

УДК 622.691.4.052-52

Б. В. Кавалеров, кандидат технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет
К. А. Один, Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Г. А. Килин, магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет
И. В. Бахирев, магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет
А. Ю. Поварницын, магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРОРЕШАЕМОЙ МОДЕЛИ ГАЗОТУРБИННОЙ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Рассмотрен алгоритм идентификации газотурбинной установки для газоперекачивающего агрегата по данным наблюдения за входными и выходными переменными. Быстрорешаемая модель предназначена для организации процедуры настройки системы управления газоперекачивающего агрегата.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, система управления, математическая модель, идентификация.

В соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 в рамках разработки методологии и программно-технических средств интеллектуализации единого центра многоцелевых испытаний газотурбинных установок ОАО «Протон – Пермские моторы» предложено формировать по результатам испытаний быстрорешаемые модели газотурбинных установок (ГТУ). Такие модели предназначены для использования в задачах диагностики, настройки и оптимизации систем управления ГТУ при стендовых испытаниях установок различного назначения: для электростанций, газоперекачки, авиационного применения.

Кратко рассмотрим технологию испытаний. Газоперекачивающий агрегат (ГПА), в состав которого входят центробежный компрессор и ГТУ, размещается на специальном стенде, где производятся его испытания в различных режимах работы. ГПА может быть работоспособен только при наличии системы автоматического управления (САУ), которая состоит из ГПА и устройств управления [1]. Поэтому испытания ГПА сопровождаются испытаниями САУ. В ходе натурных испытаний ГПА испытателям предоставляется возможность подстройки алгоритмов управления САУ за счет изменения коэффициентов в ограниченных пределах. Такая подстройка выполняется на каждой индивидуальной ГПА, результаты этой подстройки сопровождают ГПА в течение всего ее жизненного цикла. Поэтому операции испытаний, включающие настройку и подстройку САУ, имеют важное значение для эксплуатационных показателей ГПА. Одним из мощных средств повышения эффективности испытаний является их автоматизация за счет проведения настройки САУ на быстрорешаемых моделях ГПА, полученных по результатам наблюдения за поведением реального объекта испытаний или его полной структурно-сложной поэлементной модели [1]. В статье рассматривается алгоритм получения такой модели.

Структура быстрорешаемой модели ГПА

Идея быстрорешаемой модели состоит в объединении линейной динамической модели и нелинейных статических характеристик ГПА. Данный класс моделей позволяет обеспечить точность в границах 2–5 %. Принятая модель учитывает аккумуляцию энергии во вращающихся массах роторов двухвальной ГПА и описывается следующими уравнениями:

Уравнение расхода топлива:

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

Уравнение частоты вращения турбокомпрессора:

$$\dot{n}_{TK} = a_{21}A_{DI} + a_{22}G_T + a_{23}n_{TK} + a_{24}V_{NA}. \quad (2)$$

Уравнение частоты вращения свободной турбины:

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

В уравнениях приняты обозначения:

A_{DI} – угол поворота дозатора газа;

G_T – расход топлива;

n_{TK} – частота вращения ротора турбокомпрессора;

n_{CT} – частота вращения ротора свободной турбины;

M_{KR} – крутящий момент с датчика ИКМ;

V_{NA} – угол поворота входной заслонки/

Алгоритм оценки коэффициентов быстрорешаемой модели

Для оценки коэффициентов быстрорешаемой модели в качестве метода идентификации выбран метод наименьших квадратов как требующий наименьшей априорной информации [2]. Модель (1)–(3) ищется в следующем виде [3]:

$$Y = AX, \quad (4)$$

где Y – вектор выходных переменных; X – вектор входных переменных; A – матрица коэффициентов размерностью $n \times n$, которую следует идентифицировать.

Из уравнения (4) следует, что

$$A = Y_{\Sigma} X_{\Sigma}^{-1}, \quad (5)$$

где Y_{Σ} и X_{Σ} – матрицы, составленные из n векторов Y и X соответственно.

