неспособность данного объекта осуществить требования ТУ и возникает необходимость поиска принципиально новых конструкторских или технологических решений.

В такой постановке можно решать задачу не только для изделия в целом, но и для отдельных его узлов. Таким образом, рассматриваемый подход является естественным отражением множества реальных ситуаций проектирования, создания и эксплуатации изделий.

Для проверки универсальности изложенной теории множественная обратная задача была поставлена и решена для различных отраслей техники: обеспечения прочности и герметичности элементов электроники [5]; снижения до заданного уровня виброактивности газотурбинных двигателей и турбонасосных агрегатов [6]; назначения обоснованных допусков на остаточные дисбалансы при балансировке и сборке роторов [4]; разработки методов балансировки гибких роторов [7].

Каждый из названных примеров достаточно сложен и требует для своего описания много места. Поэтому в данной работе этот подход иллюстрируется кратким описанием примера по повышению стабильности выходных параметров изделий вторичной радиолокации – самолетных ответчиков.

Пример применения разработанного подхода

Самолетный ответчик (СО) предназначен для работы с радиолокационными системами, которые входят в систему управления воздушным движением. Он обеспечивает автоматическую выдачу радиолокационным системам информации о координатах самолета, бортовом номере, барометрической высоте полета, а также сигналах индивидуального распознавания и аварии. СО-69 устанавливается на гражданских и военных самолетах, например, МиГ-23, МиГ-25, МиГ-27, МиГ-29, МиГ-31, Ту-142, Ту-95, Як-40, Л-410, АН-26, вертолет МИ-26.

Во время эксплуатации нередко мощность СО не отвечала ТУ и падала ниже 700 Вт. Поэтому в данной задаче под повышением стабильности выходных параметров подразумевалось гарантирование стабильности мощности выходного ВЧ-сигнала, т.е. выполнение требований ТУ на эту исходную характеристику в течение всего срока эксплуатации. Для этого необходимо было выявить первичные конструкторские и технологические факторы механической природы, влияющие на величину мощности исследуемого СО, и построить математическую модель зависимости выходной характеристики от этих факторов, а также найти область работоспособности ответчика, т.е. область допустимых значений первичных факторов, гарантирующих выполнение ТУ для СО.

Получение эффективной математической модели

Мощность выходного ВЧ-сигнала формируется в приемопередатчике основного блока СО-69, а точнее в предназначенном для генерирования ВЧ-импульсов в дециметровом диапазоне генераторе СВЧ 2081401 передатчика 2016140. Генератор СВЧ содержит два независимых каскада: автогенератор (задающий генератор – ЗГ) и усилитель мощности (УМ). При этом известно, что мощность выходного ВЧ-сигнала представляется в виде произведения двух функций

$$U = \varphi_1(\mathbf{x}) \cdot \varphi_2(\mathbf{x}), \qquad (18)$$

где φ_1, φ_2 – неизвестные функции, которые моделируют ЗГ и УМ соответственно.

При этом конструкция и технология сборки ответчика не предусматривает промежуточный контроль этих выходных характеристик отдельных каскадов. Возможны только измерения значений выходной характеристики самого генератора при произвольных наборах значений первичных факторов как ЗГ, так и УМ. С учетом такой многокаскадности генератора СВЧ для моделирования мощности был использован метод построения гибридных статистически детерминированных моделей [8].

Измеренные значения моделируемой мощности при некоторых фиксированных значениях первичных факторов ЗГ ($\mathbf{x}_{10}$) и УМ ($\mathbf{x}_{20}$) равны

$$U_0 = \varphi_{10} \cdot \varphi_{20}, \qquad (19)$$

где $\varphi_{i0} = \varphi_i(\mathbf{x}_{i0})$, $i = 1,2$ – фиксированные, но не известные значения функции φ_i.

