

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Зиятдинов И.Р.¹, Кавалеров Б.В.¹

¹ГОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия (614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29), e-mail: i.ziyatdinoff@mail.ru

Проведен анализ различных способов управления газотурбинными установками для электроэнергетики. Эти способы основаны на использовании табличной настройки регулятора и симплексного метода оптимизации. Показаны преимущества и недостатки различных способов управления с нелинейными алгоритмами. Выполнен сравнительный анализ алгоритмов управления по значению показателей качества в переходном процессе. Составлены сравнительные таблицы. Экспериментальные исследования выполнялись на математических моделях газотурбинной установки. При этом использовались линейные и нелинейные модели. Основной целью проведенных исследований является анализ традиционных алгоритмов управления газотурбинными установками для того, чтобы в дальнейшем перейти от этих систем управления к адаптивным системам управления.

Ключевые слова: газотурбинная установка, система автоматического управления, модель, моделирование

RESEARCH OF GAS TURBINE UNITS NONLINEAR CONTROL ALGORITHMS

Ziyatdinov I.R.¹, Kavalеров B.V.¹

¹GOU VPO «Perm National Research Polytechnic University», Perm, Russia (614990, Perm, Komsomol prospect, 29), e-mail: i.ziyatdinoff@mail.ru

The analysis of manual and automatic method of controlling gas-turbine units for power. These methods are based on the setting of the table and the simplex method of regulation. The advantages and disadvantages of different control systems with nonlinear algorithms. A comparative analysis of control algorithms for the value of quality indicators in the transition process. Compiled comparative tables. Experimental studies were carried out on mathematical models of gas turbine plant. We obtain a simplified model of a gas turbine installation. We used the linear and nonlinear models. The main aim of the research is the analysis of conventional gas turbine control algorithms in order to continue to move from these control systems to the adaptive control system.

Keywords: gas turbine unit, automatic control system, model, modeling

Авиационные газотурбинные установки (ГТУ) находят применение в качестве привода для электрогенераторов на электростанциях. Поскольку в этом случае ГТУ оказываются поставленными в достаточно сложные условия работы, связанные с резкими изменениями электрической нагрузки, необходимо обеспечить устойчивую работу электростанции как в автономном режиме работы, так и при работе на мощную внешнюю сеть, также возрастают требования к системам управления ГТУ [6]. Эти требования осложняются существенной нелинейностью такого объекта управления, каким является ГТУ [3]. Рассмотрим учет влияния нелинейности модели ГТУ на характеристики систем автоматического управления (САУ) ГТУ.

Нелинейная модель ГТУ для исследования адаптивных регуляторов

Как показали предварительные экспериментальные исследования [4, 9], наиболее влияющей нелинейностью ГТУ является изменение постоянной времени турбокомпрессора T_{TK} в зависимости от мощности нагрузки ГТУ N_g .

В рассматриваемой модели эта постоянная времени меняется следующим образом:

а) При $N_g=2500$ кВт $T_{TK}=0,5$ с – номинальный режим;

б) При $N_g=150$ кВт $T_{TK}=3$ с – холостой ход.

При этом уравнения нелинейной модели ГТУ приобретают следующий вид в виде передаточной функции:

$$W(p)_{ГТУ} = W_{ДГ} * \frac{K_1 * K_2}{(T_{TK}(N_g)p + 1) * T_{СТ}p}; \quad (1)$$

в пространстве состояний систему уравнений представим в виде:

$$\dot{x} = A(x)x + B(x)u; \quad (2)$$

где x – вектор состояния системы, u – вектор управления, $A(x)$ – нелинейная матрица коэффициентов.

Введем нелинейную зависимость $T_{TK} = f(N_g)$ в нашу модель в качестве нелинейного блока (НБ₁) (рис. 1). ДГ – это дозатор газа, устройство для автоматического отмеривания (дозирования) заданной массы или объема газов. ДГ представлен апериодическим звеном. Сам дозатор газа является идеальным интегрирующим звеном, но охвачен для повышения стабильности работы отрицательной обратной связью. В модели у нас две постоянные времени, это постоянные времени турбокомпрессора (T_{TK}) и свободной турбины ($T_{СТ}$). Gt – расход газа, A – угол поворота дозатора газа, n_{TKC} – частота вращения турбокомпрессора в статическом режиме, K_1, K_2, K_3 – коэффициенты усиления ГТУ. На рисунке 2 показан нелинейный блок НБ₁.

