

## ПОДСИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ И УПРОЩЕНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Кадач Т.В.**

Белорусский национальный технический университет, г. Минск  
кафедра «Системы автоматизированного проектирования»  
E-mail: tasla@tut.by

### **Abstract**

*Kadach T.V. Subsystem of engineering system analysis and empirical modeling. The questions of software implementation of designed objects analysis and empirical modeling algorithms are described. In the process of such research is estimated the level of variable factor effect on functional constraints and decision-making criteria of projected object model. Model simplification is achieved by computing experiment and application of regression procedures. To demonstrate the operability of considered algorithms is given the example of model simplification of the steam-boiler TP-87 tubular air heater.*

**Введение.** Идея многоэтапности процесса принятия решения является одной из основных в системном анализе и автоматизации проектирования [1]. Смысл этой идеи заключается в том, что наряду с исходной операционной моделью строится более простая модель, в которой, по сравнению с исходной, упрощены система ограничений и критерии. Естественно предполагается, что задача поиска решения с помощью упрощенной модели должна оказаться существенно проще исходной задачи, а полученные значения критериев будут при этом относительно близки. Таким образом, рассматривается иерархия модели, для каждой из которых применяется свой метод оптимизации.

**Постановка задачи.** Процедура упрощения моделей состоит из двух этапов:

1. сокращение числа оптимизируемых параметров и/или критериев и как следствие определение структуры упрощенной модели, исходя из эмпирической информации исследователя, когда определяются вид уравнений и список входящих в них переменных;

2. преобразование исходной операционной модели к виду определенному на этапе 1.

Существует множество методов такого исследования. Выбор того или иного метода зависит от размерности пространства параметров, требований к быстродействию метода, наглядности получаемых решений и других факторов. Поэтому целесообразна разработка программного приложения, реализующего разнообразные алгоритмы, что позволит комплексно исследовать оптимизационные модели технических систем.

**Описание методов.** Кратко опишем реализованные в подсистеме методы.

1. *Оценка информативности параметров при построении моделей технических систем.* Для оценки важности параметров рассматриваемой подсистеме были разработаны алгоритмы, реализующие следующие методы: метод парной корреляции, построение матрицы чувствительности целевой функции, проведение вычислительного эксперимента с обработкой результатов методами случайного баланса и регрессионного анализа, метод экстремальной группировки [2].

*Парная корреляция.* В методе парной корреляции вычисляются парные коэффициенты корреляции, характеризующие тесноту связи между двумя величинами. В парной корреляции вычисляют один тип парных коэффициентов корреляции –  $r_{yx_i}$  (коэффициенты, определяющие тесноту связи между целевой функцией  $y$  и одним из параметров  $x_i$ ).

*Построение матрицы чувствительности.* Идея метода заключается в анализе чувствительности критериев оптимальности  $y_j$  к изменениям внутренних параметров  $x_i$ . Для этого необходимо построить матрицу чувствительности  $A$ , элементами которой являются абсолютные коэффициенты влияния (коэффициенты чувствительности):

$$A_{ji} = \frac{dy_j}{dx_i}, \quad (1)$$

где  $y_j$  -  $j$ -ый выходной параметр;

$x_i$  -  $i$ -ый входной параметр.

*Вычислительный эксперимент.* Вычислительный эксперимент проводится на полной предварительно построенной операционной модели в соответствии с каким-либо методом планирования эксперимента. В данном случае рассмотрены:

1. методы ПФЭ  $2^n$  или ДФЭ  $2^{n-p}$ , планы, построенные в соответствии с которыми, обладают свойством ортогональности, что позволяет оценивать эффективность параметров по значениям коэффициентов построенной регрессионной модели.

Однако эти методы могут быть применены при небольшом количестве параметров или при относительно несложной операционной модели.

2. методы случайного баланса, предполагающие, что:

- число всех параметров может быть больше числа опытов. В этом случае нельзя дать количественной оценки всем коэффициентам в уравнении модели, но этого и не нужно делать для всех параметров, достаточно сделать это для значимых из них;

- число значимых параметров должно быть меньше числа опытов;

- зависимость вклада параметров в остаточную дисперсию целевой функции имеет экспоненциальный характер.

