

- Типы заданий.
- Оценивание теста и заданий.
- Виды результатов.
- Часто задаваемые вопросы.

Однако так как учитель (администратор) может не в совершенстве владеть возможностями компьютера, то стиль изложения лучше выбрать пошаговый, т. е. последовательно разбирающий все этапы.

Для школьников лучше всего сделать иллюстрированное пособие, чтобы подходило для детей любого возраста. В содержании можно ограничиться лишь описанием работы программы, а именно функциями, необходимыми для проведения теста, и способом получения результатов тестирования. Также не лишним будет, когда все эти возможности будут заложены и в самой программе в меню «Справка».

Важно не забывать, что при изменении программного продукта, нужно изменять и руководство пользователя, для того чтобы оно оставалось актуальным. Также следует использовать одни и те же

Получено 02.03.2015

понятные названия элементов повествования во избежание недопонимания и путаницы.

Качественно составленное руководство пользователя не только облегчит эксплуатацию программного продукта, но повлияет на дальнейшее сотрудничество с пользователями.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 34.201–89. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначения документов при создании автоматизированных систем. – Взамен ГОСТ 24.101–80, ГОСТ 24.102–80; введ. 24.03.89. – Минск : Изд-во стандартов, 1999. – 10 с.

2. ГОСТ 2.105–95. Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам. – Взамен ГОСТ 2.105–79, ГОСТ 2.906–71; введ. 30.06.1996. – Минск : Изд-во стандартов, 2007. – 28 с.

3. ГОСТ 19.001–77. Единая система программной документации. Общие положения; введ. 01.01.1980. – М. : Стандартформ, 2010. – 6 с.

УДК 622.691.4.052-52

Г. А. Килин, магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ПОЛУЧЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «ГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА – СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР» С ПОМОЩЬЮ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Опубликованные в статье результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ № 13.832.2014/К «Разработка методологических основ адаптивного управления автономными и неавтономными газотурбинными электростанциями мощностью до 25 МВт».

В настоящее время конвертированные авиационные газотурбинные установки (ГТУ) достаточно широко используются для построения на их основе электростанций мощностью до 25 МВт [1].

Получаемая математическая модель взаимодействующих ГТУ и синхронного генератора (СГ) (модель «ГТУ – СГ») предназначена для совершенствования, настройки, тестирования и отладки систем автоматического управления (САУ) ГТУ. Ранее апробированные и отработанные для получения математических моделей ГТУ различных версий применения алгоритмы легли в основу данной работы [2, 3].

Структура быстро решаемой модели «ГТУ – СГ»

Идея быстро решаемой (или быстросчетной) модели состоит в объединении линейной динамической модели ГТУ и нелинейных статических характеристик ГТУ. Данный класс моделей позволяет обеспечить точность в границах 2...5 % и существенно сократить время расчета, чем и объясняется их на-

звание [4]. Объединим ранее полученную быстро решаемую модель ГТУ [5] с переменными, характеризующими рабочий процесс в СГ (U_f , U , I). В результате получим быстро решаемую модель «ГТУ – СГ», на рис. 1 представлена ее структура. Исходные данные для проведения идентификации получены в ходе работы с программно-моделирующим комплексом (ПМК) «КМЭС» [6]. В ПМК содержатся сложная поэлементная модель ГТУ и сложная многоконтурная модель СГ.

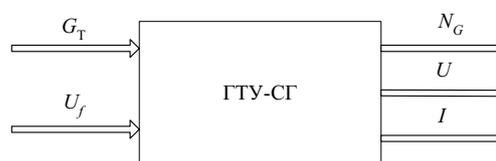


Рис. 1. Структурная схема модели «ГТУ – СГ»

Принятая модель описывается дифференциальными уравнениями.

