УДК 622.691.4.052-52

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА ДЛЯ МОДЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ И НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Г. А. Килин, Б. В. Кавалеров, И. В.Бахирев, А. Ю. Поварницын

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 13.12.2012 г.

Аннотация. В статье рассматривается алгоритм идентификации газоперекачивающего агрегата по данным наблюдения за входными и выходными переменными. Быстрорешаемая модель предназначается для организации процедуры настройки систем управления газоперекачивающего агрегата.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, система управления, математическая модель, идентификация, метод наименьших квадратов, программный комплекс.

Abstract. In article the algorithm of identification of the gas-distributing unit according to supervision over entrance and target variables is shined. The fast-solved model intends for the organization of procedure of control of control systems of the gas-distributing unit.

Keywords: gas-distributing unit, control system, mathematical model, identification, method of the smallest squares, program complex.

В статье рассматриваются результаты работ по договору 13.G25.31.0009 между ОАО «ПРОТОН-Пермские моторы» и Минобрнауки РФ от 07.09.2010 об условиях предоставления и использования субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения. В рамках работ по разработке методологии и программно-технических средств интеллектуализации единого центра многоцелевых испытаний газотурбинных установок предложено формировать по результатам испытаний быстрорешаемые модели газотурбинной установки (ГТУ). Такие модели могут использоваться для задач диагностики, настройки и оптимизации систем управления ГТУ в ходе стендовых испытаний установок различного назначения: для электростанций, для газоперекачки, для авиационного назначения.

Газоперекачивающий агрегат (ГПА) состоит из нагнетателя природного газа, привода нагнетателя (газотурбинная установка), всасывающего и выхлопного устройств, систем автоматики, маслосистемы, топливовоздушных и масляных коммуникаций и вспомогательного оборудования.

Кратко рассмотрим технологию испытаний. Газотурбинная установка для привода ГПА размещается на специальном стенде, где производится ее испытания в различных режимах работы. ГТУ может быть работоспособна только при наличии системы автоматического управления (САУ), которая есть совокупность ГТУ и устройств управления [1]. В настоящее время наиболее распространенным устройством управления является БУД (блок управления двигателем). Как правило, БУД входит в состав испытательного стенда. Именно в нем содержаться алгоритмы САУ, которые управляют работой ГТУ в различных режимах ГПА. Поэтому испытания ГТУ одновременно сопровождаются испытаниями САУ. В ходе натурных испытаний САУ ГТУ параметры и программы алгоритмов управления уже, как правило, выбраны предприятием-разработчиком САУ. Испытателям предоставляется возможность подстройки алгоритмов управления за счет изменения заранее заданных коэффициентов в ограниченных пределах. Такая подстройка выполняется на каждой индивидуальной ГТУ, результаты этой подстройки сопровождают ГПА в течение всего ее жизненного цикла. Отсюда следует вывод, что операции испытаний, включающие настройку и подстройку САУ, имеют важное значение для достижения высоких эксплуатационных показателей ГПА. Одним из мощных средств повышения эффективности испытаний является их автоматизация за счет проведения настройки и подстройки при наличии быстрорешаемых моделей ГТУ, 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 ГТУ ДЛЯ ГПА

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

$$\begin{aligned}
&\dot{A}_{DI} = (A_{DIZ} - \mathrm{A}_{DI}) / T_{DI} \\
&G_{TS} = f(A_{DI}) \\
&\dot{G}_T = (G_{TS} - G_T) / T_{GT} \\
&n_{TS} = f(G_T) \qquad (1) \\
&\dot{n}_{TK} = (n_{TS} - n_{TK}) / T_{NTK} \\
&N_E = f(n_{TK}) \\
&n_{\mathrm{CT}Z} = f(N_G) \\
&\dot{n}_{\mathrm{CT}Z} = (n_{\mathrm{CT}Z} - n_{\mathrm{CT}}) / T_{N\mathrm{CT}} \cdot n_{\mathrm{CT}}
\end{aligned}$$

