В.Г.Найденов, доктор технических наук,
старший научный сотрудник
А.Н.Щукин, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Методика планирования и проведения натурных экспериментов экстремального типа для реализации эффективной стратегии испытаний сложных информационно-управляющих систем

Приведенная в статье методика планирования и проведения натурных экспериментов экстремального типа для реализации эффективной стратегии испытаний сложных информационно-управляющих систем (ИУС) позволяет провести научно - обоснованное планирование и реализацию натурных экспериментов при испытаниях сложных ИУС. Методика позволяет определить оптимальные условия проведения испытаний, при которых следует оценивать ту или иную техническую характеристику сложной ИУС с целью достижения максимальной боевой или эксплуатационной эффективности испытываемой информационно-управляющей системы.

Введение

Особенность современного этапа развития отечественной экспериментально-испытательной базы по отработке сложных информационно-управляющих систем (ИУС) состоит в том, что основные ее технико-экономические показатели в рамках используемых схемных, программных и технологических решений достигли своих предельных значений. В этих условиях для дальнейшего повышения эффективности испытаний необходимо внедрение технологических инноваций [2].

Одной из таких технологических инноваций является дальнейшее развитие опытно-теоретического метода испытаний сложных технических систем, отдельные положения которого изложены в работах [9, 10].

В данной статье рассматривается одно из положений опытно-теоретического метода, касающееся научно-обоснованного планирования натурных испытаний сложных информационно-управляющих систем.

Как известно, планирование сложного натурного эксперимента включает в себя несколько следующих этапов [1, 4]:

обоснованный выбор вектора значимых факторов, влияющих на функционирование испытываемого образца информационно-управляющей системы и средств обеспечения ее испытаний;

выбор целевой функции планирования эксперимента (критерия оптимальности) и соответствующего ей законов изменения значимых факторов в эксперименте (плана эксперимента);

определение порядка реализации плана натурного эксперимента одним или несколькими средствами обеспечения испытаний;

обоснование адекватного алгоритма совместной обработки результатов внутрисистемных измерений образцов ИУС и результатов измерений, полученных от средств обеспечения испытаний, с получением искомых оценок технических характеристик испытываемых ИУС.

Реализация таких этапов однозначно определяет стратегию проведения натурных экспериментов при испытаниях сложных ИУС.

При определении целевой функции планирования натурных экспериментов необходимо учитывать, что задачи испытаний образцов сложных ИУС можно решать, поставив один из нескольких типов экспериментов.

Так, возможен экстремальный эксперимент, задача которого состоит в нахождении таких комбинаций значений составляющих

вектора F факторного пространства, при которых оцениваемая техническая характеристика испытываемой ИУС принимает следующие значения [7]:

максимальное или минимальное – при определении наилучших или наихудших условий функционирования испытываемой ИУС;

заданное в техническом задании на испытываемую ИУС, когда необходимо провести поиск наилучших сочетаний значений факторов вектора F, определяющих качество работы образца ИУС при заданных входных воздействиях.

Имеет также место натурный эксперимент по проверке конкретной статистической гипотезы о закономерности поведения той или иной технической характеристики сложной ИУС, а также может проводиться и отсеивающий эксперимент по выделению значимых и незначимых для той или иной характеристики сложной ИУС факторов входных воздействий и параметров испытываемой системы.

При планировании испытаний образцов ИУС наибольший интерес представляют эксперименты экстремального типа. Это связано с тем, что для проведения эффективных испытаний образцов ИУС необходимо знать конкретные значения факторов, при которых имеют место минимальное или максимальное значения оцениваемых технических характеристик ИУС. Поэтому эксперименты экстремального типа позволяют определить оптимальные условия проведения натурных экспериментов, когда наблюдается максимальная эффективность испытываемой сложной системы.

Такие виды экспериментов, применяемых при испытаниях сложных ИУС, в технической литературе описаны очень поверхностно. При этом в литературе не рассматривается обработка результатов таких натурных экспериментов, не рассматривается стратегия проведения повторных экспериментов для достижения оптимальных условий проведения испытаний, а также не приводятся решающие правила, позволяющие определить конкретные значения оптимальных условий проведения натурных испытаний образцов ИУС.

Поэтому целью этой статьи является разработка достаточно подробной методики планирования и проведения натурных экспериментов экстремального типа, описывающей процесс поиска оптимальных условий проведения натурных экспериментов и позволяющей организовать проведение эффективных испытаний образцов сложных ИУС.

Методический подход к планированию натурных экспериментов экстремального типа при испытаниях сложных ИУС

Известно, что качество проведения испытаний сложных ИУС зависит от ряда внешних по отношению к этой системе факторов, а также внутренних факторов и параметров, характеризующих такие системы.