Уравнение частоты вращения турбокомпрессора ГТУ:

$$\dot{n}_{\text{TK}} = a_{11}G_{\text{T}} + a_{12}n_{\text{TK}} + a_{13}n_{\text{CT}} + a_{14}U_f. \quad (1)$$

Уравнение частоты вращения свободной турбины ГТУ:

$$\dot{n}_{CT} = a_{21}G_T + a_{22}n_{TK} + a_{23}n_{CT} + a_{24}N_G + a_{25}U_f + a_{26}U + a_{27}I. \quad (2)$$

Уравнение действующего линейного напряжения СГ:

$$\dot{U}_{CT} = a_{31}G_T + a_{32}n_{CT} + a_{33}N_G + a_{34}U_f + a_{35}U + a_{36}I. \quad (3)$$

Уравнение активной вырабатываемой мощности СГ:

$$\dot{N}_G = a_{41}G_T + a_{42}n_{CT} + a_{43}N_G + a_{44}U_f + a_{45}U + a_{46}I. \quad (4)$$

Уравнение действующего значения тока статора СГ:

$$\dot{I} = a_{51}n_{CT} + a_{52}N_G + a_{53}U_f + a_{54}U + a_{55}I. \quad (5)$$

В уравнениях приняты обозначения: G_T – расход топлива (кг/ч); n_{TK} – частота вращения ротора турбокомпрессора (об/мин.); n_{CT} – частота вращения ротора свободной турбины (об/мин.); N_G – активная вырабатываемая мощность генератора (кВт); U_f – напряжение обмотки возбуждения генератора (В); U – действующее линейное напряжение генератора (В); I – действующее значение тока генератора (А).

Отметим, что модель (1)–(5) содержит перекрестные связи. В самом деле, расход топлива G_T и другие

переменные ГТУ входят в уравнения СГ (3), (4), (5). В свою очередь, в уравнения ГТУ (1), (2) включены напряжение возбуждения генератора U_f и другие переменные СГ. Наличие перекрестных связей необходимо учитывать при управлении системой. На это важное обстоятельство применительно к системе «первичный двигатель – электрогенератор» указывалось уже давно [7].

Первичная проверка быстро решаемой модели «ГТУ – СГ»

Мало получить экспериментальные данные, необходимо убедиться, что после их обработки (идентификации) [8, 9, 10], результат будет корректным, и их в дальнейшем можно будет использовать. Вначале произведем проверку для одного из возможных режимов работы. На рис. 2 (индекс 1 – экспериментальная кривая, индекс 2 – модельная кривая) представлено сравнение экспериментальной кривой, полученной при моделировании на ПМК «КМЭС», и модельной кривой при моделировании на основе уравнений (1)–(5) с коэффициентами a_{ij} , полученными в процессе идентификации (расход топлива равен 1140 кг/ч, напряжение обмотки возбуждения изменяется с 250 В до 300 В). В табл. 1 показаны некоторые из них. Чем выше мера адекватности по критерию Тейла [11] (табл. 2), тем точнее полученная быстро решаемая модель. Модель (1)–(5) считается адекватной, если по критерию Тейла ее мера адекватности меньше 0,1. Проверка выполнена и для всех остальных переменных модели (1)–(5).