2. *Построение упрощенных моделей технических систем.* Для построения упрощенных моделей в подсистеме были реализованы следующие алгоритмы [3]:

1. для линейной модели вида  $\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^p b_j x_j$  - вычислительный эксперимент вида

ПФЭ  $2^n$  и множественный регрессионный анализ;

2. для нелинейной модели:

2.1. в квадратичной форме

$$\tilde{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_j x_j + \dots + b_p x_p + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + \dots + b_{jj} x_j^2 + \dots + b_{pp} x_p^2 + b_{12} x_1 x_2 + \dots$$

- вычислительный эксперимент на базе планов 2-го порядка (ОЦКП) и множественный нелинейный регрессионный анализ;

2.2. в виде суммы аппроксимирующих полиномов

$$\tilde{y} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n + a_{12} x_2 + a_{22} x_2^2 + \dots + a_{n2} x_2^n + a_{13} x_3 + a_{23} x_3^2 + \dots + a_{n3} x_3^n + \dots$$

- полиномы Чебышева;

3. для модели произвольной формы – алгоритмы идентификации параметров модели.

Структура упрощенной модели формируется пользователем, исходя из предположений о характере зависимости критерия оптимальности от вектора оптимизируемых параметров  $\overline{X}$ . Далее бионическим алгоритмом, обладающим глобальными свойствами, решается однокритериальная задача оптимизации, где искомыми являются коэффициенты при параметрах, а критерием служит невязка значений  $y - \tilde{y}$ , определенных по исходной и упрощенной моделям.

**Описание работы подсистемы.** Рассмотрим задачу построения упрощенных моделей на примере такого распространенного в теплоэнергетике объекта как трубчатый

воздухоподогреватель (ТВП) парового котла, в частности при построении операционной модели воздухоподогревателя котла ТП-87. В основе модели лежит нормативный тепловой расчет элементов парового котла [4].

Модель имеет четыре критерия оптимальности:

- коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) - k$ ;
- скорость низкотемпературной коррозии,  $\text{г}/\text{м}^2 - C_k$ ;
- тепловосприятие,  $\text{кДж}/\text{кг} - Q_t$ ;
- температурный напор,  $^{\circ}\text{C} - \Delta t$ ,

и в начальном варианте модели пятнадцать конструктивных и режимных параметров:

- число рядов труб по ходу воздуха и газов, шт -  $z_1$  и  $z_2$ ;
- толщина стенки и диаметр трубки, м -  $\delta$  и  $d$ ;
- поперечный и продольный шаги труб, м -  $s_1$  и  $s_2$ ;
- длина трубки, м -  $l$ ;
- температура воздуха на входе и выходе,  $^{\circ}\text{C} - t'_{ВП}$  и  $t''_{ВП}$ ;
- температура газов на входе,  $^{\circ}\text{C} - g'_2$ ;
- скорость воздуха и газов, м/с -  $w_в$  и  $w_г$ ;
- температура стенки трубки,  $^{\circ}\text{C} - t_{cm}$ ;
- коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем -  $\alpha''_{m}$ ;
- относительная нагрузка парового котла -  $\bar{D}$ .

Детальное описание модели приведено в [5]. Рассмотренная выше операционная модель была реализована в виде исполняемого файла, обрабатываемого приложением. Входные параметры, т.е. факторы для модели должны считываться из файла par.opt, а выходные параметры, то есть критерии, по которым оценивается качество проектирования, должны записываться в файл fun.opt. Модель и приложение были созданы в среде Borland Delphi 7.0. Для работы подсистемы на ПЭВМ должна быть установлена операционная система Microsoft Windows 2000 или XP.