Так, например, при испытаниях радиолокационных станций (РЛС) значимыми факторами и параметрами при оценке шумовой составляющей погрешности измерения станцией координат целей являются: отношение сигнал-шум на входе приемника, пространственное положение цели в зоне РЛС относительно точки ее стояния, скорость цели, эффективная отражающая поверхность (ЭПР) цели, дисперсия флюктуаций ЭПР цели, корреляционная функция ЭПР цели, длина волны РЛС, ширина дискриминационной характеристики РЛС, постоянная величина фильтра сглаживания результатов единичных измерений координат цели и т. д. [7].

Как видно, одна часть этих факторов непосредственно характеризует внутренние возможности РЛС, а другая часть определяет внешние параметры по отношению к испытываемой РЛС.

В математическом виде задача проведения натурного эксперимента экстремального типа при оценке параметра θ испытываемой сложной ИУС может быть записана в виде.

$$\text{Определить } F_{opt} = \underset{F \in \Phi}{Arg\,min}\, \tilde{\Theta}(F, b) \text{ или } F_{opt} = \underset{F \in \Phi}{Arg\,max}\, \tilde{\Theta}(F, b) \quad (1)$$

$$\text{при ограничениях } F_{kmin} \leqslant F_{kv} \leqslant F_{kmax}, \; k = \overline{1, K}, \quad (2)$$

где F – вектор значимых факторов, влияющих на значения оценок модели параметра испытываемой ИУС $(\tilde{\Theta})$;

Φ – область изменения вектора F;

b – вектор параметров модели $\tilde{\Theta}$ оцениваемой характеристики ИУС;

F_{kmin}, F_{kmax} – соответственно минимальное и максимальное натуральное значение фактора F_k;

K – количество значимых факторов.

Для случая проведения натурных экспериментов по оценке среднеквадратической погрешности оценки радиолокационной станцией вектора R координат цели $(\Xi_R=[\sigma_x \sigma_y \sigma_z]^T)$ математическая задача проведения эксперимента экстремального типа по эффективной оценке параметра Ξ_R испытываемой РЛС может быть записана в виде.

Определить $F_{opt}=\underset{F_{РЛС}\in\Phi_{РЛС}}{Arg\,min}\, Sp(diag\,\Xi_R)$ при ограничениях $F_{РЛС\ k\ min}\leqslant F_{РЛС\ k}\leqslant F_{РЛС\ k\ max}$, $k=\overline{1,K}$,

где $diag\,\Xi_R$ – диагональная матрица, построенная из элементов матрицы Ξ_R, а $Sp(diag\,\Xi_R)=\phi(F_{РЛС},b_{РЛС})$ – след этой диагональной матрицы;

$F_{РЛС}$ – вектор значимых факторов, влияющих на значение вектора Ξ_R;

$b_{РЛС}$ – вектор параметров модели погрешности оценки РЛС координат цели;

$F_{РЛС\ k\ min}$, $F_{РЛС\ k\ max}$ – соответственно минимальное и максимальное натуральные значения фактора $F_{РЛС\ k}$.

Задача (1) представляет собой нелинейную задачу математического программирования, решение которой может быть найдено путем итерационного процесса поиска оптимального значения вектора факторов F, при котором наблюдается экстремальное значение оцениваемой характеристики сложной ИУС.

Важным этапом планирования натурных экспериментов при испытаниях сложных ИУС является конкретизация состава вектора F значимых факторов и параметров для каждой из оцениваемых характеристик ИУС. Эту задачу, как правило, решают в два этапа. Сначала, воспользовавшись результатами общетеоретических исследований разрабатываемой ИУС, следует выбрать предварительную структуру вектора F. Затем с учетом конкретных данных по испытываемой ИУС, а также результатов ранее проведенных по этой системе экспериментальных работ и моделирования проводится окончательное определение структуры вектора F.

При проведении натурных экспериментов экстремального типа в качестве целевой функции оптимизации $\tilde{\Theta}(F,b)$ выбирают модель, описывающую конкретную оцениваемую техническую характеристику испытываемой ИУС, на основании имеющейся априорной информации о такой информационно-управляющей системе.

Вид модели целевой функции необходимо выбирать, исходя из стратегии проводимого эксперимента, в качестве которой в нашем случае, является возможность предсказывать направление проведения дальнейших повторных натурных экспериментов с целью минимизации или максимизации целевой функции эксперимента.

При этом в некоторой области, в которую входят и координаты выполненных экспериментов, предсказанное с помощью модели целевой функции значение оцениваемой характеристики не должно отличаться от фактического значения больше, чем на некоторую заранее заданную величину. В этом случае такая модель называется адекватной.