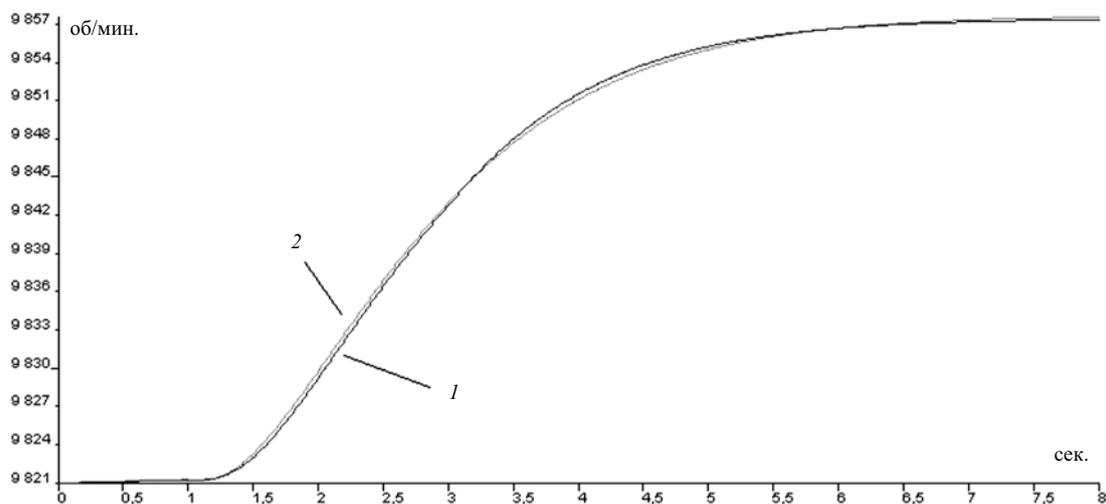


Рис. 2. График частоты вращения турбокомпрессора

Таблица 1. Коэффициенты модели, полученные в ходе идентификации

Значение коэффициента a_{11}	Значение коэффициента a_{12}	Значение коэффициента a_{13}	Значение коэффициента a_{14}
9,83801110830	-1,11582087038	-0,126080350487	-0,0323738998
Значение коэффициента a_{21}	Значение коэффициента a_{22}	Значение коэффициента a_{23}	Значение коэффициента a_{24}
10,066833227	1,67120182188	-2,26027970761	3,039374683052
Значение коэффициента a_{25}	Значение коэффициента a_{26}	Значение коэффициента a_{27}	
-1,1444196694064	-3,242826588451	-24,8831803202	

Таблица 2. Мера адекватности модели по критерию Тейла

Мера адекватности n_{TK}	Мера адекватности n_{CT}	Мера адекватности U	Мера адекватности N_G	Мера адекватности I
$2,7619634 \cdot 10^{-4}$	$7,65065 \cdot 10^{-4}$	$2,11005 \cdot 10^{-4}$	$7,76643 \cdot 10^{-4}$	$2,9362 \cdot 10^{-4}$

Первичная проверка для одного из режимов показала достаточную адекватность. Но модель должна быть многорежимной. Поэтому коэффициенты a_{ij} модели (1)–(5) должны зависеть от режима работы.

Построение многорежимной модели «ГТУ – СГ» при изменении расхода топлива и напряжения обмотки возбуждения

Как отмечено выше, коэффициенты a_{ij} зависят от переменных модели (1)–(5): $a = f(x)$, где a – матрица коэффициентов модели (1)–(5), $x = (G_T, n_{TK}, n_{CT}, N_G, U_f, U, I)^T$ – вектор состояния. Именно поэтому модель (1)–(5) относится к классу нелинейных моделей. Предварительные исследования показали, что наибольшее влияние на коэффициенты a_{ij} оказывают переменные G_T и n_{TK} . Поэтому коэффициенты являются функцией двух аргументов $a_{ij} = f(G_T, n_{TK})$

и представляют собой двухмерную поверхность (пример такой поверхности для a_{11} показан на рис. 3, по оси X – частота вращения турбокомпрессора n_{TK} , по оси Y – расход топлива G_T , по оси Z – значение коэффициента a_{11}).

Алгоритм идентификации реализует последовательность действий, представленных на рис. 4.

Для тестирования многорежимной быстро решаемой модели была выбрана независимая выборка изменения расхода топлива и напряжения обмотки возбуждения. Сравнение модельных данных с экспериментальными данными представлено на рис. 5 и 6 (индекс 1 – экспериментальная кривая, индекс 2 – модельная кривая. Мера адекватности по критерию Тейла [12] для каждой переменной модели (1)–(5) представлена в табл. 3.