В ходе выполнения испытаний проводился анализ чувствительности (АЧ) и вычислительный эксперимент на основе плана ДФЭ  $2^{15-5}$ . Время работы приложения для рассматриваемого примера составило приблизительно 15 минут. Матрица результатов эксперимента обрабатывалась методами парной корреляции (ПК), случайного баланса (СБ) и регрессионного анализа (РА). При обработке результатов незначимые параметры, определенные на основе критерия Стьюдента не отбрасывались, с целью дальнейшего участия в многокритериальной обработке. Результаты, полученные различными методами, были нормированы в предположении, что суммарная значимость параметров по каждому критерию равна единице.

В результате работы подсистемы анализа и упрощения модели была получена таблица 1. Анализ таблицы показывает, что значимость параметров рассмотренными методами различна как для разных критериев, так и для отдельно взятого критерия. Поэтому, усредняя для каждого из критериев значимость параметров по данным, полученным всеми четырьмя методами, строим неупорядоченную таблицу решений (табл. 2).

Для принятия окончательного решения используем подход, применяемый при диалоговом решении многокритериальных задач [6]. Идея заключается в построении упорядоченных таблиц по каждому из критериев и назначении критериальных ограничений в виде указания граничной точности. Проектировщик имеет возможность учитывать приоритет критериев оптимальности, назначая для столбца более важного критерия границу с меньшим вкладом, тем самым, увеличивая число параметров, влияющих на приоритетные

критерии. В рассматриваемом примере приоритет критериев принят в следующем виде:  $y_1 > y_2 > y_3 > y_4$ . В соответствии с указанным приоритетом были заданы следующие пороговые значения нормированной значимости критериев: для  $y_1 - 0.06$ ,  $y_2 - 0.09$ ,  $y_3 - 0.12$ ,  $y_4 - 0.21$ .

Таблица 1

Результаты эксперимента

Критерии	Методы	Оптимизируемые параметры														
		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15
		$z_1$	$z_2$	$\delta$	$d$	$s_1$	$s_2$	$l$	$t'_{ВП}$	$t''_{ВП}$	$g'_2$	$w_6$	$w_2$	$t_{cm}$	$\alpha''_{mn}$	$\bar{D}$
y1 $k$	ПК	0.02	0.01	0.05	0.10	0.12	0.08	0.03	0.07	0.09	0.06	0.16	0.17	0.01	0.01	0.02
	АЧ	0.01	0.03	0.04	0.08	0.15	0.08	0.02	0.06	0.10	0.05	0.18	0.16	0.02	0.01	0.01
	СБ	0.00	0.02	0.06	0.12	0.12	0.07	0.01	0.10	0.11	0.06	0.15	0.16	0.00	0.01	0.01
	РА	0.01	0.01	0.04	0.13	0.11	0.10	0.01	0.08	0.07	0.06	0.14	0.19	0.01	0.02	0.01
y2 $C_k$	ПК	0.02	0.02	0.03	0.01	0.04	0.03	0.01	0.12	0.09	0.10	0.04	0.03	0.18	0.13	0.15
	АЧ	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.14	0.10	0.12	0.02	0.02	0.17	0.15	0.15
	СБ	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.13	0.09	0.12	0.04	0.03	0.18	0.13	0.14
	РА	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.14	0.10	0.09	0.03	0.01	0.20	0.12	0.17
y3 $Q_t$	ПК	0.11	0.10	0.05	0.06	0.07	0.05	0.07	0.03	0.13	0.12	0.08	0.04	0.03	0.03	0.02
	АЧ	0.11	0.08	0.07	0.04	0.09	0.03	0.09	0.01	0.13	0.14	0.10	0.02	0.01	0.03	0.04
	СБ	0.13	0.12	0.04	0.05	0.07	0.02	0.08	0.02	0.14	0.13	0.10	0.01	0.03	0.03	0.02
	РА	0.12	0.09	0.05	0.07	0.08	0.06	0.06	0.02	0.15	0.14	0.07	0.04	0.02	0.01	0.02
y4 $\Delta t$	ПК	0.01	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.18	0.22	0.19	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03
	АЧ	0.00	0.02	0.05	0.02	0.05	0.03	0.04	0.22	0.25	0.20	0.01	0.03	0.02	0.05	0.01
	СБ	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.06	0.18	0.22	0.23	0.04	0.06	0.04	0.01	0.05
	РА	0.03	0.01	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.19	0.21	0.21	0.01	0.03	0.03	0.06	0.05

Далее рассматриваем в качестве оптимизируемых две группы параметров:

1. приоритетные параметры, номера которых входят во все столбцы;
2. параметры, номера которых входят хотя бы в один столбец.

