МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СУДОВЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА*

А. Г. Кохно (Санкт-Петербург)

Одной из основных особенностей судовых автоматизированных систем (САС) является их многокритериальность, которая связана с большим количеством требований, предъявляемых к САС и во многих случаях противоречащих друг другу.

Пусть оптимизируемая САС характеризуется совокупностью показателей качества $K_1, K_2, ..., K_i, ..., K_n$, которые будем рассматривать как компоненты вектора $\overrightarrow{K}$. Для удобства сравнения различных вариантов САС перейдем к вектору нормированных значений показателей $\vec{X}$.Тогда каждому варианту системы будет соответствовать вектор нормированных значений показателей $\vec{x}(S)$,т.е.

$$X(S) = \left[x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n\right]^T . \tag{1}$$

При этом предполагается, что показатели являются однородными, т.е. имеют одну общую интервальную шкалу, пределы которой в зависимости от формулировки задачи меняются от -1 до + 1 либо от 0 до +1.

Оптимальная система выбирается из всех допустимых вариантов САС. Предполагается, что она обладает наилучшими с точки зрения принятого критерия оптимальности значениями вектора $\overline{X}$ нормированных показателей качества (1). Под критерием оптимальности (предпочтения) понимается правило, обеспечивающее сопоставление различных вариантов САС и выбор оптимального варианта.

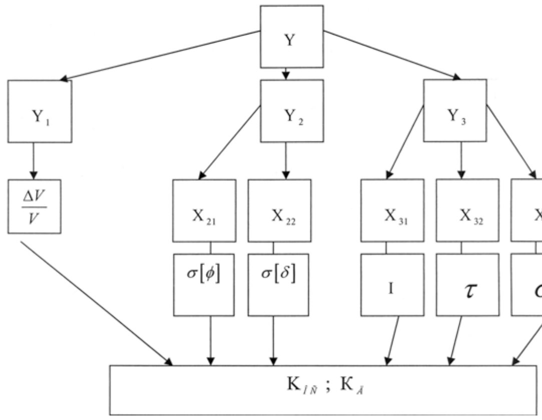
Для преодоления указанных трудностей в основу многокритериальной параметрической оптимизации целесообразно положить иерархическую систему моделей, один или несколько верхних уровней которой представляют собой полиномиальные функции предпочтения (целевые или критериальные функции), а нижний уровень – полиномиальные зависимости показателей качества процессов от оптимизируемых параметров. При этом широко используется концепция активной идентификации сложных систем, основанная на планировании имитационного эксперимента. Под имитационным экспериментом подразумевается вычислительный и эвристический эксперименты.

Проиллюстрируем указанный подход на примере оптимизации параметров закона управления системы автоматического управления курсом судна, в качестве которых рассматриваются коэффициенты обратной связи $К_{о.с}$ и дифференцирующие элементы $К_д$. В иерархической системе моделей, положенной в основу параметрической оптимизации (рисунок), первым трем уровням соответствуют обобщенная функция предпочтения (целевая функция) *Y*, функции предпочтения отдельных режимов – Y_1, Y_2, Y_3, и нормирование значения показателей режимов – X_{21}, X_{22}, X_{31}, X_{32}, X_{33}.

Функция предпочтения Y_1 соответствует режиму автоматической стабилизации судна в открытом море. Главным показателем в этом режиме является величина потерь эксплуатационной скорости, при действии морского волнения, связанная с удлинением траектории движения судна, скоростью рысканья судна по курсу и перекладками пера руля. Функция предпочтения Y_2 определяет режим стабилизации в стесненных условиях, где показатели X_{21} и X_{22} являются нормированными значениями среднеквадратиче-

* Решением ПК конференции доклад отнесен в первую секцию.

ских величин угла рысканья $\tau(\phi)$ и угла поворота руля $\tau(\delta)$. Функция предпочтения Y_3 характеризует режим автоматического маневрирования и определяется показателями X_{31}, X_{32} и X_{33}, которые являются показателями качества переходного процесса, в частности интегральной квадратичной оценки *Y*, времени переходного процесса τ и перерегулирования σ.