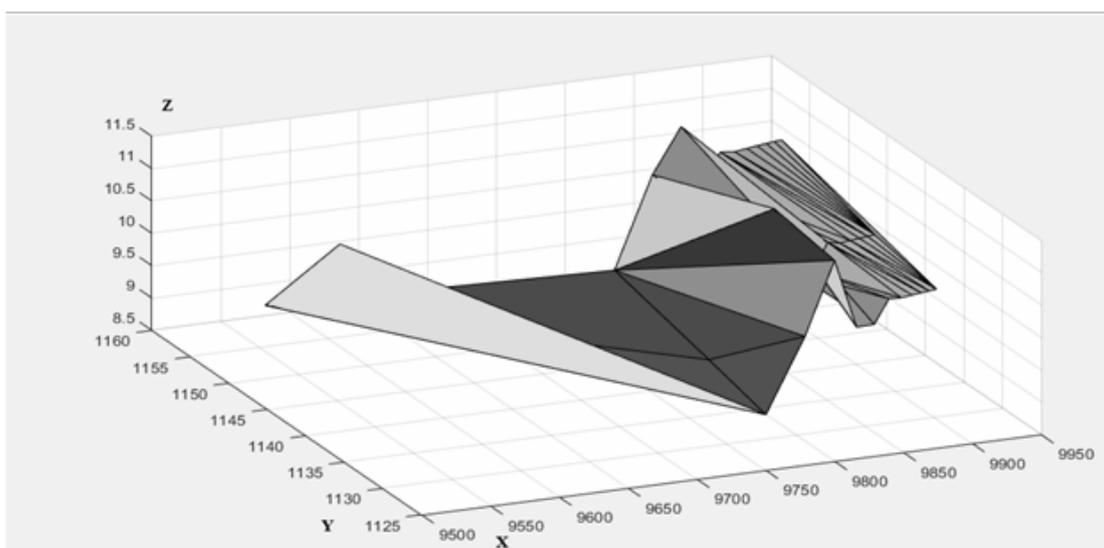


Рис. 3. Поверхность коэффициента a_{11}



Рис. 4. Алгоритм нахождения коэффициентов многорежимной быстро решаемой модели

Таблица 3. Мера адекватности по критерию Тейла

Мера адекватности n_{TK}	Мера адекватности n_{CT}	Мера адекватности U	Мера адекватности N_G	Мера адекватности I
$5,7535396 \cdot 10^{-4}$	0,035595	0,035092716	0,0220507	0,009482

