

**РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ  
ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ  
СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Ю.В. Кулаков, В.Н. Шамкин**

*Кафедра «Информационные технологии в проектировании», ТГТУ*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Бодровым*

**Ключевые слова и фразы:** адекватность модели; граф модели; математическая модель статики; модуль аппарата; настроечные параметры; параметрическая идентификация модели; сложная технологическая система; технологический аппарат.

**Аннотация:** Приведены примеры построенных по модульному принципу математических моделей статических режимов некоторой технологической системы. Проанализирована возможность решения задачи параметрической идентификации моделей при различных системах контроля технологического процесса. Показано, что исходная задача идентификации модели сложной системы, традиционно являющаяся весьма трудоемкой, может быть сведена к решению совокупности более простых задач идентификации отдельных модулей и их комплексов.

---

## **1 Введение**

Известно, что математические модели статических режимов используют при проектировании новых технологических объектов и систем управления ими, а также при исследовании, оптимизации режимов и оперативном управлении технологическими процессами уже существующих объектов.

Модели статики сложных технологических систем (СТС), как правило, разрабатывают по модульному принципу, согласно которому каждый аппарат (группа аппаратов) представлен модулем – своей математической моделью, а модули связаны между собой. Эту взаимосвязь представляют в виде графа, вершины которого обозначают модули, а дуги – их входные и выходные переменные.

Параметрическая идентификация модели предусматривает определение таких настроечных параметров, которые доставляют экстремум некоторой целевой функции. Традиционно функция идентификации представляет собой выбранную меру рассогласования (при одних и тех же экспериментальных значениях входных переменных) расчетных значений выходных переменных модели, называемых координатами адекватности, и соответствующих экспериментальных значений этих переменных.

Трудности параметрической идентификации структурно правильных моделей статики СТС хорошо известны. Во-первых, это высокая размерность решаемых

задач, определяемая большим числом неизвестных параметров модели, являющихся ее настроечными параметрами. Во-вторых, это недостаточное, как правило, число измеряемых технологических переменных, необходимых для идентификации.

Выбор начального приближения для настроечных параметров в задаче идентификации, являющейся оптимизационной, играет первостепенную роль и может сделать возможным ее решение за приемлемое время.

Заметим, что различные аспекты теории и практики идентификации нашли свое отражение в таких известных работах, как [1 – 9] и других. Однако, нам не известны публикации, кроме работы авторов [10], в которых рассматривается задача рационального задания начального приближения для настроечных параметров модели статистики СТС при идентификации.

Такое приближение можно определить путем решения задачи параметрической идентификации более простой модифицированной модели по разработанной авторами методике [10]. Далее на иллюстративных примерах оцениваются выгоды, получаемые от применения этой методики. Рассмотрены три варианта достаточно простой структуры математической модели СТС, отличающиеся числом неизвестных настроечных параметров, при этом в каждом варианте СТС имеет свою систему технологического контроля.

## 2 Параметрическая идентификация математических моделей

Построение адекватной математической модели СТС требует проведения большого числа экспериментов, необходимых для проверки модели на адекватность и последующей коррекции ее настроечных параметров, т.е. параметрической идентификации. Однако, часто нужный объем экспериментальных данных получить либо невозможно, либо очень дорого, а иногда имеются ограничения по времени. В методических целях и для простоты проводимых рассуждений предполагается, что идентификация проводится по данным только одного эксперимента. Очевидно, что это несколько не умаляет значения получаемых результатов и выводов.

Исходной моделью называется идентифицируемая модель СТС, а соответствующий ей граф – исходным графом. Путем преобразования исходного графа за счет разрыва его внутренних дуг, отвечающих измеряемым выходным переменным, получается модифицированный граф. Соответствующая этому графу математическая модель называется модифицированной моделью.

### 2.1 Первый вариант

Рассмотрен случай, когда в технологической системе измеряются все переменные, характеризующие протекающие в ней процессы и представленные в математической модели. В значительной степени это гипотетический случай, поскольку на практике нет необходимости в исчерпывающем контроле технологического процесса, и, кроме того, очень дорого. Однако, с точки зрения выявления некоторых важных свойств и закономерностей параметрической идентификации, данный пример полезен.