Образуем вспомогательные функции вида

$$U_1 = \varphi_1(\mathbf{x}_1) \cdot \varphi_{20},\ U_2 = \varphi_{10} \cdot \varphi_2(\mathbf{x}_2), \qquad (20)$$

из чего следует, что

$$\varphi_1(\mathbf{x}_1) = U_1(\mathbf{x}_1)/\varphi_{20},\ \varphi_2(\mathbf{x}_2) = U_2(\mathbf{x}_2)/\varphi_{10}. \qquad (21)$$

Подставив (21) в (18), получим

$$U = U_1(\mathbf{x}_1) \cdot U_2(\mathbf{x}_2)/(\varphi_{10} \cdot \varphi_{20}),$$

откуда с учетом (19) находим

$$U = U_1(\mathbf{x}_1) \cdot U_2(\mathbf{x}_2)/U_0. \qquad (22)$$

Для получения статистически-детерминированной модели вида (22) необходимо построить полиномиальные модели для функций $U_i(\mathbf{x}_i)$, $i = 1,2$ путем реализации $2^{l_1} + 2^{l_2}$ экспериментов по схеме ПФЭ (l_1, l_2 – количество первичных факторов для ЗГ и УМ соответственно). С этой целью в первую очередь необходимо определить те первичные факторы ЗГ и УМ, которые должны быть учтены в этих моделях.

На основании экспертного опроса специалистов, имеющих опыт предыдущих исследований конструкции технологии сборки ответчиков, было установлено, что значительно влиять на выходную характеристику U – мощность выходного ВЧ-сигнала, могут следующие параметры деталей и узлов каждого каскада генератора передатчика.

Параметры деталей и узлов ЗГ:

– усилие прижатия анодного плунжера к анодной цанге ЗГ q_1;

– диаметр корпуса катодно-сеточного контура ЗГ q_2;

– диаметр стакана катодно-сеточного контура ЗГ q_3;

– среднее арифметическое отклонений профиля поверхности стакана электронно-сетевого контура ЗГ q_4;

– среднее арифметическое отклонение профиля поверхности по кругу трубки анодной цанги ЗГ q_5;

– диаметр стакану анодного контуру ЗГ q_6.

Параметры деталей и узлов УМ:

– усилие прижатия анодного плунжера к анодной цанге ЧП Q_1; Q_2;

– диаметр корпуса катодно-сеточного контура УМ Q_2;

– диаметр стакана катодно-сеточного контура УМ Q_3;

– среднее арифметическое отклонений профиля поверхности корпуса стакана катодно-сеточного контура УМ Q_4 (требуется уточнение этих параметров).

Уровни и интервалы варьирования первичных факторов представлены в табл. 1. Искомая функция U_1 имеет вид

$$U_1 = 452{,}81 + 6{,}56x_1 + 11{,}56x_3 + \\ + 15{,}94x_4 + 49{,}06x_5 + 163{,}44x_6. \qquad (23)$$

Аналогично строится вспомогательная функция

$$U_2 = \varphi_{10} \cdot \varphi_2 \qquad (24)$$

с использованием кодированных факторов $Z_1, \ldots, Z_4$.

Полученная адекватная модель имеет следующий вид:

$$U_2 = 476{,}87 - 5{,}62Z_1 + 14{,}37Z_2 + \\ + 68{,}13Z_3 + 159{,}37Z_4 - 10{,}62Z_1Z_4. \qquad (25)$$

Выражение для мощности через абсолютные переменные см. табл. 1:

$$U = (-622{,}537 + 0{,}0094q_2 + 1651{,}4286q_3 + \\ + 3643{,}4286q_4 + 49{,}06q_5 + 351{,}4839 \cdot 10^6 q_6) \cdot \\ \cdot (-46{,}9037 - 802{,}8571Q_1 + 586{,}5306Q_2 + \\ + 2780816{,}33Q_3 + 0{,}2277Q_4 - \\ - 0{,}0152 \cdot 10^{-5}(Q_1 - 0{,}03201) \cdot (Q_4 - 6)).$$