Иерархическая система моделей

Функции предпочтения Y_1, Y_2, Y_3 в общем случае представляют собой полиномиальные зависимости от нормированных значений показателей, которые в свою очередь являются полиномиальными зависимостями от оптимизируемых параметров, причем большему нормированному значению показателя соответствует лучшее (в данном случае меньшее) ненормированное значение соответствующего показателя. Тогда задача выбора оптимальных значений параметров сводится, как указывалось выше, к стандартной задаче математического программирования:

$$\bar{X}_0 = \max Y(Y_1, Y_2, Y_3) \text{ Ж};$$

$$\bar{X} \in D,$$

где $\bar{X}_0$ – вектор оптимальных нормированных значений параметров, в данном случае соответствующих $К_{о.с}$ и $К_{д}$; *D* – область допустимых значений нормированных параметров, определяемая ограничениями на значения параметров и значения отдельных показателей качества.

Для решения задач многокритериальной оптимизации в настоящее время все наиболее широкое распространение нашли линейные функции предпочтения. Однако большей потенциальной адекватностью обладают полиномиальные функции предпочтения, которые можно представить в виде полиномов третьего и четвертого порядков:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{i,j=1}^{n} b_{ij} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i<j}}^{n} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{n} b_{iij} x_i^3 ; \qquad (2)$$

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{i,j=1}^{n} b_{ij} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i<j}}^{n} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{n} b_{iij} x_i^3 + \sum_{i=1}^{n} b_{iijj} x_i^4 , \qquad (3)$$

где Y – значение функций предпочтения; x_i – нормированные значения показателей; $b_0, b_i, b_{ij}, b_{iij}, b_{iijj}$ –коэффициенты полиномов функции предпочтения; *n* – число единичных показателей.

Определение полиномиальных функций предпочтения осуществляется на основе эвристического эксперимента. Теоретическое обоснование эвристического эксперимента дает общая теория измерений [1], которая рассматривает как объективные измерения, осуществляемые измерительными приборами, так и субъективные измерения, производимые экспертами. В эвристическом эксперименте отдельным точкам плана соответствуют гипотетические варианты оптимизируемой САС, для которой известны векторные оценки нормированных значении показателей качества (1). Эксперты путем осуществления специальных процедур, основанных на субъективных измерениях, определяют значения функций предпочтения в точках спектра плана. Обработка полученных результатов на основе метода наименьших квадратов позволяет определять полиномиальные зависимости функций предпочтения от нормированных значений показателей вида (2), (3).

Однако использование симметричных конфигураций в планах эвристического эксперимента встречает существенные затруднения у экспертов при субъективных измерениях значений функций предпочтения. Необходимо учитывать, что в отличие от регрессионного и вычислительного экспериментов, отдельные точки спектров планов не являются равноценными. Так, эксперты в большинстве случаев не могут достаточно точно определять значения функций предпочтения гипотетических вариантов САС, у которых нормированные значения трех и более значений показателей не отличаются от нуля. Исключение составляют гипотетические варианты, у которых нормированные значения показателей равны друг другу, т.е $x_i = a(i = 1, 2, ..., n)$.

Указанным требованиям подчиняется полный факторный эксперимент (ПФЭ) для n = 2, ядро плана Бокса–Бенкина и звездные точки.

Для решения многокритериальных задач определения функции предпочтения целесообразно использовать квазисимметричные планы, которые содержат не только указанные симметричные конфигурации, но и их отдельные квазисимметричные подмножества, нечетные моменты, которые обеспечивают компромиссные свойства планов. С одной стороны, значения функций предпочтения, соответствующих точкам спектров этих подмножеств, сравнительно легко определяются экспертами, а с другой стороны большинство нечетных моментов равняется нулю.