Исходя из отмеченной выше цели эксперимента, для описания целевой функции можно использовать линейную регрессионную модель вида

$$\tilde{\Theta}(F,b)=b_0+\sum_{k=1}^{K} b_k F_k+\sum_{k\neq d} b_{kd} F_k F_d+b_{dg} F_k F_d F_g, \qquad (3)$$

где K – количество значимых факторов;

b_0, b_{kd}, b_{kdg} – коэффициенты регрессионной модели.

По статистической информации, полученной в результате проведения многофакторного эксперимента, могут быть с использованием метода наименьших квадратов получены оценки коэффициентов регрессионной модели (3). Кроме того, с использованием методов оптимизации первого порядка можно определить стратегию проведения дальнейших натурных экспериментов.

Следующим важным этапом реализации стратегии натурных экспериментов экстремального типа является построение плана проведения многофакторного эксперимента.

Если при планировании многофакторного эксперимента предусматривается осуществлять все возможные и неповторяющиеся комбинации, то в этом случае имеет место планирование полного факторного эксперимента. На практике часто можно ограничиться реализацией матрицы планирования, содержащей лишь часть полного эксперимента. При этом может быть сокращено количество натурных экспериментов в ущерб точности оценки коэффициентов регрессионной модели.

При построении ортогонального плана многофакторного эксперимента необходимо провести нормирование значимых факторов, то есть перевести натуральные их значения $(F_k, k=\overline{1,K})$ в безразмерные величины $(f_k, k=\overline{1,K})$. Преобразование натуральных значений факторов в безразмерные величины осуществляется с помощью операции нормирования факторов [1, 6]:

$$f_k=\frac{F_k-F_{0k}}{\Delta F_k},\ k=\overline{1,K} \qquad (4)$$

где $F_{0k}=0{,}5\left(F_k^{(H)}+F_k^{(B)}\right)$ – основой уровень k-го фактора;

$\Delta F_k=0{,}5\left(F_k^{(B)}-F_k^{(H)}\right)$ – интервал варьирования фактора F_k в натуральных единицах;

$F_k^{(B)}$, $F_k^{(H)}$ – соответственно верхнее и нижние натуральное значения k-го фактора при построении плана факторного эксперимента.

В этом случае, при изменении фактора F_k в пределах от $F_k^{(H)}$ до $F_k^{(B)}$ значение f_k изменяется в пределах от -1 до +1. Упорядоченная совокупность численных значений факторов, соответствующая условиям проведения опыта, рассматривается, как точка факторного пространства, координатные оси которого соответствуют факторам.

Для плана полного факторного экспериментов число N всех неповторяющихся комбинаций из K рассматриваемых независимых переменных, имеющих по два уровня, будет равно $N=2^K$. Так, матрица планирования для сочетаний различных уровней независимых переменных при $K=3$ будет иметь вид, представленный в таблице 1.

В случае, когда взаимодействия второго и выше порядка отсутствуют или малы, целесообразно реализовать матрицу планирования, содержащую лишь часть полного факторного эксперимента, т.е. провести дробный факторный эксперимент.

Правильно выбранный дробный факторный эксперимент может существенно сократить число планируемых наблюдений.

Так, пусть, например, рассматривается уравнение регрессии для трех факторов. Очевидно, что при построении полного факторного эксперимента необходимо было бы предусмотреть проведение восьми опытов. Если же приравнять f_3 двойному взаимодействию $f_1 f_2$, то число опытов можно свести к четырем, что соответствует линейному уравнению регрессии вида:

$$\tilde{\Theta}(F,b)=b_0+b_1 f_1+b_2 f_2+b_3 f_3,$$

с матрицей планирования, представленной в таблице 2.

При использовании дробных факторных планов в зависимости от наличия предварительных сведений можно получить полуреплики, сокращающие вдвое число опытов по сравнению с полным факторным экспериментом, или четверть реплики, уменьшающие число опытов в 4 раза, и т.д. Конечно, качество оценки модели оцениваемой характери-

стики (функции отклика), получаемой с помощью дробного факторного эксперимента, зависит от правильности априорной информации, т.е. от правильности списка включаемых в модель факторов и их взаимодействий. Если какая-либо переменная, влияющая на функцию отклика, не включена в этот список, обычно не удается построить работоспособную модель. Последнее обстоятельство должно быть выявлено при анализе качества найденной модели. В ходе этого анализа может быть принято решение о построении более сложной и точной модели при соответствующем увеличении числа опытов.

