

S. S. Sukhantsev, Post-graduate, Perm State Humanity Education University

M. B. Gitman, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Perm National Research Polytechnic University

### Planning of Discrete Production Under Condition of Fuzzy Information

*The solution of a problem of planning and replanning of discrete production by the fuzzy sets theory is submitted. This problem is a two-criteria optimization problem, where criteria of the costs of production and personnel opinion are considered.*

**Key words:** production planning, incomplete information, Zade method.

УДК 622.691.4.052-52

**Б. В. Кавалеров**, доктор технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**Г. А. Килин**, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**И. В. Бахирев**, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## АЛГОРИТМ ПОИСКА НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ГТУ ДЛЯ ПРИВОДА ГПА

*Рассматривается автоматический поиск нелинейной модели, что в итоге приводит к значительной экономии времени при выборе модели ГТУ для привода ГПА. Отдельно для каждого уравнения происходит поиск наилучших нелинейных элементов, чем реализуется алгоритм структурной идентификации.*

**Ключевые слова:** система управления, линейные элементы, математическая модель, идентификация, нелинейный элемент, модуль.

**В** настоящее время в наземных целях используются конвертированные газотурбинные установки (ГТУ), которые создаются на базе авиационных газотурбинных двигателей.

Упрощенные модели ГТУ, как правило, формируются по данным экспериментов с помощью алгоритмов идентификации [1]. Главное преимущество таких моделей – высокое быстродействие, поэтому такие модели иногда называют быстрорешаемыми или быстросчетными. Быстрорешаемые модели предназначены для использования в задачах диагностики, настройки и оптимизации систем управления ГТУ, в тренажерных комплексах, при стендовых испытаниях установок различного назначения: для электростанций, для газоперекачивающих агрегатов, для авиационного применения. Быстрорешаемые модели могут быть как линейными, так и нелинейными [2].

Рассмотрим задачу автоматизированного формирования таких моделей исходя из необходимости обеспечить максимальную точность воспроизведения режимов. При этом приходится применять не только параметрическую, но и структурную идентификацию. Поэтому здесь требуется не только получить модель ГТУ, но и обосновано выбрать ее структуру. Рассмотрим последовательное усложнение применяемой структуры модели, приводящее в итоге к необходимости решения задачи структурной идентификации. В качестве примера использованы экспериментальные данные испытания ГТУ для газоперекачивающего агрегата (ГПА).

### Структура быстрорешаемой линейной модели ГТУ для ГПА

Идея быстрорешаемой модели состоит в объединении линейной динамической модели и нели-

нейных статических характеристик ГПА. Данный класс моделей позволяет обеспечить точность в границах 2–5 % [1].

Принятая модель учитывает аккумуляцию энергии во вращающихся массах роторов двухвальной ГТУ, инерционность по расходу топлива и повороту дозатора топливного газа.

Уравнение угла дозатора газа:

$$\dot{A}_{DI} = a_{11}A_{DI} + a_{12}G_T + a_{13}n_{TK} + a_{14}. \quad (1)$$

Уравнение расхода топлива:

$$\dot{G}_T = a_{21}A_{DI} + a_{22}G_T + a_{23}n_{TK} + a_{24}. \quad (2)$$

Уравнение частоты вращения турбокомпрессора:

$$\dot{n}_{TK} = a_{31}A_{DI} + a_{32}G_T + a_{33}n_{TK} + a_{34}V_{NA} + a_{35}. \quad (3)$$

Уравнение частоты вращения свободной турбины:

$$\dot{n}_{C.T} = a_{41}A_{DI} + a_{42}G_T + a_{43}n_{TK} + a_{44}M_{KR} + a_{45}n_{C.T} + a_{46}. \quad (4)$$

В уравнениях приняты обозначения:

$A_{DI}$  – угол поворота дозатора газа;

$G_T$  – расход топлива;

$n_{TK}$  – частота вращения ротора турбокомпрессора;

$n_{C.T}$  – частота вращения ротора свободной турбины;

$M_{KR}$  – крутящий момент с датчика ИКМ;

$V_{NA}$  – входной направляющий агрегат.

Для оценки коэффициентов быстрорешаемой модели здесь и далее использован метод наименьших квадратов как требующий наименьшей априорной информации [3].

**Адекватность линейной модели.** Для испытания линейной модели (1)–(4) на ее вход подавалась экспериментальная кривая угла дозатора топлива. На

рис. 1 и 2 представлены графики модельной и экспериментальной кривой на всем эксперименте.