Примером такого подмножества является следующая выборка из ПФЭ:

$$D' = \begin{bmatrix} -1 & -1 & ... & -1 \\ +1 & +1 & ... & +1 \end{bmatrix}.$$

Строки указанного подмножества соответствуют минимальному и максимальным значениям функций предпочтения (наихудший и наилучший элемент множества гипотетических вариантов) и в зависимости от выбранной числовой шкалы принимают значения -1 и +1 или 0 и +1. Указанные оценки являются заранее известными детерминированными числами, ошибка в определении которых равна нулю. Симметричные нечетные моменты первого и третьего порядков этой выборки равны нулю, а второго и четвертого отличаются от нуля. Поэтому необходимо подобрать выборку из плана Бокса–Бенкина, обеспечивающую равенство нулю второго нечетного момента квазисимметричного плана эксперимента. Кроме того, на точность субъективных измерений влияют размеры конфигураций. Наиболее точные результаты измерений получаются при разбиении общей однородной шкалы на четыре равных интервала. В этом случае каждый фактор меняется на пяти уровнях (-1; -0,5; 0; +0,5; +1), т.е. размеры конфигураций a=1 и a=0,5. В противном случае точность субъективных измерений существенно уменьшается.

Квазистационарный план для определения полиномиальных функций предпочтения четвертого порядка при числе показателей $n = 4$ представлен в таблице.

План включает в себя два подмножества спектров ядра плана Бокса–Бенкина (первые 12 точек) и ПФЭ (точки 13 и 14), а также два комплекта звездных точек (точки 15-30) и нулевую точку (31). Указанный план является квазисимметричным, так как все его нечетные моменты до третьего включительно равны нулю. Однако, нечетные моменты четвертого порядка не равны нулю, что несколько ухудшает свойства плана.

Аналогичным образом осуществляется синтез квазисимметричных планов эвристического эксперимента для числа показателей $n = 3,5$. Матрицы моментов планов третьего и четвертого порядков имеют сложные блочные структуры, поэтому значения коэффициентов соответствующих их функциям предпочтения могут быть определены только с помощью компьютеров на основе следующего матричного выражения:

$$\overline{B} = (X^T X)^{-1} X^T \overline{Y}$$

где $\overline{B} = \left[b_o, \overline{b}_i^T, \overline{b}_{ij}^T, \overline{b}_{ii}, \overline{b}_{iii}, \overline{b}_{iiii} \right]^T$ –вектор-столбец значений коэффициентов полиномиальных функций предпочтения; X – матрица наблюдений эвристического плана эксперимента; $\overline{y}$ – вектор столбец групповой оценки функций предпочтения в каждой точке плана эксперимента.

Определение выражения функций предпочтения в виде выражений (2) или (3) позволяет свести задачу многокритериальной оптимизации САС к решению стандартной задачи математического программирования.

№ т план	X_1	X_2	X_3	X_4
1	-1	1	0	0
2	1	-1	0	0
3	-1	0	1	0
4	1	0	-1	0
5	-1	0	0	1
6	1	0	0	-1
7	0	-1	1	0
8	0	1	-1	0
9	0	-1	0	1
10	0	1	0	-1
11	0	0	-1	1
12	0	0	1	-1
13	-1	-1	-1	-1
14	1	1	1	1
15	-1	0	0	0
16	1	0	0	0

№ т план	X_1	X_2	X_3	X_4
17	0	-1	0	0
18	0	1	0	0
19	0	0	-1	0
20	0	0	1	0
21	0	0	0	-1
22	0	0	0	1
23	-0,5	0	0	0
24	0,5	0	0	0
25	0	-0,5	0	0
26	0	0,5	0	0
27	0	0	0,5	0
28	0	0	-0.5	0
29	0	0	0	-0,5
30	0	0	0	0,5
31	0	0	0	0

Литература

1. **Пфанцагль И.** Теория измерений. М.: Мир. 1976. 234 с.
2. **Зубарев Ю. Я.** Планирование эксперимента в научных исследованиях СПГУВК. СПб., 2004, 153 с.