*Постановка задачи.* Пусть исходная математическая модель технологической системы имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= k_1 y_4 + k_8 y_6 \\ y_2 &= k_2 x_1 + 4x_2 + k_3 y_1 \\ y_3 &= x_1 + k_2 x_2 + k_3 y_1 \\ y_4 &= k_4 y_2 + k_5 y_1 \\ y_5 &= k_5 y_2 + k_4 y_1 \\ y_6 &= k_6 y_3 - k_7 y_5 \\ y_7 &= k_7 y_3 + k_6 y_5 \\ y_8 &= k_1 y_4 - k_8 y_6 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $y_1, y_2, \dots, y_8$  – измеряемые выходные переменные системы (координаты адекватности);  $x_1, x_2$  – измеряемые входные переменные системы;  $k_1, k_2, \dots, k_8$  – коэффициенты модели (настроечные параметры).

Соответствующий модели (1) исходный граф представлен на рис. 1.

Вершины  $M_1, M_2, M_3, M_4$  графа соответствуют модулям технологических аппаратов, а ориентированные дуги обозначают переменные и отражают направление передачи информации в процессе вычислений. Окружности на дугах свидетельствуют о возможности измерения значений переменных, характеризующих технологический процесс.

В результате эксперимента получены следующие значения:  $x_1^3 = 2$ ,  $x_2^3 = 4$ ,  $y_1^3 = 15$ ,  $y_2^3 = 20$ ,  $y_3^3 = 55$ ,  $y_4^3 = 165$ ,  $y_5^3 = 220$ ,  $y_6^3 = -100$ ,  $y_7^3 = 1050$ ,  $y_8^3 = 60$ .

Требуется определить такие значения настроечных параметров  $k_1, k_2, \dots, k_8$ , которые доставляют минимум целевой функции вида:

$$F = \sum_{i=1}^8 (y_i^p - y_i^3)^2, \quad (2)$$

где  $y_1^p, y_2^p, \dots, y_8^p$  – расчетные значения соответствующих выходных переменных, найденные по уравнениям системы (1) при значениях входных переменных  $x_1^3, x_2^3$ .

*Результаты решения.* Сформулированная задача условной оптимизации (1), (2), далее называемая задачей параметрической идентификации исходной модели (1), имеет размерность вектора, равную восьми, по числу искомым настроечных параметров. При этом особенностью модели является то, что в ней известен лишь один коэффициент равный четырем, а остальные коэффициенты неизвестны.

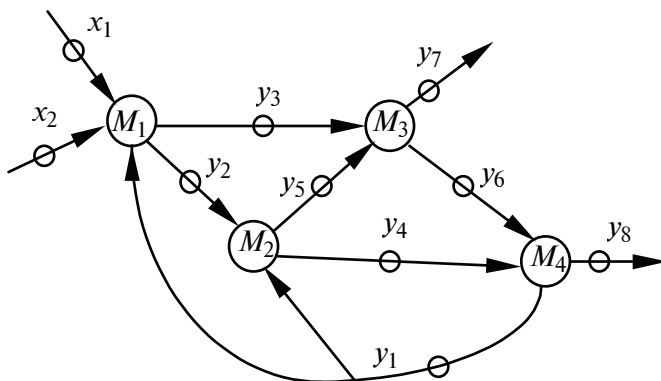


Рис. 1 Исходный граф модели технологической системы для варианта 1

Поиск минимума целевой функции идентификации (2) проведен методом Нелдера–Мида (деформированного многогранника) [11]. Для образования начального многогранника использовано значение шага, равного 1. Деформирование многогранника осуществлялось с помощью коэффициентов отражения, сжатия и растяжения, равных соответственно 1, 0,5 и 2. Точность вычисления параметров принята равной  $1 \cdot 10^{-10}$ .

В начале были сделаны попытки определения оптимальных настроечных параметров исходной модели (1). Поскольку о них ничего не известно, в частности, многократно задавались одинаковые начальные приближения для всех искомых параметров, выбираемые с определенным шагом из некоторого диапазона. Также задавались произвольно выбранные значения начальных приближений. Во всех рассмотренных случаях задача (1), (2) не была решена вследствие заклинивания. Этот факт подчеркивает важность выбора начального приближения при решении задачи параметрической идентификации даже для столь простой математической модели (1).