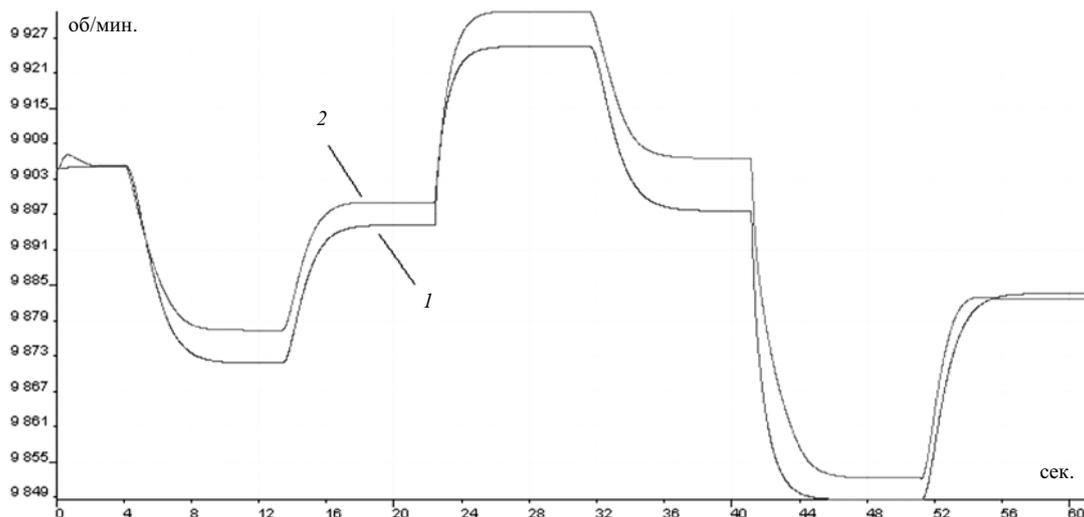


Рис. 5. Изменение частоты вращения турбокомпрессора ГТУ

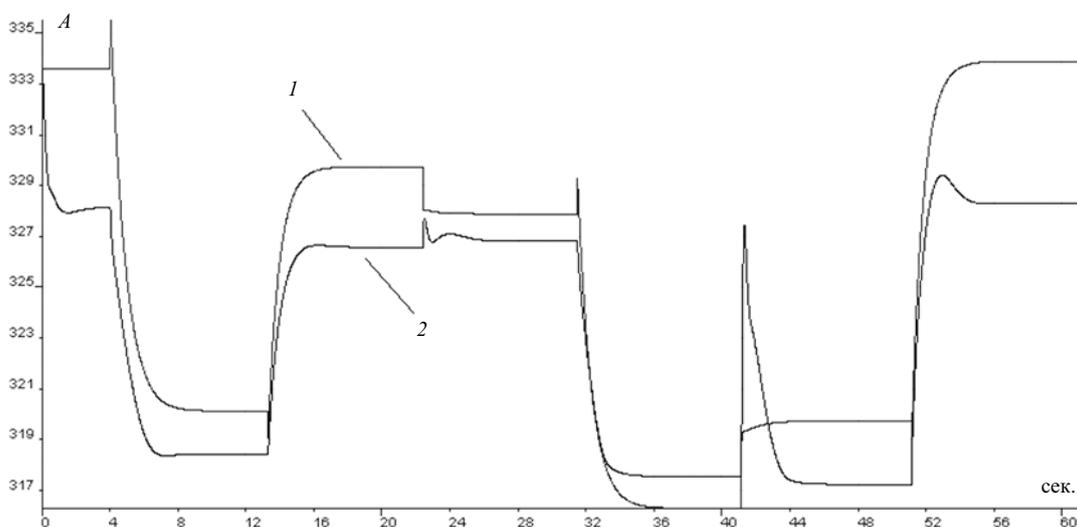


Рис. 6. Изменение действующего значения тока СГ

Заключение

Полученная многорежимная модель обеспечивает требуемую адекватность. Продолжаются работы по дальнейшему повышению адекватности модели (1)–(5) и расширению диапазона ее использования для моделирования всех основных рабочих режимов реальной установки «ГТУ – СГ».

Особого внимания требует оценка взаимозависимости переменных модели (1)–(5). Такое исследование позволит в дальнейшем проанализировать перекрестные связи в системе «ГТУ – СГ» и организовать поиск возможных решений по устранению или использованию этого эффекта.

Библиографические ссылки

1. Автоматизация настройки регуляторов газотурбинных мини-электростанций при компьютерных испытаниях / А. И. Полулях, И. Г. Лисовин, Б. В. Кавалеров, А. А. Шигапов // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 6. – С. 14–17.

2. Килин Г. А., Кавалеров Б. В., Один К. А. Построение быстро решаемой модели ГТУ для автоматизированной настройки систем управления // Научные исследования и инновации. – 2012. – № 1–4. – С. 157–164.

3. Алгоритм построения быстро решаемой 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(59). – С. 116–118.

4. 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.

5. Алгоритм построения быстро решаемой модели газотурбинной газоперекачивающей установки по экспериментальным данным.

6. Св. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611839 РФ. Программный комплекс «Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети» «КМЭС» / А. Б. Петроченков, Б. В. Кавалеров, А. А. Шигапов, К. А. Один, А. И. Полулях, А. С. Ситников, И. Г. Лисовин, Е. Н. Ширинкина. – Дата регистрации 28.02.2011.

7. Морозовский В. Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. – М. : Энергия, 1970. – 288 с.

8. Эйхгофф П. Основы идентификации систем управления. Оценка параметров и состояния. – М. : Мир, 1975. – 685 с.