На рисунке 3 нелинейная модель, показанная на рисунке 1, включена в схему с ПИД-регулятором [4]. Ранее в [4] мы рассматривали линейную модель с ПИД-регулятором. Теперь, поскольку объект стал нелинейным, необходимо внести нелинейности в алгоритм ПИД-регулятора для реализации так называемой табличной настройки [7]. Нелинейный блок НБ₁ реализует пропорциональную ветвь, НБ₂ – дифференциальную ветвь, интегральная ветвь оставлена неизменной, так как это звено не зависит от значения постоянного времени регулятора (T_{p2}), K_P – общий коэффициент усиления регулятора.

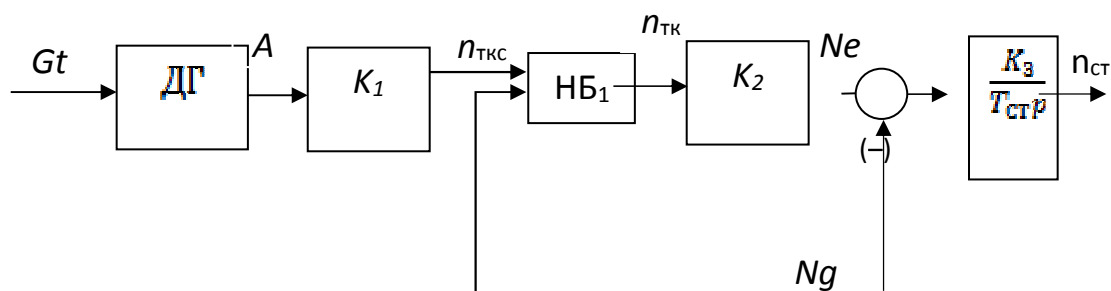


Рис. 1. Нелинейная модель ГТУ

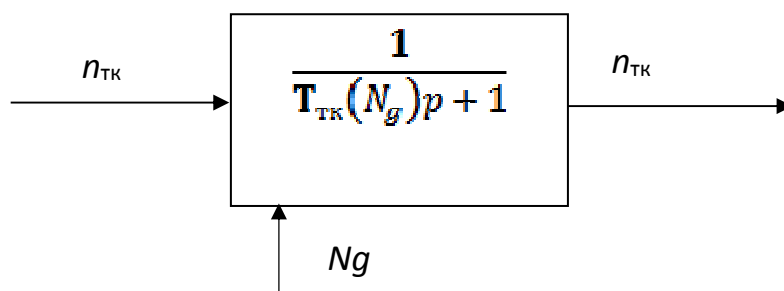


Рис. 2. Нелинейная блок ГТУ(НБ1)

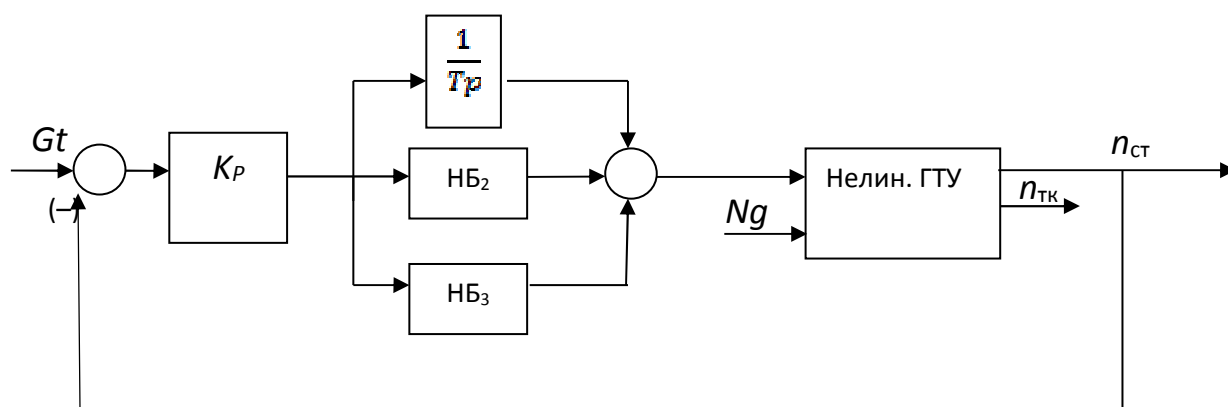


Рис. 3. Нелинейная модель ГТУ с ПИД-регулятором

В целом для исследований используется комплекс из трех моделей САУ ГТУ: а) с идеальной линейной моделью ГТУ [3], б) с нелинейной моделью ГТУ с параметрами регуляторов САУ, настроенными как для линейной модели, в) с нелинейной моделью и с табличной настройкой.