В уравнениях (1) приняты обозначения: A_{DI} – угол поворота дозатора газа; A_{DIZ} – заданный угол поворота дозатора газа; G_{TS} – расход топлива по статической характеристике; G_T – расход топлива; n_{TK} – частота вращения ротора турбокомпрессора; $n_{\mathrm{CT}Z}$ – частота вращения ротора свободной турбины по статической характеристике; n_{CT} – частота вращения ротора свободной турбины; n_{TS} – частота вращения ротора турбокомпрессора установившаяся; N_G – мощность нагрузки; $T_{N\mathrm{CT}}$ – суммарная постоянная времени свободной турбины; T_{NTK} – постоянная времени ротора турбокомпрессора; T_{GT} – постоянная времени расхода топлива; T_{DI} – постоянная времени дозатора газа.

Модель (1) является нелинейной моделью, поскольку помимо линейных дифференциальных уравнений она содержит нелинейные статические характеристики. Коэффициенты дифференциальных уравнений такой модели являются функциями режима работы, поэтому при выполнении идентификации следует проводить оценивание коэффициентов модели (1) в нескольких рабочих точках при различной нагрузке с тем, чтобы получить зависимости, отражающие нелинейные статические характеристики модели.

Алгоритм оценки коэффициентов быстрорешаемой модели

Для оценки коэффициентов полученной быстрорешаемой модели разработан алгоритм идентификации.

Основываясь на обобщениях и классификации, изложенных в [2, 3], рассматривались следующие методы оценивания параметров: байесовские оценки; оценивание методом максимального правдоподобия; марковские оценки; взаимно-корреляционный метод; метод стохастической аппроксимации; метод наименьших квадратов.

Применение первых трех методов требует большого объема априорной статистической информации. Для случая идентификации методом максимального подобия необходима информация о совместном распределении вероятностей выборочных значений выходов и параметров, кроме того, все случайные функции должны быть гауссовскими. Для марковских оценок необходимо определение ковариационной матрицы аддитивного шума. Взаимно-корреляционный метод требует введения в систему вспомогательного случайного шума и заполнение информацией $2n$ значений для одной итерации вычислений. Метод стохастической аппроксимации требует априорного знания дисперсий, кроме того, чтобы избежать смещения оценок на каждой итерации требуется $(2n+1)$ измерений выходного сигнала. Оценивание методом наименьших квадратов возможно при отсутствии априорной информации о шумовых свойствах сигнала, и алгоритм в этом смысле является противоположным случаем по сравнению с байесовским, при котором необходимо иметь полное вероятностное описание случайных процессов. Алгоритм максимального правдоподобия можно рассматривать как промежуточный.

Метод наименьших квадратов имеет ряд недостатков, среди которых нужно отметить смещенность оценки, если среднее значение случайных возмущений ненулевое, а также необходимость располагать полной информацией по входу и выходу на всем интервале наблюдений. Однако наглядность и простота вычислений делают этот метод наиболее привлекательным и широко применяемым. Поэтому в качестве критерия идентификации избирается минимум среднеквадратической ошибки

$$E = \mathbf{e}^{\mathrm{T}} \mathbf{I}\, \mathbf{e} = \sum_{i=1}^{k} e^2(i), \tag{2}$$

где $\mathbf{e} = \mathbf{Y}_{\mathrm{C}} - \mathbf{Y}$ есть вектор ошибок, $\mathbf{Y}_{\mathrm{C}}$ – вектор выходов реального объекта, $\mathbf{Y}$ – выходной вектор быстрорешаемой модели, $\mathbf{I}$ – единичная матрица.