Далее была использована методика [10], предусматривающая решение нескольких более простых задач идентификации модулей или их комплексов, результаты которых используют в качестве начальных приближений для настроечных параметров в задаче параметрической идентификации исходной модели.

Путем разрыва внутренних измеряемых дуг  $y_1, y_2, \dots, y_6$  исходного графа получен модифицированный граф, изображенный на рис. 2. При разрыве дуги  $y_1$ , имеющей разветвление, она превратилась в три дуги – одну выходящую из модуля  $M_4$  и две входящие в модули  $M_1$  и  $M_2$ . Каждая из дуг  $y_2, y_3, \dots, y_6$  породила две дуги – одну выходящую из какого-то модуля и одну входящую в другой модуль. Новые дуги имеют наименования соответствующих разорванных дуг исходного графа.

Модифицированный граф предельно прост и представляет собой совокупность несвязанных модулей  $M_1, M_2, M_3, M_4$ . Следовательно, возможна раздельная параметрическая идентификация математических моделей аппаратов путем решения четырех двумерных задач оптимизации.

Например, для модуля  $M_1$  эта задача формулируется следующим образом.

Пусть математическая модель аппарата имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} y_2 &= k_2 x_1 + 4x_2 + k_3 y_1 \\ y_3 &= x_1 + k_2 x_2 + k_3 y_1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

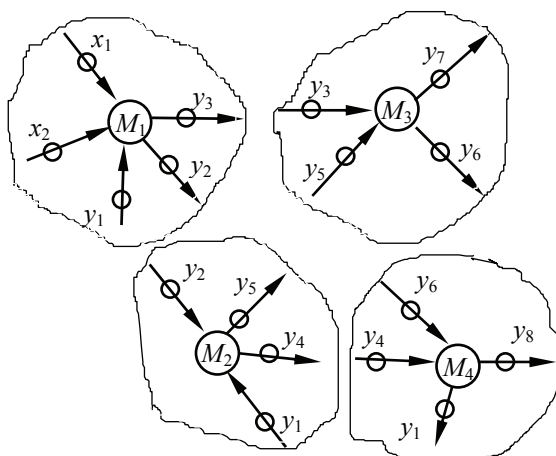


Рис. 2 Модифицированный граф модели системы для варианта 1

где  $y_2, y_3$  – измеряемые выходные переменные модуля (координаты адекватности);  $x_1, x_2, y_1$  – измеряемые входные переменные модуля;  $k_2, k_3$  – настроечные параметры модели.

Результаты эксперимента представлены данными:  $x_1^3 = 2, x_2^3 = 4, y_1^3 = 15, y_2^3 = 20, y_3^3 = 55$ .

Требуется найти значения настроечных параметров  $k_2, k_3$ , которые доставляют минимум целевой функции:

$$F = \sum_{i=2}^3 (y_i^p - y_i^3)^2. \quad (4)$$

Решение задач раздельной идентификации осуществлялось также методом Нелдера – Мида с теми же характеристиками, при этом задавались такие же начальные приближения, какие были использованы при идентификации исходной модели (1). Сходимость вычислений была достигнута во всех случаях, причем значения целевой функции не превысили  $1 \cdot 10^{-16}$ . Затраты машинного времени в каждом расчете составили не более сотых долей секунды. Получены оптимальные параметры настройки модулей, представленные с точностью до трех значащих цифр:  $M_1 - k_2 = 1,45 \cdot 10^1$ ;  $k_3 = -3,33 \cdot 10^{-1}$ ;  $M_2 - k_4 = 2,4$ ;  $k_5 = 4,6$ ;  $M_3 - k_6 = 4,38$ ,  $k_7 = 1,55$ ;  $M_4 - k_1 = 2,27 \cdot 10^{-1}$ ,  $k_8 = 2,25 \cdot 10^{-1}$ .

Использование этих значений в качестве начальных приближений в задаче идентификации исходной модели дало возможность решить ее. Полученный результат полностью совпал с результатами раздельной идентификации. Другими словами, найденные начальные приближения – это по сути оптимальные решения задачи параметрической идентификации исходной модели.