Все три графика изменения частоты вращения свободной турбины n_{CT} ГТУ показаны на рисунке 3 в одинаковом масштабе. Назначение указанных выше моделей следующее: а) эталонная модель, переходный процесс, которой стремимся получить; б) модель, в которой параметры ПИД-регулятора остались прежними как в линейном случае [4], несмотря на то, что была введена нелинейная зависимость $T_{TK} = f(N_g)$; в) принцип табличного управления состоит в том, что, зная заранее возможные изменения параметров системы (например, из-за возможных изменений нагрузки), выполняют для нескольких разных режимов расчет параметров регулятора. Значения этих параметров записывают в таблицу [7]. В процессе функционирования системы измеряют величину, которая характеризует режим работы системы (в нашем случае это нагрузка N_g), и в зависимости от ее значений выбирают из таблицы величины коэффициентов ПИД-регулятора [7].

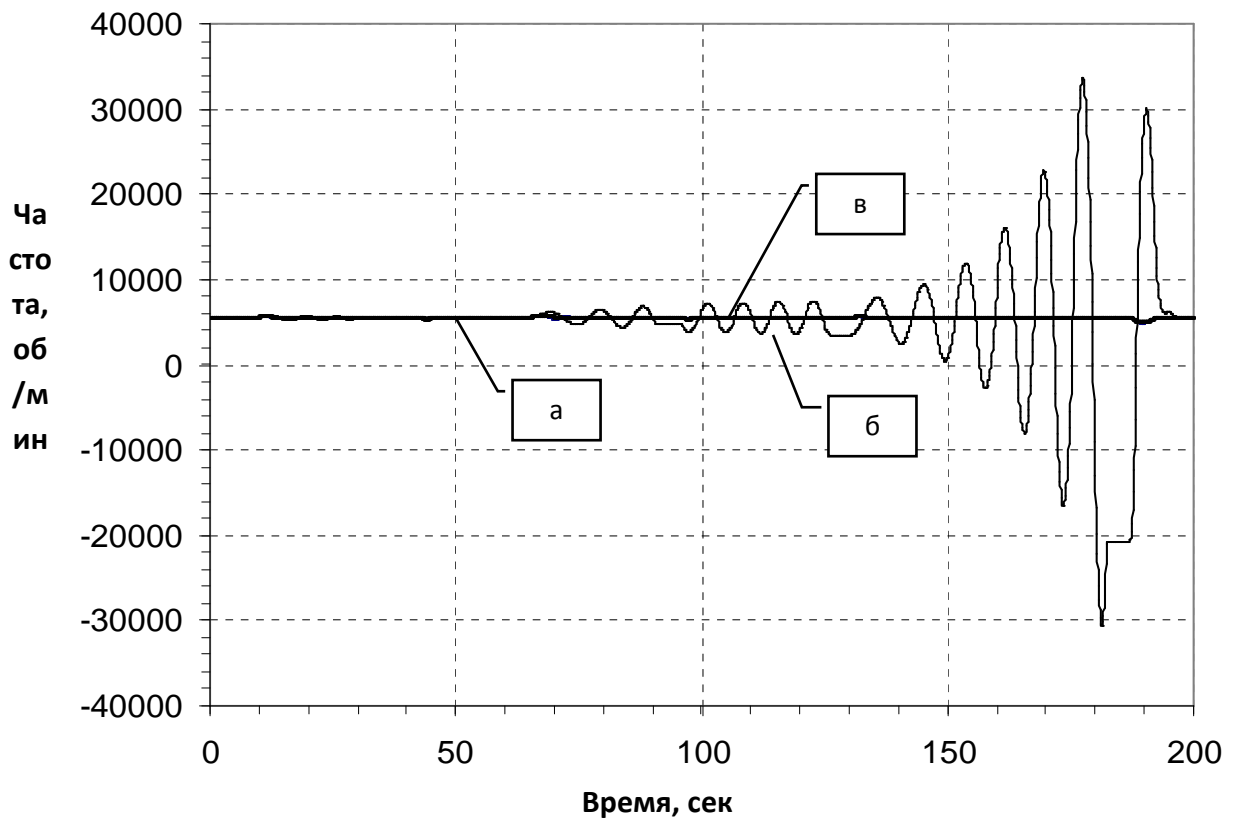


Рис. 4. Временные характеристики (частота вращения свободной турбины пст ГТУ) комплекса систем с тремя моделями