В результате выбран метод наименьших квадратов, как требующий наименьшей априорной информации и имеющий наибольшее распространение на практике [2]. При этом модели обычно представляют в следующем виде:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{AX}, \tag{3}$$

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

Из уравнения (3) следует, что

$$\mathbf{A} = \mathbf{Y}_{\Sigma}\, \mathbf{X}_{\Sigma}^{-1}, \tag{4}$$

где $\mathbf{Y}_{\Sigma}$ и $\mathbf{X}_{\Sigma}$ – матрицы, составленные из n векторов $\mathbf{Y}$ и $\mathbf{X}$ соответственно.

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

$$\mathbf{A} = \mathbf{Y}_{\Sigma}\, \mathbf{X}_{\Sigma}^{\mathrm{T}} (\mathbf{X}_{\Sigma}\, \mathbf{X}_{\Sigma}^{\mathrm{T}})^{-1} \tag{5}$$

или $\mathbf{A} = \mathbf{Y}_{\Sigma}\, \mathbf{X}_{\Sigma}^{+}$, где матрица $\mathbf{X}_{\Sigma}^{+}$ – псевдообратная матрица, такая, что $\mathbf{X}_{\Sigma}\, \mathbf{X}_{\Sigma}^{+}\, \mathbf{X}_{\Sigma} = \mathbf{X}_{\Sigma}$. Известно, что она является наилучшей аппроксимацией (по методу наименьших квадратов) соответствующей системы линейных уравнений [2, 4, 5]. Для повышения устойчивости решения следует применять специально разработанные для этого методы, например, метод регуляризации академика А. Н. Тихонова [3].

При решении задачи идентификации вносятся дополнительные ошибки в определяемую матрицу коэффициентов $\mathbf{A}$ из-за погрешностей в вычислении производных. Проблема численного дифференцирования хорошо известна. Суть ее заключается в том, что производная вычисляется обычно как разность двух близких по величине значений функции, поэтому относительная погрешность производной всегда оказывается больше, чем относительная погрешность численного представления дифференцируемой функции [3].

Поэтому предварительно преобразуем систему (3) к разностному (дискретному) виду:

$$\mathbf{V}(k+1) = \mathbf{FV}(k), \tag{6}$$

где $\mathbf{V}(k)$ – расширенный вектор состояния системы в k-й момент времени, $\mathbf{V}(k+1)$ – расширенный вектор состояния системы в $k+1$-й момент времени, $\mathbf{F}$ – матрица перехода из состояния в момент k в новое состояние в момент $k+1$, $\mathbf{F} = \exp(\mathbf{A}\,\Delta t)$, Δt – промежуток времени между моментами времени k и $k+1$. Уравнение (5) описывает динамику системы на промежутке времени $[k, k+1]$. Вектор $\mathbf{V}$ включает в себя как входные, так и выходные переменные идентифицируемой системы. Алгоритм идентификации представлен на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

В результате идентификации получают коэффициенты модели (1) для каждой из выбранных рабочих точек, например, для пер-