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента при *K=3*

Номер опыта	Значения факторов и функции отклика								
	f_0	f_1	f_2	f_3	$f_1 f_2$	$f_1 f_3$	$f_2 f_3$	$f_1 f_2 f_3$	$\hat{\tilde{\Theta}}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	$\hat{\tilde{\Theta}}_1$
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	$\hat{\tilde{\Theta}}_2$
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	$\hat{\tilde{\Theta}}_3$
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	$\hat{\tilde{\Theta}}_4$
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$\hat{\tilde{\Theta}}_5$
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	$\hat{\tilde{\Theta}}_6$
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	$\hat{\tilde{\Theta}}_7$
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$\hat{\tilde{\Theta}}_8$

Обработка результатов факторных экспериментов при определении оптимальных условий проведения испытаний сложных информационно-управляющих систем

Начальным этапом обработки результатов факторных экспериментов является оценивание коэффициентов регрессионной модели оцениваемого параметра ИУС по результатам проведения факторных экспериментов.

При обработке экспериментальных данных, полученных при проведении факторных экспериментов, может быть применен метод наименьших квадратов как эффективный и простой способ получения оценок коэффициентов уравнения регрессии [1, 6]. При этом должны выполняться следующие предпосылки: независимые переменные f_i, входящие в уравнение регрессии, должны достаточно точно поддерживаться на определенных уровнях, а наблюдаемые значения функции отклика $\hat{\tilde{\Theta}}_1$, $\hat{\tilde{\Theta}}_2$, ..., $\hat{\tilde{\Theta}}_N$ по данным *N* опытов представляют собой независимые и нормально распределенные случайные величины.

Таблица 2 – Матрица проведения дробного факторного эксперимента

Номер опыта	Значения факторов				Номер опыта	Значения 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

Полученный в результате опытов ограниченный статистический материал дает возможность определить лишь оценки $\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$, ..., $\hat{b}_k$ теоретических коэффициентов регрессии b_0, b_1, ..., b_k, справедливых для некоторой гипотетической совокупности состоящей из всех мыслимых опытов.

Тогда уравнение регрессии, полученное на основании N опытов, записывается следующим образом:

$$\hat{\tilde{\Theta}}(F,b)=\hat{b}_0+\hat{b}_1 f_1+\ldots+\hat{b}_K f_K, \qquad (5)$$

где $\hat{\tilde{\Theta}}(F,b)$ – оцененная гиперплоскость в области проведения факторного эксперимента, позволяющая аппроксимировать в этой области модель оцениваемой характеристики ИУС.

Согласно методу наименьших квадратов [1, 3] находятся такие значения оценок $\hat{b}_K$ величин b_K, которые минимизируют сумму квадратов отклонений (невязок) ε_n опытных точек от величин, предсказанных регрессионным уравнением (5), то есть которые минимизируют функционал вида

$$G=\sum_{n=1}^{N}\varepsilon_n^2=\sum_{n=1}^{N}\left(\hat{\tilde{\Theta}}_n-\sum_{k=0}^{K}\hat{b}_k f_{kn}\right)^2.$$

Условия минимальности для суммы квадратов отклонений находятся путем приравнивания нулю частных производных от G по параметрам $\hat{b}_K$.

$$\frac{\partial G}{\partial \hat{b}_1}=\frac{\partial}{\partial \hat{b}_1}\left(\sum_{n=1}^{N}\left(\hat{\tilde{\Theta}}_n-\sum_{k=0}^{K}\hat{b}_k f_{kn}\right)^2\right)=0;$$

$$\frac{\partial G}{\partial \hat{b}_2}=\frac{\partial}{\partial \hat{b}_2}\left(\sum_{n=1}^{N}\left(\hat{\tilde{\Theta}}_n-\sum_{k=0}^{K}\hat{b}_k f_{kn}\right)^2\right)=0;$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$\frac{\partial G}{\partial \hat{b}_K}=\frac{\partial}{\partial \hat{b}_K}\left(\sum_{n=1}^{N}\left(\hat{\tilde{\Theta}}_n-\sum_{k=0}^{K}\hat{b}_k f_{kn}\right)^2\right)=0.$$

Проведя соответствующие преобразования, получим уравнение в матричной форме для определения величин $\hat{b}_K$ в виде

$$X^T X\hat{B}=X^T\hat{\tilde{\Theta}}.$$

Откуда получим выражение для вектора $\hat{B}$ оценок коэффициентов уравнения регрессии в виде [8]

$$\hat{B}=\left(X^T X\right)^{-1}X^T\hat{\tilde{\Theta}}, \qquad (6)$$

где X – матрица факторного эксперимента;

$\hat{\tilde{\Theta}}$ – вектор результатов оценок конкретной характеристики ИУС в точках плана факторного эксперимента.

Важным этапом обработки результатов многофакторного эксперимента является проверка регрессионной модели на адекватность.