Адекватность оценивалась по методу Тейла [4] (табл. 1).

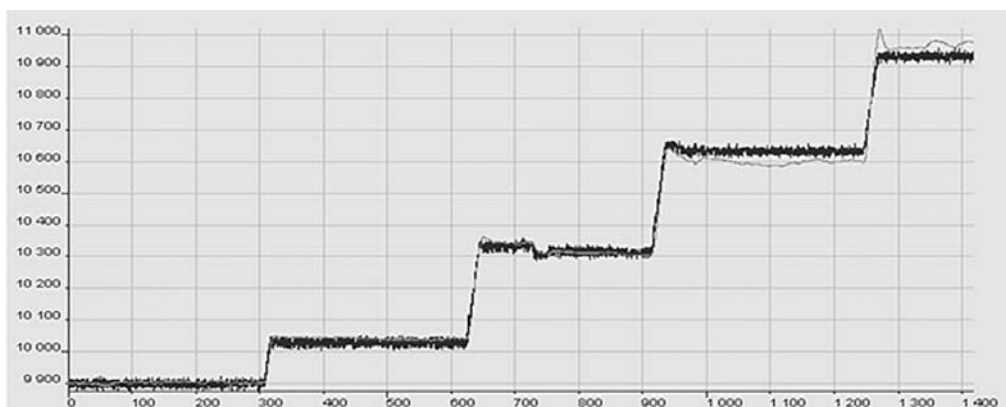


Рис. 1. Переходный процесс частоты вращения турбокомпрессора (темная – экспериментальная, светлая – модельная)

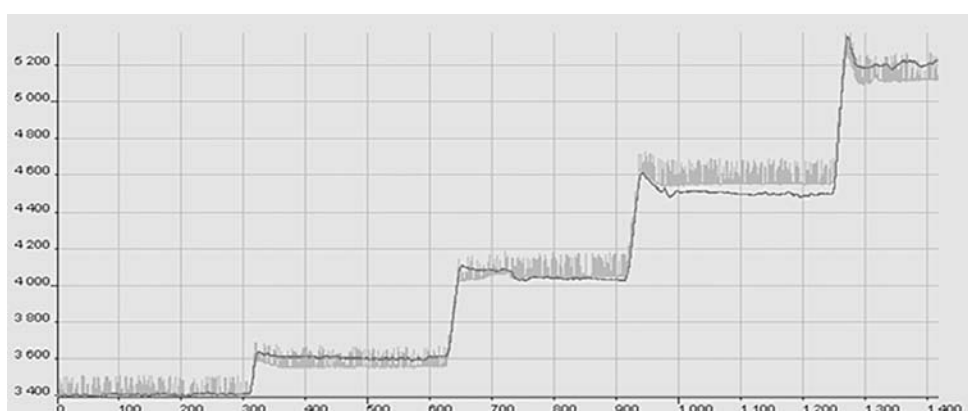


Рис. 2. Переходный процесс частоты вращения свободной турбины (темная – модельная, светлая – экспериментальная)

Таблица 1. Мера адекватности линейной модели

Переменная	$A_{DI}$	$G_T$	$n_{TK}$	$n_{CT}$
Мера адекватности	0.00246	0.00973	0.00235	0.01269

### Структура быстро решаемой нелинейной модели ГТУ для ГПА

Следующим этапом проводимых исследований является автоматический поиск нелинейной части модели, что в итоге приведет к значительной экономии времени при поиске модели для ГТУ различных версий применения.

Отдельно для каждого уравнения происходит поиск наилучших нелинейных элементов, чем реализуется алгоритм структурной идентификации. В результате удалось существенно повысить адекватность модели за счет подбора конкретной структуры уравнений (5)–(8). Алгоритм поиска нелинейных элементов модели представлен на рис. 3.

Для поиска структуры использовались следующие условия:

- 1) количество нелинейных элементов – 3;
- 2) количество переменных в нелинейном элементе – 2.

В результате выполнения алгоритма (рис. 3) получена следующая модель.