Сравнение результатов вычислений «впрямую», когда ни разу не было получено решение задачи (1), (2), и по методике, когда задача была решена значительно проще и для всех заданных начальных приближений, демонстрирует несомненное преимущество последней.

## 2.2 Второй вариант

Заметим, что редко когда возможна раздельная идентификация модулей. Системы контроля технологических переменных СТС обычно таковы, что измеряются не все технологические переменные, которые необходимы при параметрической идентификации модулей. В этих случаях настроечные параметры некоторых модулей выбирают с учетом их взаимодействия с другими модулями, т.е. решают задачи параметрической идентификации комплексов.

*Постановка задачи.* Задана исходная математическая модель технологической системы:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= k_1 y_4 + 0,225 y_6 \\ y_2 &= 14,5 x_1 + 4 x_2 + k_2 y_1 \\ y_3 &= x_1 + 14,5 x_2 + k_2 y_1 \\ y_4 &= 2,4 y_2 + k_3 y_1 \\ y_5 &= k_3 y_2 + 2,4 y_1 \\ y_6 &= k_4 y_3 - k_5 y_5 \\ y_7 &= k_5 y_3 + k_4 y_5 \\ y_8 &= k_1 y_4 - 0,225 y_6 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

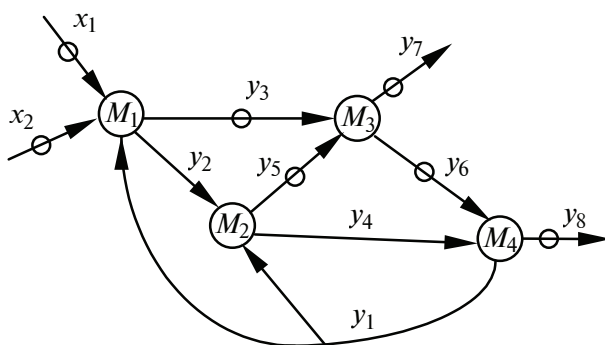


Рис. 3 Исходный граф модели технологической системы для варианта 2

где  $y_1, y_2, y_4$  – не измеряемые выходные переменные системы;  $y_3, y_5, y_6, y_7, y_8$  – измеряемые выходные переменные системы (координаты адекватности);  $x_1, x_2$  – измеряемые входные переменные системы;  $k_1, k_2, \dots, k_5$  – настроечные параметры модели.

Исходный граф модели представлен на рис. 3.

Известны следующие экспериментальные данные:  $x_1^3 = 2$ ,  $x_2^3 = 4$ ,  $y_3^3 = 55$ ,  $y_5^3 = 220$ ,  $y_6^3 = -100$ ,  $y_7^3 = 1050$ ,  $y_8^3 = 60$ .

Требуется определить такие значения настроечных параметров  $k_1, k_2, \dots, k_5$ , которые доставляют минимум целевой функции:

$$F = \sum_{i=3,5,6,7,8} (y_i^p - y_i^3)^2. \quad (6)$$

*Результаты решения.* По сравнению с первым вариантом, в модели (5) значения трех коэффициентов уже заданы, а остальные коэффициенты не известны. Соответственно, размерность вектора настроечных параметров равна пяти.

Поиск минимума целевой функции в задаче (5), (6) параметрической идентификации осуществлялся тем же методом, с теми же значениями характеристик и для тех же начальных приближений, что и в варианте 1. В отдельных случаях задача не была решена, вследствие закливания, а в других случаях решение было получено. Некоторые из результатов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты параметрической идентификации исходной модели (5)

№ расчета	Начальные приближения	Достижение схожести	Затраты машинного времени	Целевая функция
1	0	да	0,27 с	$7,2 \cdot 10^{-20}$
2	2	нет	более 1 мин	$1,9 \cdot 10^2$
3	4	нет	более 1 мин	$8,4 \cdot 10^1$
4	6	да	0,88 с	$1,1 \cdot 10^{-20}$
5	8	нет	более 1 мин	$5,7 \cdot 10^2$
6	10	нет	более 1 мин	$1,9 \cdot 10^2$