Для ТВП в первую группу вошли параметры  $x_9$  и  $x_{10}$ , а во вторую к ним добавились  $x_{12}$ ,  $x_{11}$ ,  $x_5$ ,  $x_4$ ,  $x_6$ ,  $x_8$ ,  $x_{13}$ ,  $x_{15}$ ,  $x_{14}$  и  $x_1$ . Незначимыми (не оказывающими значимого влияния ни на один из критериев оптимальности) оказались параметры  $x_2$ ,  $x_3$  и  $x_7$ . Проведенные исследования подтверждают оценки экспертов-теплоэнергетиков, полученные на предварительном этапе построения операционной модели ТВП.

Таблица 2

Неупорядоченная таблица

№x <sub>i</sub>	y1	y2	y3	y4
x1	0.01	0.01	0.12	0.01
x2	0.02	0.02	0.1	0.015
x3	0.05	0.025	0.05	0.03
x4	0.11	0.02	0.055	0.03
x5	0.125	0.03	0.08	0.03
x6	0.08	0.02	0.04	0.04
x7	0.02	0.02	0.08	0.05
x8	0.08	0.13	0.02	0.19
x9	0.09	0.095	0.13	0.23
x10	0.06	0.11	0.13	0.21
x11	0.16	0.03	0.09	0.03
x12	0.17	0.02	0.03	0.04
x13	0.01	0.18	0.02	0.03
x14	0.01	0.13	0.03	0.04
x15	0.01	0.15	0.02	0.04

Таблица 3

Упорядоченная таблица

№x <sub>i</sub>	y1	№x <sub>i</sub>	y2	№x <sub>i</sub>	y3	№x <sub>i</sub>	y4
x12	0.17	x13	0.18	x10	0.13	x9	0.23
x11	0.16	x15	0.15	x9	0.13	x10	0.21
x5	0.125	x8	0.13	x1	0.12	x8	0.19
x4	0.11	x14	0.13	x2	0.1	x7	0.05
x9	0.09	x10	0.11	x11	0.09	x12	0.04
x6	0.08	x9	0.09	x5	0.08	x14	0.04
x8	0.08	x5	0.03	x7	0.08	x6	0.04
x10	0.06	x11	0.03	x4	0.05	x15	0.04
x3	0.05	x3	0.02	x3	0.05	x5	0.03
x2	0.02	x2	0.02	x6	0.04	x3	0.03
x7	0.02	x12	0.02	x14	0.03	x13	0.03
x14	0.01	x12	0.02	x12	0.03	x4	0.03
x15	0.01	x4	0.02	x15	0.02	x11	0.03
x13	0.01	x6	0.02	x13	0.02	x2	0.01
x1	0.01	x1	0.01	x8	0.02	x1	0.01

**Заключение.** Рассмотренная подсистема анализа и упрощения модели подтвердила свою работоспособность и может использоваться как в лабораторных и курсовых работах по указанным выше дисциплинам, так и в научно-проектных разработках при проектировании элементов паровых котлов.

### Литература

1. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука. Главная ред. физмат. литературы, 1981, 488 с.
2. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
3. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул.– М.: Высш. шк., 1988.
4. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Н.В. Кузнецова и др. - М., «Энергия», 1973, 296 с.
5. К построению оптимизационной модели трубчатых воздухоподогревателей паровых котлов. Карницкий Н.Б., Кадач Т.В. // Вестник БНТУ. – № 6, 2006. – С. 76-78.
6. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями – М.: Наука, 1981.