Уравнение угла дозатора газа:

$$\dot{A}_{DI} = a_{11}A_{DI} + a_{12}G_T + a_{13}n_{TK} + a_{14} + a_{15}A_{DI}A_{DI}. \quad (5)$$

Уравнение расхода топлива:

$$\dot{G}_T = a_{21}A_{DI} + a_{22}G_T + a_{23}n_{TK} + a_{24} + a_{25}A_{DI}G_T + a_{26}n_{TK}n_{CT}. \quad (6)$$

Уравнение частоты вращения турбокомпрессора:

$$\dot{n}_{TK} = a_{31}A_{DI} + a_{32}G_T + a_{33}n_{TK} + a_{34}V_{NA} + a_{35} + a_{36}A_{DI}A_{DI} + a_{37}n_{TK}n_{TK}. \quad (7)$$

Уравнение частоты вращения свободной турбины:

$$\dot{n}_{CT} = a_{41}A_{DI} + a_{42}G_T + a_{43}n_{TK} + a_{44}M_{KR} + a_{45}n_{CT} + a_{46} + a_{47}A_{DI}A_{DI}. \quad (8)$$

**Адекватность нелинейной модели.** Для испытания нелинейной модели (5)–(8) на ее вход подавалась экспериментальная кривая угла дозатора топлива. На рис. 4 и 5 представлены графики модельной и экспериментальной кривой на всем эксперименте.

В табл. 2 представлена оценка адекватности по методу Тейла [4].