Для проверки регрессионной модели на адекватность изучается разность между экспериментальным значением функции отклика и значением, предсказанным по уравнению регрессии в некоторых точках факторного пространства. В качестве этих точек могут быть взяты как точки плана, так и добавочные проверочные точки.

Так, адекватность модели может быть проверена по критерию χ^2. Рассчитанные значения критерия χ^2 при одинаковом числе повторных наблюдений во всех точках плана определяются по формуле [3, 6]

$$\chi^2=\frac{R\sum_{j=1}^{2K}\left(\dddot{\Theta}_{Rj}-\tilde{\Theta}_j\right)^2}{\sigma_2}\{\Theta\}, \qquad (7)$$

где $\dddot{\Theta}_{Rj}$ – среднее арифметическое значение отклонения измерений характеристики ИУС в R параллельных опытах в j-ой точке плана эксперимента;

$\tilde{\Theta}_j$ – предсказанное по уравнению регрессии значение отклика в этом опыте в j-ой точке плана эксперимента;

$\sigma^2\{\Theta\}$ – дисперсия ошибки воспроизводимости эксперимента по оценке характеристики Θ сложной ИУС.

Значение дисперсии $\sigma^2\{\Theta\}$ оценивается по следующей формуле:

$$\sigma^2\{\Theta\}=\frac{\sum_{n=1}^{N}\sum_{j=1}^{2K}\left(\tilde{\Theta}_{nj}-\dddot{\Theta}_{Rn}\right)^2}{N(R-1)},$$

где $\tilde{\Theta}_{nj}$ – значения оценки модели характеристики ИУС в j-ом опыте для n-ой строки многофакторного эксперимента;

N – количество строк в многофакторном эксперименте.

Гипотеза адекватности модели отвергается, если рассчитанное согласно (7) значение критерия χ^2 превосходит табличное $\chi^2(\alpha,\beta)$ для выбранного значения значимости α и β степеней свободы.

Проверка коэффициентов уравнения регрессии на значимость для каждого коэффициента проводится независимо и может быть осуществлена по *t*-критерию Стьюдента.

Для проверки значимости *k*-го коэффициента по *t*-критерию используют следующую формулу [3]:

$$t_k = \frac{[\tilde{b}_k]}{\sigma\{b_k\}}, \qquad (8)$$

где $\tilde{b}_k$ – оценка *k*-го коэффициента уравнения регрессии;

$\sigma\{b_k\}$ – дисперсия оценки *k*-го коэффициента уравнения регрессии, которая определяется по следующей формуле

$$\sigma^2\{b_k\} = \frac{\sigma^2\{\Theta\}}{\sum_{u=1}^{N} \chi_{ku}^2}, \quad k=\overline{1,K}. \qquad (9)$$

В формуле (9) χ_{ku} – величина, расположенная на пересечении *k*-го столбца и *u*-й строки матрица планирования эксперимента.

В этом случае коэффициент значим, если рассчитанное согласно (8) значение t_k -критерия превосходит критическое табличное значение $t(\alpha_1, \beta_1)$ при заданном α_1 и соответствующем числе степеней свободы β_1.

В процессе испытаний сложных ИУС важное значение имеет правильное определения стратегии проведения повторных многофакторных экспериментов при выборе оптимальных условий оценки характеристик таких систем.

Для нахождения оптимальной стратегии проведения таких многофакторных экспериментов наиболее предпочтительным является метод крутого восхождения.

Предложенный в работе [11] и развитый в дальнейшем зарубежными и отечественными учеными метод крутого восхождения является одним из основных методов последовательной шаговой оптимизации. Крутое восхождение – это целенаправленное шаговое движение по поверхности функции отклика, которое обеспечивается использованием метода градиента в сочетании с дробным факторным экспериментом. Многофакторные планы, используемые для линейного описания поверхности отклика в локальной области, являются оптимальными и обеспечивают оценку градиента с минимальной дисперсией.

Так как аналитический вид функции отклика обычно заранее неизвестен, то поверхность отклика в окрестности некоторой точки $F^{(0)}(f_1^{(0)}, f_2^{(0)}, \ldots, f_k^{(0)})$ может быть аппроксимирована касательной гиперплоскостью вида

$$\tilde{\Theta}(F,b) = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 f_1 + \ldots + \hat{b}_K f_K, \qquad (10)$$

где $\hat{b}_0$ – значение функции отклика в точке $F^{(0)}$;

$\hat{b}_k = \frac{\delta\tilde{\Theta}}{\delta f_k}$ – определенные в точке $F^{(0)}$ наклоны гиперплоскости в направлении осей соответствующих аргументов f_k.