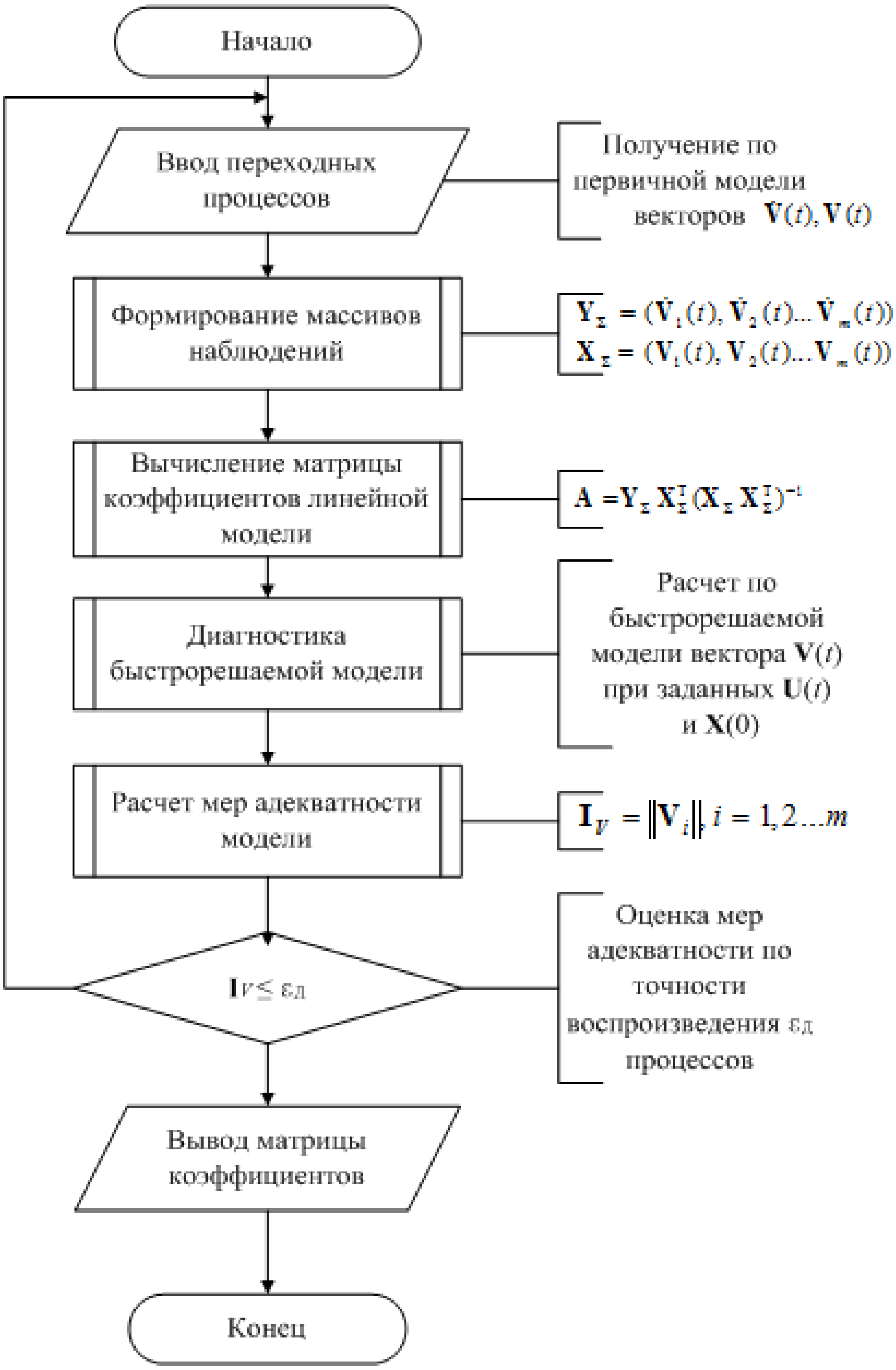

Рис. 1. Алгоритм идентификации

вой рабочей точки: $T_{NTK} = 0,301$; $T_{GT} = 0,503$; $T_{NCT} = 0,010$; $T_{DI} = 0,399$. Предварительно перед этим строятся статические характеристики модели (1), на рис. 2 и 3 представлены две из них: $n_{CTZ} = f(N_G)$, $N_E = f(n_{TK})$.

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Для оценки адекватности модели на ее вход подавалась экспериментальная кривая угла дозатора топлива. В алгоритме (рис. 1) в качестве меры адекватности, обозначаемой знаком нормы $\|x_i\|$, может использоваться средняя квадратичная ошибка