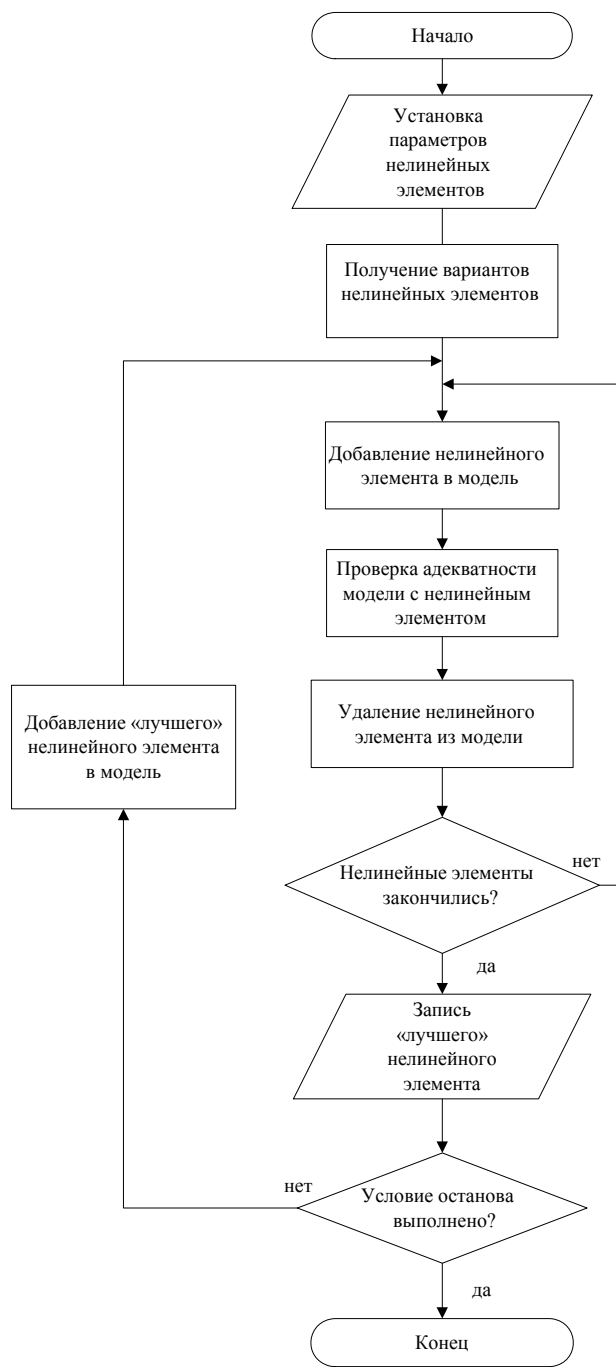


Рис. 3. Алгоритм поиска нелинейных элементов модели

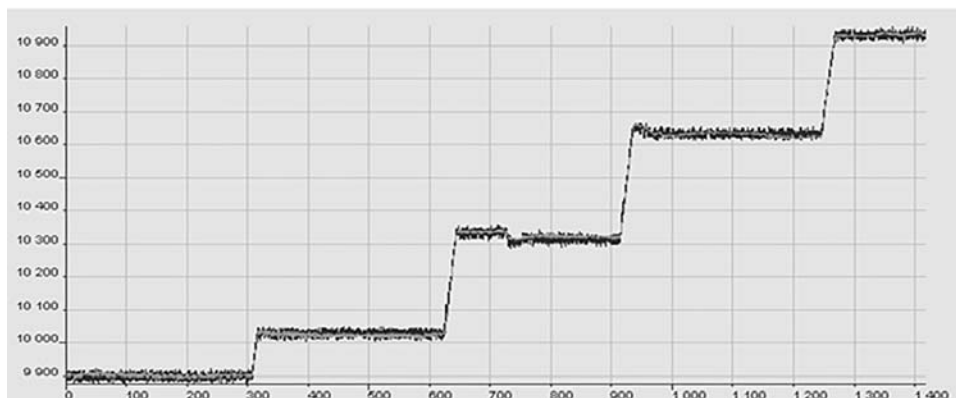


Рис. 4. Переходный процесс частоты вращения турбокомпрессора (темная – экспериментальная, светлая – модельная)

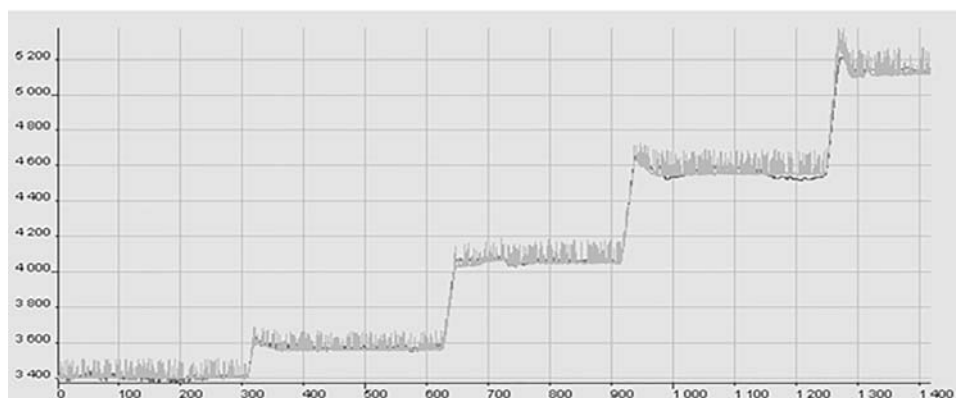


Рис. 5. Переходный процесс частоты вращения свободной турбины (темная – модельная, светлая – экспериментальная)

Таблица 2. Мера адекватности нелинейной модели

Переменная	$A_{DL}$	$G_T$	$n_{TK}$	$n_{CT}$
Мера адекватности	0,00244	0,00694	0,00089	0,00785

### Заключение

Рассмотренный алгоритм предназначен для оптимизации поиска нелинейных моделей ГТУ различных вариантов использования: в электростанциях, в газоперекачке, при авиационном использовании [5].

На основе разработанных алгоритмов и методик формируется специализированный модуль для многофункциональных тренажерных комплексов, который планируется к использованию на предприятиях авиационного двигателестроения.

### Библиографические ссылки

1. Гольберг Ф. Д., Батенин А. В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления. – М. : Изд-во МАИ, 1999. – 82 с.
2. Идентификация и диагностика в информационно-управляющих системах авиакосмической энергетики / Б. В. Боев, В. В. Бугровский, М. П. Вершинин [и др.]. – М. : Наука, 1988. – 168 с.
3. Алгоритм построения быстрорешаемой модели газотурбинной газоперекачивающей установки по экспериментальным данным / Б. В. Кавалеров, К. А. Один, Г. А. Килин, И. В. Бахирев, А. Ю. Поварницын // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 3. – С. 116–118.
4. Тейл Г. Эконометрические прогнозы и принятие решений. – М. : Статистика, 1971. – 488 с.
5. Исследование взаимовлияния систем управления газотурбинной установкой и электрогенератором при автоматизированной настройке регуляторов / А. И. Полулях, И. Г. Лисовин, Б. В. Кавалеров, А. А. Шигапов // Вестник Воронежского гос. тех. ун-та. – 2011. – Т. 7. – № 11.1. – С. 129–132.

*B. V. KavaleroV*, DSc in Engineering, Perm National Research Polytechnic University

*G. A. Kilin*, Post-graduate, Perm National Research Polytechnic University

*I. V. Bakhirev*, Post-graduate, Perm National Research Polytechnic University

### Algorithm of Search of GTU Nonlinear Model for GPU Drive

*Automatic search of nonlinear model is considered, thus resulting in the considerable saving of time at a GTU model choice for the GPA drive. Separately for each equation there is a search of the best nonlinear elements, implementing therefore the algorithm of structural identification.*

**Key words:** control system, linear elements, mathematical model, identification, nonlinear element, module.