Скорость изменения функции отклика будет наибольшей в направлении вектора градиента оцениваемой гиперплоскости, а сам градиент определяется формулой

$$grad\,\tilde{\Theta} = \frac{\delta\tilde{\Theta}}{\delta f_1} l_1 + \frac{\delta\tilde{\Theta}}{\delta f_2} l_2 + \ldots + \frac{\delta\tilde{\Theta}}{\delta f_K} l_K,$$

где l_j – орты.

Таким образом, направление градиента совпадает с направлением наибольшего наклона гиперплоскости и определяется совокупностью величин $\frac{\delta\tilde{\Theta}}{\delta f_k}$, оценками которых являются коэффициенты $\hat{b}_k$. Это означает, что направление крутого восхождения полностью определяется коэффициентами уравнения гиперплоскости (10).

Изменение значений факторов $f_1, f_2, \ldots, f_k$ пропорционально оценкам коэффициентов уравнения регрессии $(\hat{b}_0, \hat{b}_1, \ldots, \hat{b}_k)$ обеспечивает движение вдоль линии крутого восхождения, максимизируя величину отклика, а пропорционально коэффициентам, взятым с обратными знаками, минимизируя величину функции отклика.

Эффективность метода крутого восхождения в значительной степени зависит от правильной организации движения по градиенту. Суще-

ственным является не только рациональный выбор точек вдоль направления крутого восхождения, но и стратегия их реализации. Выбор стратегии определяется стоимостью опытов, их длительностью и условиями эксперимента.

Одним из эффективных методов регулирования шага движения по градиенту изменения функции отклика считается метод, который работает при различных унимодальных траекториях восхождения [5]. В этом алгоритме регулирование длины шага проводится на основании информации, полученной с точек траектории восхождения в процессе движения. Решение об изменении каждого следующего шага здесь принимается на основании количественного изменения функции отклика на предыдущих этапах.

Согласно приведенному в [5] алгоритму, последующий шаг $h^{(q+1)}$ определяется как:

$$h^{(q+1)}=h^{(0)}+\frac{V_q}{V_{q-1}}h^{(q)}\phi\left(\frac{V_q}{V_0}\right), \qquad (11)$$

где $V_q=\frac{\tilde{\Theta}^{(q+1)}-\tilde{\Theta}^{(q)}}{h^{(q)}}$ – скорость изменения функции отклика на q-ом шаге проведения многофакторного эксперимента;

$h^{(q+1)}$ – наибольшая скорость до q-го шага;

$\phi\left(\frac{V_q}{V_0}\right)$ – функция от скорости изменения отклика на q-ом шаге по отношению к наибольшей скорости на предыдущих шагах;

$h^{(0)}$ – наибольшая величина шага до q-го этапа поиска экстремума.

Второе слагаемое в (11) состоит из двух сомножителей. Первый из них $\frac{V_q}{V_{q-1}}h^{(q)}$ обеспечивает увеличение шага, а второй $\phi\left(\frac{V_q}{V_0}\right)$ – имеет более сложный характер. Вдали от экстремальной области он почти не влияет на изменение шага, а при приближении к экстремуму обеспечивает его уменьшение. Близость к экстремуму обнаруживается сравнительно резким уменьшением V_q по отношению к V_0.

Примером функции ϕ может служить $\phi\left(\frac{V_q}{V_0}\right)=\sqrt[2p]{\frac{V_q}{V_0}}$. Выбор $p=3$ обеспечивает существенное уменьшение второго слагаемого в (11) после достижения $\frac{V_q}{V_0}<0{,}1$ вплоть до нуля.

Описанный алгоритм обеспечивает эффективное регулирование длинны шага почти на всех траекториях, быстро проходя удаленные от экстремума прямолинейные участки траектории и концентрируя экспериментальные усилия в наиболее интересной, близкой к экстремуму области.

Наличие в оптимизационных задачах (1) системы ограничений (2) приводит к усложнению алгоритма поиска экстремума гиперповерхности, характеризующую функциональную зависимость оцениваемой характеристики ИУС от значений факторов, влияющих на эту характеристику.

Так, характер гиперповерхности, характеризующей оцениваемую характеристику ИУС, зависит от вида совокупности одномерных функциональных зависимостей оцениваемой характеристики системы от значений факторов, влияющих на нее. В случае, если в области ограничений гиперповерхности $\left(F_{kmin}\leqslant F_k\leqslant F_{kmax},\ k=\overline{1,K}\right)$, рассматриваемые функциональные зависимости имеют унимодальный вид, то экстремум гиперповерхности будет находиться внутри области ограничений Ω задач вида (1). Если же такие функциональные зависимости будут иметь линейный, монотонно возрастающий или монотонно убывающий характеры, то экстремум гиперповерхности отклика будут лежать на одной или нескольких линейных границах области ограничений Ω.