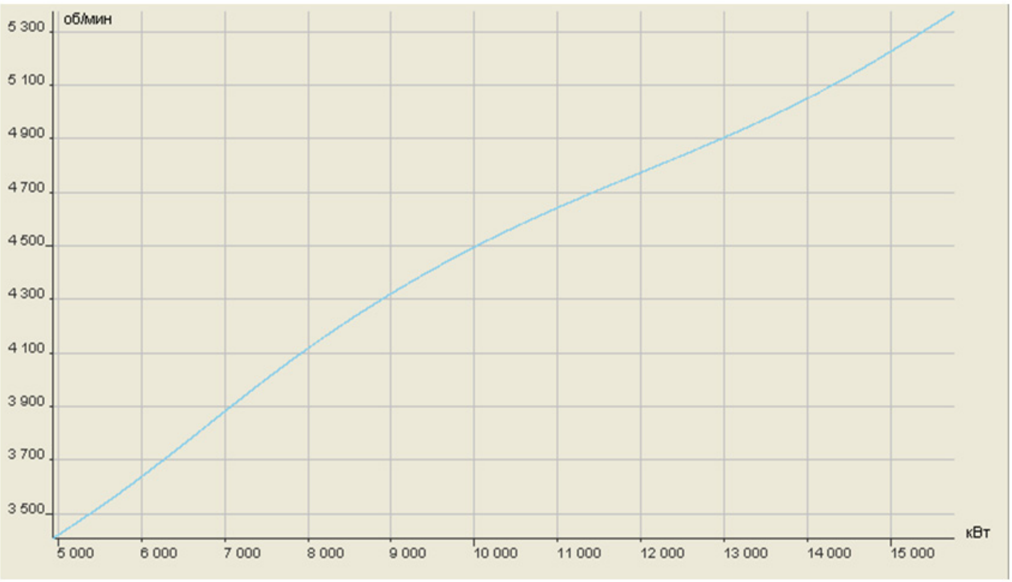

Рис. 2. Зависимость скорости вращения свободной турбины от мощности, интерполированная кубическим сплайном

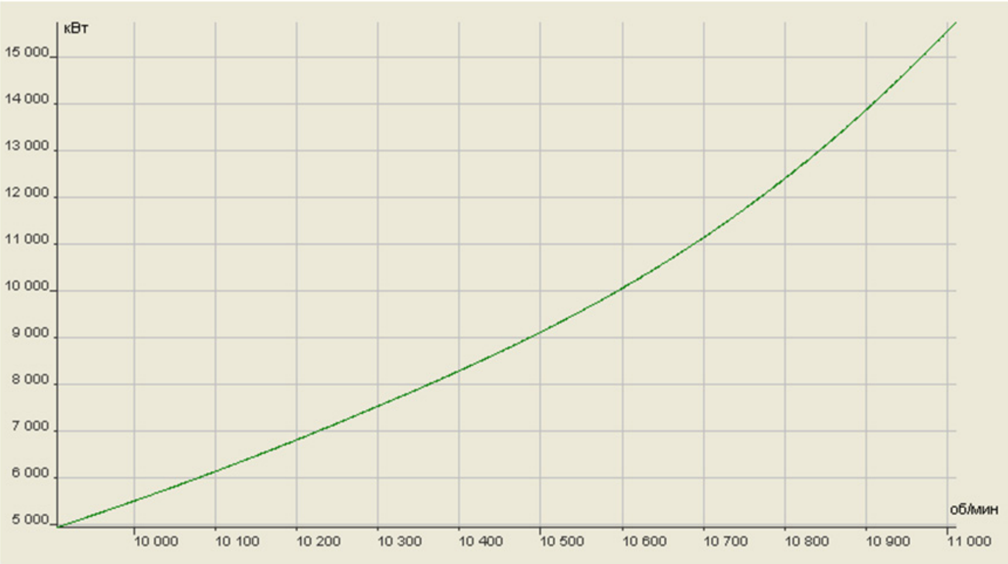

Рис. 3. Зависимость вырабатываемой мощности от скорости вращения турбокомпрессора, интерполированная кубическим сплайном

$$\varepsilon = \left\| x_i \right\| = \frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{x_i^{(Э)} - x_i^{(M)}}{x_i^{(M)}}\right]^2\right]^{0.5}, \qquad (7)$$