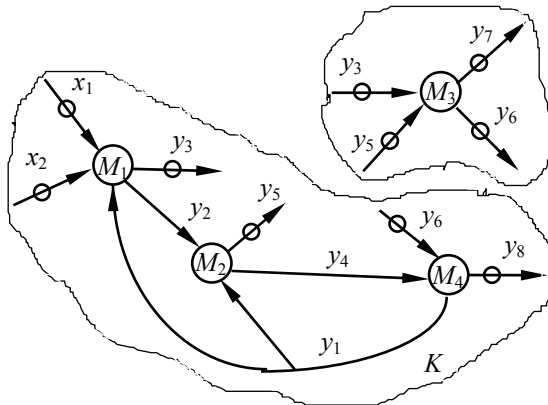


Рис. 4 Модифицированный граф модели системы для варианта 2

Решение было достигнуто в первом и четвертом расчетах, причем за время, меньшее одной секунды. Другие расчеты были прерваны в результате заикливания, продолжавшегося более одной минуты. Результаты успешных расчетов совпадают между собой, а оптимальные значения настроечных параметров с точностью до трех значащих цифр соответственно равны  $k_1=2,27 \cdot 10^{-1}$ ,  $k_2=-3,33 \cdot 10^{-1}$ ,  $k_3=4,60$ ,  $k_4=4,38$ ,  $k_5=1,55$ .

Далее была применена упомянутая выше методика. Путем разрыва внутренних измеряемых дуг  $y_3, y_5, y_6$  исходного графа, получен модифицированный граф, который представлен на рис. 4.

Поскольку дуги  $y_1, y_2, y_4$  характеризуют не измеряемые технологические переменные, то модули  $M_1, M_2$  и  $M_4$  нельзя рассматривать обособленно, поэтому они объединены в комплекс  $K$ . Модуль  $M_3$ , как и в первом варианте, изолирован.

Комплекс  $K$  и модуль  $M_3$  идентифицировались отдельно при тех же начальных приближениях, что и ранее.

Решалась следующая задача идентификации комплекса  $K$ .

Имеется математическая модель вида:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= k_1 y_4 + 0,225 y_6 \\ y_2 &= 14,5 x_1 + 4 x_2 + k_2 y_1 \\ y_3 &= x_1 + 14,5 x_2 + k_2 y_1 \\ y_4 &= 2,4 y_2 + k_3 y_1 \\ y_5 &= k_3 y_2 + 2,4 y_1 \\ y_8 &= k_1 y_4 - 0,225 y_6 \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где  $y_1, y_2, y_4$  – не измеряемые выходные переменные комплекса;  $y_3, y_5, y_8$  – измеряемые выходные переменные комплекса (координаты адекватности);  $x_1, x_2, y_6$  – измеряемые входные переменные комплекса;  $k_1, k_2, k_3$  – настроечные параметры модели.

Известны экспериментальные данные:  $x_1^3 = 2$ ,  $x_2^3 = 4$ ,  $y_3^3 = 55$ ,  $y_5^3 = 220$ ,  $y_6^3 = -100$ ,  $y_8^3 = 60$ .

Требуется найти значения настроечных параметров  $k_1, k_2, k_3$ , которые доставляют минимум целевой функции:

$$F = \sum_{i=3,5,8} (y_i^p - y_i^3)^2. \quad (8)$$

При идентификации модуля  $M_3$  решалась задача оптимизации, подобная (3), (4). Модель модуля имела вид:

$$\left. \begin{aligned} y_6 &= k_4 y_3 - k_5 y_5 \\ y_7 &= k_5 y_3 + k_4 y_5 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $y_6, y_7$  – измеряемые выходные переменные модуля (координаты адекватности);  $y_3, y_5$  – измеряемые входные переменные модуля;  $k_4, k_5$  – настроечные параметры модели.

Соответственно целевая функция была представлена следующим образом:

$$F = \sum_{i=6}^7 (y_i^p - y_i^3)^2. \quad (10)$$

Решение задач трехмерной оптимизации (7), (8) и двухмерной оптимизации (9), (10) позволило получить следующие результаты, представленные с точностью до трех значащих цифр: комплекс  $K - k_1 = 2,27 \cdot 10^{-1}$ ,  $k_2 = -3,33 \cdot 10^{-1}$ ,  $k_3 = 4,6$ ; модуль  $M_3 - k_4 = 4,38$ ,  $k_5 = 1,55$ . При этом суммарные затраты машинного времени не превысили 0,2 с, а значения целевых функций были не выше  $1 \cdot 10^{-16}$ .