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования первичных факторов

№ пп	Первичные факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		верхний	*нижний*	*основной*	
1	2	3	4	5	6
1	$q_1 \cdot 10^{-2}$, H	350	150	250	100
2	$q_2 \cdot 10^3$, м	33,100	33,030	33,065	0,035
3	$q_3 \cdot 10^3$, м	32,02	32,02	32,01	0,01
4	$q_4 \cdot 10^6$, м	2,50	10,00	6,25	3,75
5	$q_5 \cdot 10^6$, м	2,50	10,00	6,25	3,75
6	$q_6 \cdot 10^3$, м	31,28	31,14	31,21	0,07
7	$Q_1 \cdot 10^{-2}$, H	350	150	250	100
8	$Q_2 \cdot 10^3$, м	33,100	33,030	33,065	0,035
9	$Q_3 \cdot 10^3$, м	32,02	32,00	32,01	0,01
10	$Q_4 \cdot 10^6$, м	2,50	10,00	6,25	3,75

Выявление, анализ и пути устранения влияния основных дестабилизирующих первичных факторов

Проведенные исследования показали, что факторами, которые существенно влияют на моделируемую функцию мощности выходного ВЧ-сигнала, являются следующие параметры деталей и узлов ЗГ и УМ: усилие прижатия анодного плунжера к анодной цанге ЗГ q_1; среднее арифметическое отклонений профиля поверхности стакана электронно-сетевого контура ЗГ q_4; усилие прижатия анодного плунжера к анодной цанге ЧП Q_1; диаметр корпуса катодно-сеточного контура УМ Q_2; диаметр стакана катодно-сеточного контура УМ Q_3.

С целью исследования возможности изменения значений этих факторов в процессе эксплуатации и их дестабилизирующего воздействия на величину выходной мощности на заводе-изготовителе было проведено совещание специалистов, где было установлено следующее.

В диапазоне СВЧ в качестве колебательных систем применяются объемные резонаторы, в которых на мощность существенно влияет переходное сопротивление контактов поршня с корпусом резонатора и с анодной цангой. Для обеспечения надежного контакта необходимо иметь внутреннюю поверхность корпуса резонатора и внешнюю – анодной цанги, достаточно высокого класса чистоты. Однако при частой перенастройке контура резонатора возникает неоднородная выработка поверхности контактов через стирание слоя серебра, которым покрыты плунжеры, что приводит к большому разбросу величины переходного сопротивления контактов по длине их перемещения. Поэтому имеют место значительные отклонения электрических параметров резонатора, в частности, выходной мощности в процессе эксплуатации.

Было установлено, что рассмотренные приоритетные факторы могут дестабилизировать величину указанной мощности. Исследование же возможности поддержки значений указанных факторов на определенном уровне в течение всего срока эксплуатации показало, что обеспечение указанных требований не устраняет истирания тонкого слоя серебра на поверхности плунжера. Кроме того, решение обратной задачи синтеза допусков на конструкцию СО для модели $U(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4)$ показало, что величина допусков должна быть настолько мала, что их невозможно обеспечить при заданной технологии производства. В связи с этим дальнейшие меры по обеспечению указанных требований на рассмотренные дестабилизирующие факторы были признаны малоэффективными, и принято решение о необходимости доработки конструкции СО.

Конструкция резонатора была упрощена путем введения диэлектрической колбы, диэлектрической основы и серебряных сегментов, поскольку при использовании диэлектрического стакана отпадает необходимость центрирования поршня, снижаются требования к классу точности изготовления поверхности металлической колбы и корпуса резонатора, а исключение непосредственного контакта поршня с корпусом резонатора позволяет снизить требования к чистоте внутренней поверхности корпуса резонатора и металлического стакана. В новой бесконтактной конструкции СО удалось устранить дестабилизирующие факторы, влияющие на величину мощности выходного ВЧ-сигнала.

Обеспечение заданного уровня мощности выходного ВЧ-сигнала в модифицированной конструкции СО

Для модифицированной конструкции СО была построена гибридная статистически-детерминированная модель. Экспертный опрос специалистов и опыт предыдущих исследований выявили, какие первичные факторы наиболее влияют на выходную характеристику U – мощность выходного ВЧ-сигнала в новой конструкции СО.