Если наблюдений больше, чем n , применяется метод наименьших квадратов в следующей форме записи:

$$A = Y_{\Sigma} X_{\Sigma}^T (X_{\Sigma} X_{\Sigma}^T)^{-1}, \quad (6)$$

или $A = Y_{\Sigma} X_{\Sigma}^+$, где матрица X_{Σ}^+ – псевдообратная матрица, такая что $X_{\Sigma} X_{\Sigma}^+ X_{\Sigma} = X_{\Sigma}$. Известно, что она является наилучшей аппроксимацией (по методу наименьших квадратов) соответствующей системы линейных уравнений [4, 5].

Алгоритм идентификации представлен на рис. 1.

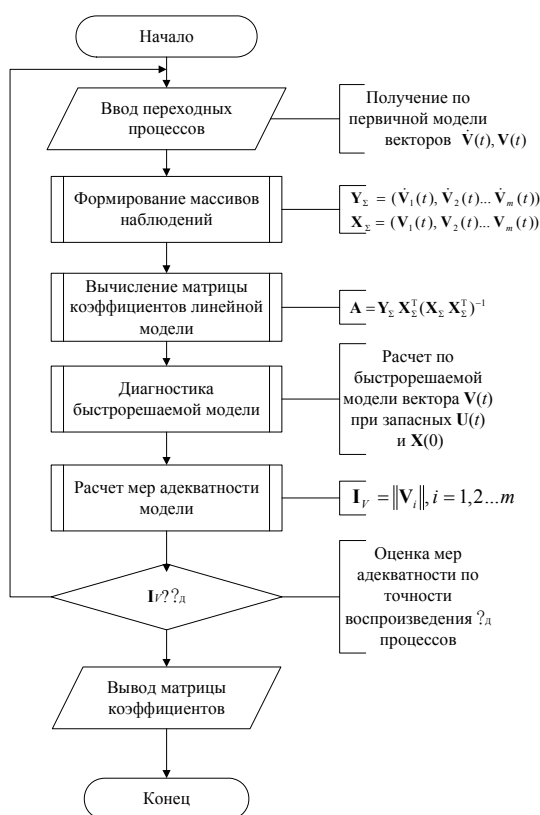


Рис. 1. Алгоритм идентификации

Пример расчета

Значения коэффициентов модели (1)–(3), полученные в результате идентификации переходного процесса при увеличении мощности нагрузки от 5,0 до 5,6 МВт, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты модели

a_{11}	a_{12}	a_{13}	–	–
48,9506	–0,4606	–0,0816		
a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	–
86,273	0,4302	–0,488	–66,942	
a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}
78,4132	1,7234	0,4323	36,2821	–2,7952

В результате параметрической идентификации были получены также статические характеристики ГПА. На рис. 2 и 3 представлены два из них.

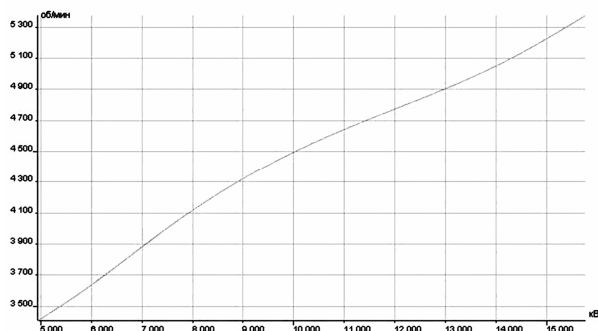


Рис. 2. Зависимость скорости вращения свободной турбины от вырабатываемой мощности интерполированная кубическим сплайном

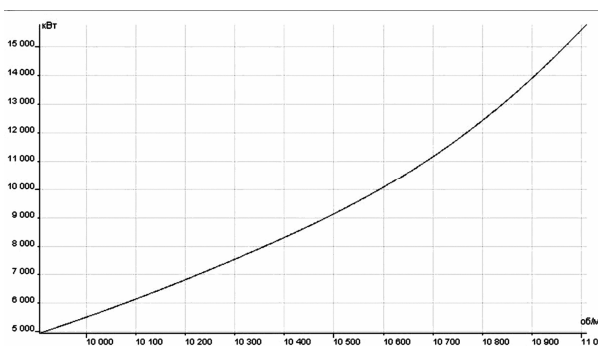


Рис. 3. Зависимость вырабатываемой мощности от скорости вращения турбокомпрессора интерполированная кубическим сплайном

Для оценки адекватности модели на ее вход подавалась экспериментальная кривая угла дозатора топлива. В таблице 2 представлена адекватность модели по методу Тейла [5].