где $x_i^{(Э)}$ – переменная, полученная на i-м шаге в результате эксперимента, $x_i^{(M)}$ – переменная, рассчитанная по модели, n – число точек наблюдения. Могут использоваться и другие меры адекватности, например, критерий (коэффициент несовпадения) Тейла [6], который является обобщенной мерой дисперсии:

$$S = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}\left[x_i^{(Э)} - x_i^{(M)}\right]^2\right]^{0,5}}{\left[\sum_{i=1}^{n}\left[x_i^{(Э)}\right]^2\right]^{0,5} + \left[\sum_{i=1}^{n}\left[x_i^{(M)}\right]^2\right]^{0,5}}, \qquad (8)$$

где обозначения те же, что и в случае (7). Следует отметить, что обе рассмотренные меры адекватности являются внутренними (интерполяционными), то есть они используют ту же информацию, по которой строилась модель. При необходимости могут быть построены и внешние критерии, использующие обучающую и контролирующую выборки [7]. Могут быть построены меры адекватности и при использовании понятий класса функций и близости, известных из вариационного исчисления.

В Таблице представлена адекватность модели по критерию Тейла. Максимально допустимое значение критерия Тейла, исходя из поставленной задачи, установлено $S_{\max} = 0,01$.

Адекватность оценки

На рис. 4 и 5 представлены графики модельной и экспериментальной кривой переходного процесса на одном из участков переходного процесса (при изменении мощности ГПА от 5,62 до 7,67 МВт).

Таблица

Номер участка переходного процесса	G_T	n_{TK}	n_{CT}
1	0,00926	0,00104	0,00162
2	0,00397	0,00062	0,00104
3	0,00465	0,00061	0,00218

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная с помощью предложенного алгоритма модель обеспечивает достаточную адекватность. Разработанный алгоритм используется в программном моделирующем

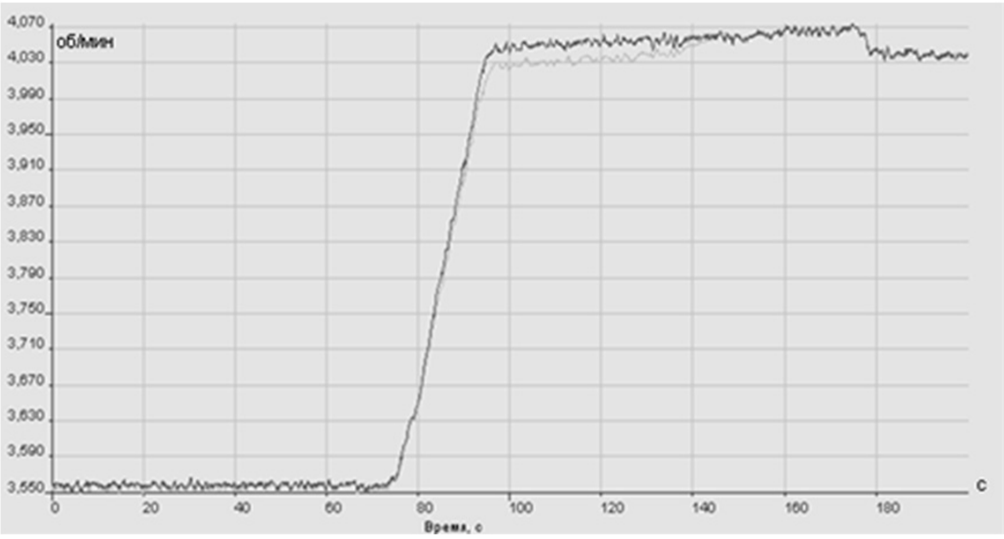

Рис. 4. Переходный процесс скорости вращения свободной турбины (темная – экспериментальная, светлая – модельная)