9. Кавалеров Б. В. Идентификационная модель электрической нагрузки для испытания систем управления

Получено 14.03.2015

газотурбинных мини-электростанций // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 7. – № 1. – С. 85–91.

10. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. – М. : Физматлит, 2004. – 560 с.

11. Тейл Г. Эконометрические прогнозы и принятие решений. – М. : Статистика, 1971. – 488 с.

12. Там же.

УДК 681.536.5 : 543.544

Н. О. Вздудева, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

В. Б. Гитлин, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ОЦЕНКА НАЧАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СКВАЖНОСТИ В СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОСТАТОВ ХРОМАТОГРАФА

Существенной особенностью работы термостатов газовых хроматографов является широкий диапазон рабочих температур и жесткие требования к стабильности поддержания температуры в ходе хроматографического эксперимента [1–3]. Например, рабочий диапазон температур хроматографа ЛГХ-3000 имеет пределы от 30 до 400 °С, а допустимое отклонение текущей температуры термостата от температуры уставки газовых колонок не

должен превышать 0,1 °С во всем диапазоне рабочих температур [4, 5]. Конструктивные особенности термостатов, физические свойства отдельных его компонентов и широкий диапазон рабочих температур являются причиной существенных нелинейностей, характерных для процесса управления температурой термостата [6–8]. Схема автоматической системы управления температурой термостатов хроматографа ЛГХ-3000 показана на рис. 1 [9, 10].

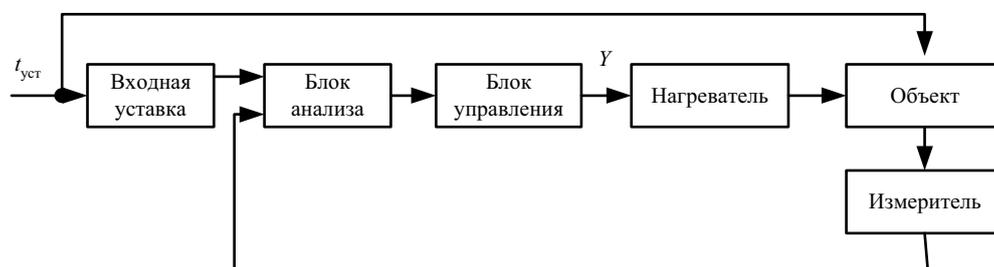


Рис. 1. Структурная схема регулировки температурой термостатов хроматографа ЛГХ-3000

На рисунке $t_{уст}$ – температура уставки, Y – управляющее воздействие. Используется релейный принцип управления [11]. Проблемы, связанные с нелинейностью системы регулировки температуры, в хроматографе ЛГХ 3000 решены путем использования микропроцессора в блоке анализа.

К недостаткам системы ПИД регулирования температуры, используемой в хроматографе ЛГХ-3000, можно отнести сильную нелинейную зависимость программы управления от температуры уставки и от внешних условий окружающей среды [12, 13]. Программирование процесса регулирования в условиях широкого диапазона температур и в условиях разнообразия внешних условий существенно усложняется.

В работе [14] предложено в качестве управляющего воздействия Y в релейной системе регулирования (рис. 1) использовать отношение суммарной дли-

тельности времени нагрева и времени охлаждения к длительности времени нагрева термостата (скважность):

$$\gamma = \frac{\Delta\tau_{нагр} + \Delta\tau_{охл}}{\Delta\tau_{нагр}} = \frac{\Delta\tau_0}{\Delta\tau_{нагр}}, \quad (1)$$

где $\Delta\tau_0 = \Delta\tau_{нагр} + \Delta\tau_{охл}$ – длительность цикла регулирования нагрев – охлаждение; $\Delta\tau_{нагр}$ – длительность интервала нагрева; $\Delta\tau_{охл}$ – длительность интервала охлаждения.

Скважность γ определяет соотношение поступившего в термостат количества тепла от нагревателя к потерянного термостатом количеству тепла в течение времени охлаждения. Следовательно, скважность является параметром, пропорциональ-