В связи с этим при поиске экстремума гиперповерхности функции отклика с использованием метода крутого восхождения необходимо периодически проверять выполнение

условия минимального приближения центра области проведения текущего этапа многофакторного эксперимента $\left(F_q^{(0)}\right)$ к границам области ограничений Ω решаемой задачи.

При выполнении условия, заключающегося в том, что расстояние l_q от значения вектора $F_q^{(0)}$ до одной из границ зоны ограничений Ω не превышает допустимой величины ε_0, то есть $l_q \leqslant \varepsilon_0$, может быть принято решение об остановке процесса поиска экстремума гиперповерхности, характеризующей оцениваемую характеристику ИУС. При этом считается, что экстремум гиперплоскости лежит на одной из границ зоны ограничений Ω. Величина ε_0 зависит от требуемой точности оценки характеристики ИУС и величины варьирования факторов в процессе проведения итерационного многофакторного эксперимента.

Обобщенный алгоритм планирования и проведения натурных экспериментов экстремального типа при испытаниях сложных информационно-управляющих систем

Для более целостного понимания предлагаемой методики планирования и проведения натурных экспериментов экстремального типа для реализации эффективной стратегии испытаний сложных информационно-управляющих систем на рисунке 1 приведен обобщенный алгоритм планирования и проведения таких экспериментов.

Так, в блоке 1 алгоритма проводится ввод исходных данных, а в блоке 2 делается выбор типа и количества факторов и параметров, влияющих на величину оценки конкретной характеристики испытываемой ИУС.

В блоке 3 осуществляется формирование вектора *F* натуральных значений выявленных факторов и оценка области *Ф* изменения этого вектора, а в блоке 4 проводится нормирование рассматриваемых факторов в соответствии с выражением (4), а также выбор интервалов варьирования факторов.

Далее в блоке 5 проводится построение ортогонального плана дробного факторного эксперимента в виде полуреплики или четверти реплики от полного факторного эксперимента.

В блоке 6 делается выбор вида используемого уравнения регрессии, а также определение начального натурального значения вектора факторов $F^{(0)}$, откуда целесообразно начать поиск оптимальных условий проведения натурных экспериментов.

Затем в блоках 8...11 алгоритма проводится реализация *N* опытов дробного факторного эксперимента с возможностью в случае необходимости реализации повторных опытов.

Оценка коэффициентов $b_0, b_1, \ldots, b_k$ регрессионной модели гиперплоскости, аппроксимирующей в точке проведения эксперимента функцию отклика (оцениваемую характеристику сложной информационно-управляющей системы), проводится в блоке 12 алгоритма в соответствии с выражением (6).

Далее в блоке 13 проводится проверка оцененной регрессионной модели на адекватность с использованием критерия χ^2, а в блоке 14 алгоритма реализуется проверка коэффициентов $\hat{b}_0, \hat{b}_1, \ldots, \hat{b}_k$ регрессионной модели на значимость с использованием критерия Стьюдента.

В случае, если регрессионная модель не прошла проверку на адекватность, то в блоке 20 проводится корректировка плана факторного эксперимента с возможностью в случае необходимости изменения регрессионной модели оцениваемой характеристики ИУС. При выявлении незначимых коэффициентов в блоке 19 алгоритма проводится их исключение, что в последующем приводит к упрощению регрессионной модели и корректировке плана факторного эксперимента.