Эти значения использованы в качестве начальных приближений при решении с помощью того же метода, что и ранее, задачи (5), (6) идентификации исходной модели. Найдены оптимальные значения настроечных параметров модели (5), которые равны представленным выше, при этом затраты машинного времени на поиск экстремума целевой функции (6) составили 0,11 с, а само значение функции равнялось  $1 \cdot 10^{-20}$ .

Сравнение этих результатов, результатов раздельной идентификации комплекса  $K$  и модуля  $M_3$ , а также результатов «прямого» решения задачи (5), (6) приведенных в табл. 1 позволило сделать следующие выводы. Во-первых, отсутствует необходимость решать задачу (5), (6) с начальными приближениями, полученными в результате раздельной идентификации, поскольку они являются собственно искомым решением. Во-вторых, для всех задаваемых начальных приближений применение методики позволило решить задачу (5), (6) идентификации исходной модели. В-третьих, для тех случаев, когда было возможно решить эту задачу «впрямую», значительно сокращено, благодаря раздельной идентификации, время вычислений.

### 2.3 Третий вариант

В тех случаях, когда существующая система контроля технологических переменных СТС позволяет измерить лишь некоторые переменные из общего, весьма большого, числа переменных, не всегда можно получить из исходного графа модифицированный граф в виде совокупности модулей или совокупности комплексов и модулей, а, следовательно, применить раздельную идентификацию. В таких случаях модифицированный граф представляет собой единый комплекс модулей с меньшим числом взаимосвязей, по сравнению с исходным графом. Соответствующая графу модифицированная математическая модель будет несколько проще, чем исходная, а, следовательно, более простой станет задача параметрической идентификации.



*Постановка задачи.* Пусть исходная математическая модель системы представлена следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= 0,227y_4 + k_4y_6 \\ y_2 &= 14,5x_1 + 4x_2 + k_1y_1 \\ y_3 &= x_1 + 14,5x_2 + k_1y_1 \\ y_4 &= 2,4y_2 + 4,6y_1 \\ y_5 &= 4,6y_2 + 2,4y_1 \\ y_6 &= k_2y_3 - k_3y_5 \\ y_7 &= k_3y_3 + k_2y_5 \\ y_8 &= 0,227y_4 - k_4y_6 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $y_1, y_2, y_4, y_5$  – не измеряемые выходные переменные системы;  $y_3, y_6, y_7, y_8$  – измеряемые выходные переменные системы (координаты адекватности);  $x_1, x_2$  – измеряемые входные переменные системы;  $k_1, k_2, \dots, k_4$  – настроечные параметры модели.

Исходный граф модели представлен на рис. 5.

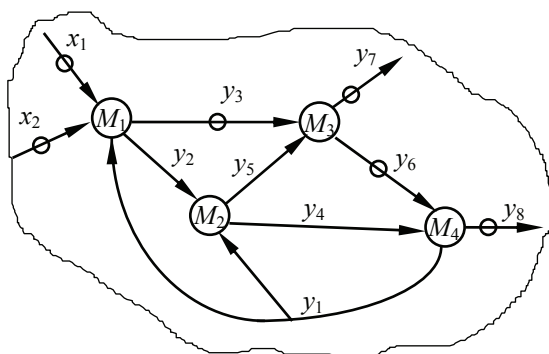
Имеются экспериментальные данные:  $x_1^3 = 2$ ,  $x_2^3 = 4$ ,  $y_3^3 = 55$ ,  $y_6^3 = -100$ ,  $y_7^3 = 1050$ ,  $y_8^3 = 60$ .

Требуется найти значения настроечных параметров  $k_1, k_2, \dots, k_4$ , доставляющие минимум целевой функции:

$$F = \sum_{i=3,6,7,8} (y_i^p - y_i^3)^2. \quad (12)$$

*Результаты решения.* В отличие от предыдущих вариантов, в модели (11) не известны значения четырех коэффициентов и, соответственно, размерность вектора настроечных параметров равна четырем.