В результате была построена модель новой конструкции и получен следующий вид зависимости мощности U от приведенных факторов:

$$U = (8{,}8505 + 0{,}1094 q_1 - 0{,}028 \cdot 10^6 q_4) \cdot \cdot (22509{,}043 + 3{,}12 \cdot Q_1 + + 124857 Q_2 - 812000 \cdot Q_3). \quad (26)$$

Установленные зависимости мощности выходного ВЧ-сигнала от первичных факторов ответчика позволяют ставить обратную задачу определения таких допусков на эти факторы, при которых обеспечивалось бы выполнение условия на рассматриваемую исходную характеристику:

$$U \ge U_0. \quad (27)$$

где U_0 – минимальное значение мощности, которое соответствует требованиям ТУ.

Рассмотренная множественная обратная задача может быть сформулирована следующим образом. При заданных номинальных значениях первичных факторов $\mathbf{x}_0 = (q_{20},\, q_{40},\, Q_{10},\, Q_{20},\, Q_{30})$ необходимо определить такие допустимые их отклонения $\{\delta_i\}_{i=1}^5$ от номинальных значений, чтобы в полученном параллелепипеде

$$\mathbf{P}_5 = \left\{ \mathbf{X} = [x_i]_{1\times 5} \in \mathbb{R}^5 :\ x_{i0} - \delta_i/2 < x_i \le x_{i0} + + \delta_i/2,\ i = \overline{1,5} \right\}$$

выполнялось условие (27) для выходной характеристики.

Множество частных критериев может быть сформулирована в виде

$$\min(-\delta_i)\ \forall i \equiv \overline{1,5}.$$

Для сведения данной многокритериальной задачи к однокритериальной была использована линейная свертка критериев вида

$$F = \sum_{i=1}^{5} c_i \delta_i,\ c_i \ge 0,\ \sum_{i=1}^{5} c_i = 1$$

где c_i – нормированные положительные числа, определяемые из производственных или экономических соображений.

Итак, имеем задачу условной опримизации

$$\min_{\{\delta_i\}_{i=1}^5} \left(-\sum_{i=1}^{5} c_i \delta_i \right)$$

при известных $\mathbf{x}_0 = [x_{0i}]_{1\times 5}$ и заданных ограничениях на первичные факторы и выходную характеристику ответчика, задаваемых системой неравенств:

$$5 \le q_1 \le 45 \text{ кН};$$
$$5 \le q_4 \le 20 \text{ мк};$$
$$5 \le Q_1 \le 45 \text{ кН};$$
$$32{,}995 \le Q_2 \le 33{,}135 \text{ мм};$$
$$31{,}91 \le Q_3 \le 32{,}11 \text{ мм};$$
$$U \ge 600 \text{ Вт}.$$

Для новой конструкции ответчика было проведено определение допусков на первичные факторы ответчика, номинальные значения которых приведены в табл. 2.

В результате получены следующие оптимальные значения первичных факторов СО:

$$2{,}11 \le q_1 \le 2{,}89 \text{ кН};$$
$$6{,}25 \le q_4 \le 20 \text{ мк};$$
$$50 \le Q_1 \le 45 \text{ кН};$$
$$33{,}01 \le Q_2 \le 33{,}12 \text{ мм};$$
$$31{,}93 \le Q_3 \le 32{,}09 \text{ мм}.$$

Полученные значения допусков, необхо-

Таблица 2

Номинальное значение первичных факторов СО

q_1, Н	q_4, м	Q_1, Н	Q_2, м	Q_3, м
$2{,}5\cdot10^4$	$6{,}25\cdot10^{-6}$	$2{,}5\cdot10^4$	$33{,}065\cdot10^{-3}$	$32{,}01\cdot10^{-3}$

димые для обеспечения заданной мощности ответчика, оказались приемлемыми для производителя, и в данной модифицированной конструкции с указанными допусками СО-69 успешно производится и эксплуатируется.

Заключение

Результаты проведенных исследований имеют конкретную прикладную направленность и позволяют:

– выбирать оптимальные базовые варианты объектов и составных узлов и деталей;

– назначать оптимальные экономически и технологически обоснованные значения допусков на функциональные параметры изготовляемых деталей и собираемых узлов;

– назначать оптимальные режимы выполнения технологических процессов сборки и регулировки объектов;

– диагностировать технологическое состояние объектов и их составных частей;

– идентифицировать реальные значения характеристик объектов и законы распределения погрешностей формирования параметров.