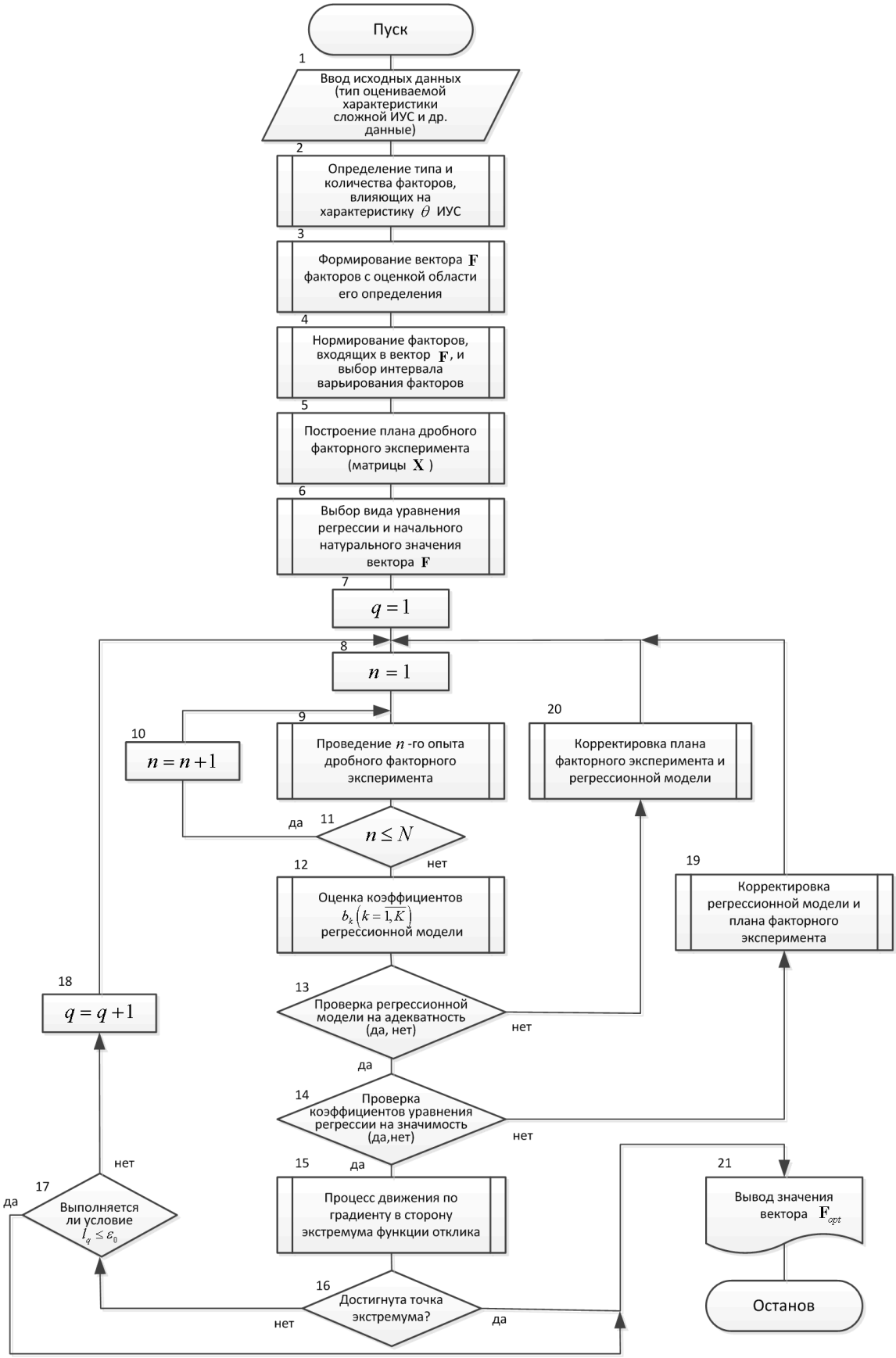

Рисунок 1 – Обобщенный алгоритм планирования и проведения натурных экспериментов экстремального типа

Далее в блоках 15...18 реализуется процесс поиска оптимальных значений вектора выбранных значимых факторов с использованием метода крутого восхождения с проверкой условия достижения точкой поиска одной из границ зоны ограничений задач (1), определяемой выражением (2). При достижении точки экстремума в блоке 21 алгоритма проводится вывод искомого значения вектора F_{opt}.

Таким образом, представленная в статье методика позволяет провести научно обоснованное планирование и реализацию натурных экспериментов при испытаниях сложных информационно-управляющих систем. При этом могут быть определены оптимальные условия проведения испытаний, при которых следует оценивать ту или иную техническую характеристику сложной ИУС с целью достижения максимальной боевой или эксплуатационной эффективности испытываемой информационно-управляющей системы.

В научном плане данная статья развивает одно из положений опытно-теоретического метода испытаний сложных информационно-управляющих систем, связанное с обоснованием правильной стратегии планирования и проведения отработки и испытаний новых образцов сложных систем.

Список использованных источников

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976.

2. Буренок В.М., Найденов В.Г. Требуется модернизация полигонов // Воздушно-космическая оборона. – 2009. – № 4.

3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2007.

4. Демидов Б.А. Теория и выводы военно-научных исследований вооружения и военной техники. – Харьков: Издание ВИРТА ПВО, 1990.

5. Зедгинидзе И.Г., Лобжанидзе Ш.С. Об одном алгоритме регулирования шага в оптимизационных процедурах. – Сообщение АН ГССР, 1970, 58, № 2.

6. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976.

7. Леонов С.А., Леонов С.А., Нагулинко Ф.В. Испытания РЛС (оценка характеристик). – М.: Радио и связь, 1990.

8. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1971.

9. Шаракшанэ А.С., Железнов И.Г. Испытания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1974.

10. Шаракшанэ А.С. и др. Сложные системы. – М.: Высшая школа, 1977.

11. Box G.T., Wilson K.B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. – J. Roy. Statist. Soc., Ser. 1951.