Аналогично этим вариантам сделаны попытки нахождения оптимальных значений настроечных параметров исходной модели (11). В отдельных случаях задача не была решена, вследствие заикливания, а в других случаях решение было получено. При этом поиск минимума целевой функции (12) осуществлялся тем же методом и с теми же значениями характеристик, как и ранее. Некоторые из результатов представлены в табл. 2.



**Рис. 5** Исходный граф модели технологической системы для варианта 3

Таблица 2

Результаты параметрической идентификации исходной модели (11)

№ расчета	Начальные приближения	Достижение сходимости	Затраты машинного времени	Целевая функция
1	0	нет	более 1 мин	$1,0 \cdot 10^4$
2	2	да	0,33 сек	$4,1 \cdot 10^{-20}$
3	4	да	0,44 сек	$6,8 \cdot 10^{-20}$
4	6	да	0,21 сек	$1,2 \cdot 10^2$
5	8	нет	более 1 мин	$1,2 \cdot 10^2$
6	10	нет	более 1 мин	$1,1 \cdot 10^2$

Сходимость была достигнута соответственно во втором, третьем и четвертом расчетах за время, меньшее 0,5 с. Другие расчеты были прерваны в результате закливания, продолжавшегося более одной минуты. Результаты второго и третьего успешных расчетов совпали, причем оптимальные значения настроечных параметров с точностью до трех значащих цифр соответственно равны  $k_1 = -3,33 \cdot 10^{-1}$ ,  $k_2 = 4,38$ ,  $k_3 = 1,55$ ,  $k_4 = 2,25 \cdot 10^{-1}$ . В четвертом расчете был получен результат  $k_1 = 4,68 \cdot 10^1$ ,  $k_2 = 4,25$ ,  $k_3 = 1,66$ ,  $k_4 = 2,62 \cdot 10^{-1}$  со значением целевой функции (12), равным  $1,2 \cdot 10^2$ , свидетельствующий о наличии у нее локального минимума. Естественно, что этот результат нельзя принять в качестве решения задачи параметрической идентификации (11), (12).

Далее согласно упомянутой методике были разорваны внутренние измеряемые дуги  $y_3, y_6$  и получен модифицированный граф в виде комплекса  $K^*$  взаимосвязанных модулей  $M_1, M_2, M_3, M_4$ , представленный на рис. 6.

У этого комплекса измеряются входные переменные  $x_1, x_2, y_3, y_6$  и выходные переменные  $y_3, y_6, y_7, y_8$ , т.е. он имеет те же координаты адекватности, что и исходная модель.

При идентификации комплекса  $K^*$  использованы целевая функция вида (12) и математическая модель, отличающаяся от исходной модели (11) тем, что в правых частях первого, шестого, седьмого и восьмого уравнений значения  $y_3$  и  $y_6$  равны экспериментальным значениям  $y_3^3$  и  $y_6^3$ .

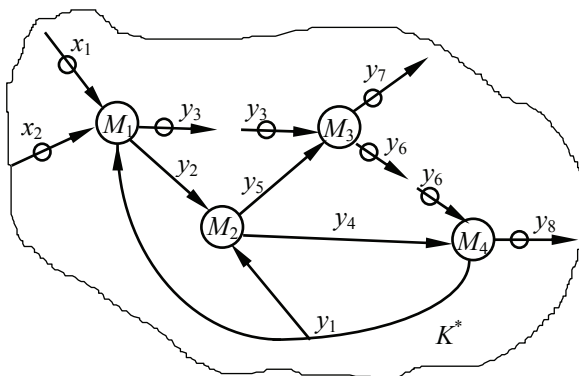


Рис. 6 Модифицированный граф модели системы для варианта 3

Использование здесь метода Нелдера – Мида с теми же характеристиками, что и во всех предыдущих случаях, позволило получить решение  $k_1 = -3,33 \cdot 10^{-1}$ ,  $k_2 = 4,38$ ,  $k_3 = 1,55$ ,  $k_4 = 2,25 \cdot 10^{-1}$  для таких же начальных приближений, как и ранее. Причем значение целевой функции не превысило  $1 \cdot 10^{-19}$ , а машинное время во втором и третьем расчетах соизмеримо со временем, затраченным на решение задачи идентификации исходной модели.