По методу Тейла модель, как правило, считается адекватной, если полученная оценка меньше 0,1 (см. табл. 2).

Таблица 2. Адекватность модели

Номер участка переходного процесса	G_T	n_{TK}	n_{CT}
1	0,00543	0,00141	0,00680
2	0,00527	0,00173	0,0067
3	0,00628	0,00257	0,00731

На рис. 4 и 5 представлены графики модельной и экспериментальной кривой переходного процесса при увеличении мощности нагрузки от 5,0 до 5,6 МВт.

Заключение

Полученная модель обеспечивает требуемую адекватность. Разработанный алгоритм используется в программном моделирующем комплексе «ЭлектроДин» для компьютерной имитации режимов работы ГТУ различного назначения, настройки и испытания систем автоматического управления

энергетических установок с целью предварительной настройки систем автоматического управления ГТУ.

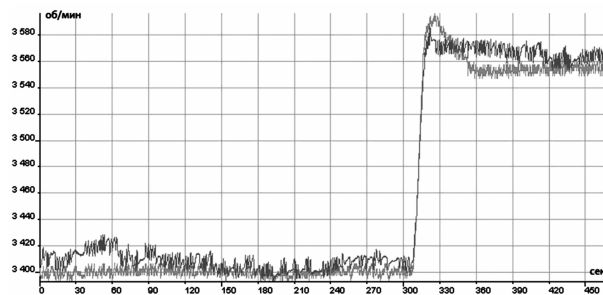


Рис. 4. Переходный процесс скорости вращения свободной турбины (темная – модельная, светлая – экспериментальная)

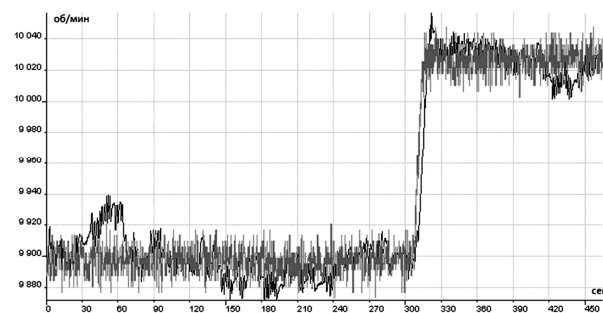


Рис. 5. Переходный процесс скорости вращения турбокомпрессора (темная – модельная, светлая – экспериментальная)

Для дальнейшего повышения адекватности модели следует рассмотреть возможности реализации ее в классе нелинейных моделей. Исследования в этом направлении продолжаются.

Библиографические ссылки

1. Гольберг Ф. Д., Батенин А. В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 82 с.
2. Эйхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценка параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 685 с.
3. Кавалеров Б. В. Идентификационная модель электрической нагрузки для испытания систем управления газотурбинных мини-электростанций // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 7. – № 1. – С. 85–91.
4. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 560 с.;
5. Тейл Г. Эконометрические прогнозы и принятие решений. – М.: Статистика, 1971. – 488 с.

*B. V. Kavalero*v, PhD in Engineering, Perm National Research Polytechnic University

K. A. Odin, Perm National Research Polytechnic University

G. A. Kilin, Master's Degree student, Perm National Research Polytechnic University

I. V. Bakhirev, Master's Degree student, Perm National Research Polytechnic University

A. Yu. Povarnitsyn, Master's Degree student, Perm National Research Polytechnic University

Algorithm of Creating the Fast-Solved Model of Gas-Turbine Gas-Distributing Unit on Experimental Data

The paper considers the algorithm of identifying the gas-distributing unit according to observation results for input and output variables. The fast-solved model is intended to organize the procedure of adjusting the control systems of the gas-distributing unit.

Key words: gas-distributing unit, control system, mathematical model, identification.