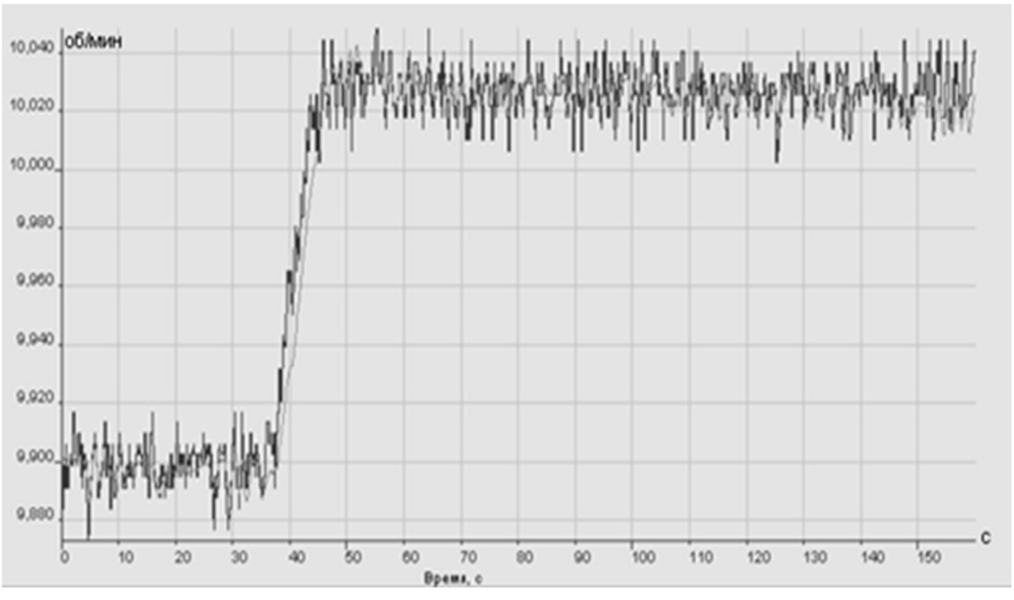

Рис. 5. Переходный процесс скорости вращения турбокомпрессора (темная – экспериментальная, светлая – модельная)

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гольберг Ф. Д., Батенин А. В.* Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления. – М. : Изд-во МАИ, 1999. – 82 с.

2. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. М. : Мир, 1975. – 685с.

3. 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.

4. *Кавалеров Б. В.* Идентификационная модель электрической нагрузки для испытания систем управления газотурбинных мини-электростанций // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011, Т. 7, № 1, С. 85–91.

5. *Гантмахер Ф. Р.* Теория матриц. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 560 с.

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

7. Испытания авиационных двигателей / В. А. Григорьев, А. С. Гишваров. – М. : Машиностроение, 2009. – 504 с.

Кавалеров Борис Владимирович – доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации ПНИПУ, к.т.н., доцент. Пермь.
Тел.: 2198661. E-mail: kbv@pstu.ru

Килин Григорий Александрович – магистрант кафедры МСА, ПНИПУ, Пермь.
Тел.: 89617562582. E-mail: thisisforasm@rambler.ru

Бахирев Иван Владимирович – магистрант кафедры МСА, ПНИПУ, Пермь.
Тел.: 89048481934. E-mail: bahirevy@mail.ru

Поварницын Александр Юрьевич – магистрант кафедры МСА, ПНИПУ, Пермь. Тел.: 89125827986. E-mail. – cahek-pow@yandex.ru

Kavalerov B. V. – Candidate of Technical Sciences, the associate professor of microprocessor automation equipment ПНИПУ, Perm.
Tel.: 2391822. E-mail: kbv@pstu.ru

Kilin G. A. – the undergraduate of MSA chair, ПНИПУ, Perm. Tel.: 89617562582.
E-mail: thisisforasm@rambler.ru

Bahirev I. V. – undergraduate of MSA chair, ПНИПУ, Perm. Tel.: 89048481934.
E-mail: bahirevy@mail.ru

Povarnicyn A. J. – undergraduate of MSA chair, ПНИПУ, Perm. Tel.: 89125827986.
E-mail: cahek-pow@yandex.ru