Применение этого решения в качестве начального приближения в задаче оптимизации (11), (12) приводит к такому же принципиальному результату, что в первом и втором вариантах, т. е. найденные при идентификации модифицированной модели настроечные параметры являются решением задачи идентификации исходной модели.

### 3 Заключение

Проведенные вычисления позволяют сделать вывод о том, что вместо традиционного подхода к задаче параметрической идентификации математических моделей статических режимов СТС следует использовать новый подход, заключающийся в решении задачи параметрической идентификации модифицированной модели, состоящей из независимых комплексов и модулей. Когда «прямое» решение задачи параметрической идентификации исходной модели не было получено, обращение к более простым задачам идентификации комплексов и модулей давало результат, а в других случаях, когда «прямое» решение было найдено, получены точно такие же результаты, но со значительным выигрышем во времени.

#### *Список литературы*

1. Сейдж Э.П., Мэлса Д.Л. Идентификация систем управления. – М.: Наука, 1974. – 246 с.
2. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 683 с.
3. Goodwin G.C., Payne R.L. Dynamic System Identification: Experiment Design and Data Analysis. – New York: Academic Press, 1977. – 237 p.
4. Гроп Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
5. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
6. Современные методы идентификации систем / Под ред. П.Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
7. Райбман Н.С. Идентификация объектов управления // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 6. – С. 80-93.
8. Young P. Parameter Estimation for Continuous – Time Models // Automatic. – 1981. – V. 17, No.1. – Pp. 23-39.
9. Эйкхофф П. Оценка параметров и структурная идентификация (Обзор) // Автоматика. – 1987. – № 6. – С. 21-38.
10. Бодров В.И., Кулаков Ю.В., Шамкин В.Н. Методика параметрической идентификации математической модели статических режимов сложной технологической системы // Вестник ТГТУ. – 1997. – Т. 3, №4. – С. 372-379.
11. Банди Б. Методы оптимизации: Вводный курс. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

## Calculation of Initial Estimate at Parametrical Identification of Mathematical Models of Static Modes for Complex Technological Systems

Yu.V. Kulakov, V.N. Shamkin

*Department "Information Technologies in Designing", TSTU*

**Key words and phrases:** apparatus module; complex technological system; model adequacy; model graph; parametrical identification of the model; static mathematical model; technological apparatus; tuning parameters.

**Abstract:** The examples of modeled on module principle of mathematical models for static modes of some technological system are given. The possibility of solving the problem of models parametrical identification under various systems of technological processes control is analyzed. It is shown that the initial task of model identification of complex system, which is traditionally regarded as rather complicated one, can be carried out by solving a set of simpler tasks of separate modules and their complexes identification.

---

### Berechnung der Anfangsnäherung bei der parametrischen Identifikation von mathematischen Modellen der statischen Arbeitsweisen der komplizierten technologischen Systeme

**Zusammenfassung:** Es sind die Beispiele der mathematischen nach dem Modulprinzip aufgebauten Modelle der statischen Arbeitsweisen des einigen technologischen Systems angeführt. Es wurde die Möglichkeit der Lösung der Aufgabe der parametrischen Identifikation von Modellen bei den verschiedenen Prüfungssystemen des technologischen Prozesses analysiert. Es ist gezeigt, daß die traditionell anstrengende Ausgangsaufgabe der Identifikation des Modells des komplizierten Systems als Gesamtheit von den einfacheren Aufgaben der Identifikation der Einzelmodule und ihrer Komplexe gelöst werden kann.

---

### Calcul de l'approximation initiale au cours de l'identification paramétrique des modèles mathématiques des régimes statiques des systèmes technologiques complexes

**Résumé:** Sont cités les exemples de la construction des modèles mathématiques d'après le principe modulaire pour un système technologique. Est analysée la possibilité de résolution du problème de l'identification paramétrique des modèles avec de différents systèmes du contrôle du processus technologique. Il est montré que le problème initial de l'identification des modèles du système complexe qui est traditionnellement difficile peut être réglé à la résolution de l'ensemble des problèmes plus simples de l'identification des modules isolés et de leurs complexes.