Решение этих задач позволяет сократить затраты и время на доводку изделий и контроль их качества во время эксплуатации, обоснованно, повысить технологичность процессов изготовления и сборки, исходя из задаваемых критериев, нормировать выходные параметры (характеристики качества) всего объекта и составляющих его узлов и деталей.

Список литературы

1. *Деньдобренко Б.Н.* О выборе системы электрических допусков радиоаппаратуры // Изв. вузов: Приборостроение. М., 1968. № 3. С. 1–8.
2. *Дунаев П.Ф., Леликов О.П.* Расчет допусков размеров. М.: Машиностроение, 1981. – 190 с.
3. *Шило Г.Н., Воропай А.Ю., Гапоненко Н.П.* Расчет и назначение допусков методом касательных // Изв. вузов: Радиоэлектроника. 2006. № 2. С. 43–52.
4. *Петренко А.И.* Основы автоматизации проектирования. К: Техніка, 1982. – 295 с.
5. *Абрамов О.В., Катуева Я.В., Назаров Д.А.* Оптимальный параметрический синтез по критерию запаса работоспособности // Проблемы управления. 2007. № 6. С. 64–69.
6. *Абрамов О.В.* Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности. М.: Наука, 1992. – 176 с.
7. *Назаров Д.Л.* Двоичная многоуровневая детализация элементов сеточного представления области работоспособности // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество» . 2010. Том 1. С. 337–341.
8. *Зайцев Г.Н., Любомудров С.А., Федюкин В.К.* Нормирование точности геометрических параметров машин: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 368 с.
9. *Кофанов Ю.Н., Шалумов А.С., Журавский В.Г., Гольдин В.В.* Математическое моделирование радиоэлектронных средств при механических воздействиях. М.: Радио и связь, 2000. – 226 с.
10. *Статников Р.Б., Матусов И.Б.* Многокритериальное проектирование машин. М.: Знание. 1989. – 47 с.
11. *Аудзе П.П., Эглайс В.О.* Новый подход к планированию многофакторных экспериментов // Вопросы динамики и прочности (Рига). 1977. Вып. 35. С. 104–107.
12. *Горошко А.В., Ройзман В.П.* Шляхи підвищення точності розв'язків зворотних задач//Вісник Хмельницького національного університету. 2013. № 6. С. 60–69.
13. *Горошко А.В., Ройзман В.П.* Представление и обработка статистических данных, не подчиняющихся унимодальным законам распределения // Машиностроение и инженерное образование. 2013. № 3. С. 56–77.
14. *A.V. Goroshko, V.P. Royzman, A. Bubulis, K.* Juzėnas.Methods for testing and optimizing composite ceramics-compound joints by solving inverse problems of mechanics // Journal of Vibroengineering. Vol. 16. Issue 5. 2014. P. 2178–2187.
15. *Горошко А.В., Ройзман В.П.* Исследование динамики и снижение виброактивности тур-

бонасосного агрегата путем решения обратных задач // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 1. С. 29–35.

16. *Ройзман В.П. Вайнгортин Л.Д.* А.С. МКИ 01 М 1/24. Способ определения динамических характеристик гибких роторов. 1980. № 729457. Бюл. № 15.

17. *Goroshko A., Royzman V., Pietraszek J.* Construction and practical application of hybrid statistically-determined models of multistage mechanical systems // Mechanics. 2014. Vol. 20. No. 5. C. 489–493.

Материал поступил в редакцию 18.02.15

ГОРОШКО
Андрей Владимирович

E-mail: **iftomm@ukr.net**
Тел.: **+380382728743**

Кандидат технических наук, доцент кафедры физики и электротехники Хмельницкого национального университета (Украина). Сфера научных интересов: обратные задачи в механике, прикладная статистика, диагностика технического состояния. Автор 70 научных статей, трех изобретений.

РОЙЗМАН
Вилен Петрович

E-mail: **royzman_V@mail.ru**
Тел.: **+380382728743**

Заслуженный деятель науки и техники Украины, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной механики Хмельницкого национального университета (Украина). Сфера научных интересов: балансировка роторов, прочность в электронике, вибрационная прочность. Автор трех монографий, 450 научных публикаций, 25 изобретений.