Как мы видим по графику на рисунке 4, нелинейная модель (б) с параметрами САУ для линейной модели является неустойчивой, появляются нарастающие незатухающие колебания. Исключим ее из сравнительного анализа для подробного ознакомления с временными характеристиками систем с идеальной линейной моделью и с нелинейной моделью с табличной настройкой (рис. 5).

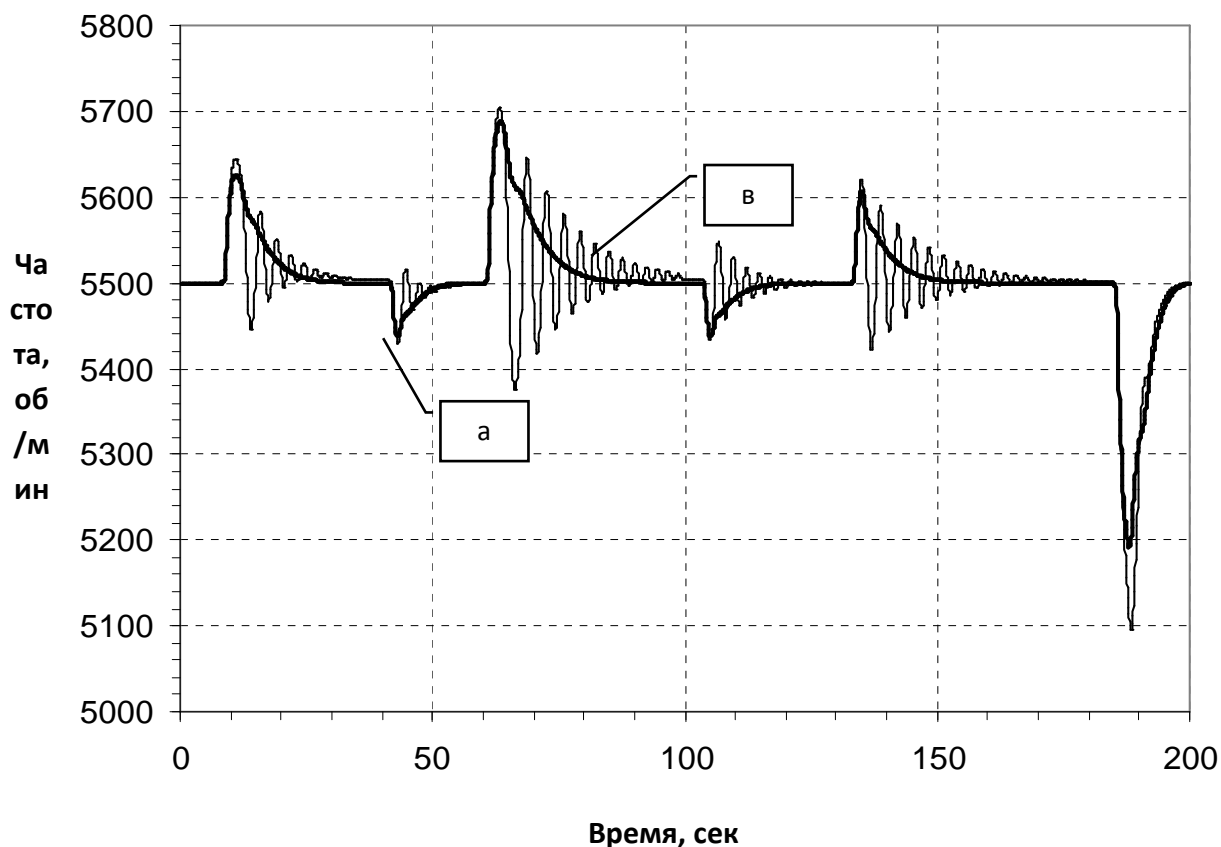


Рис. 5. Временная характеристика (частота вращения свободной турбины пст ГТУ) с идеальной линейной моделью(а) и моделью с табличной настройкой при $T_{p2}=2(в)$

Поставим задачу улучшить показатели качества регулирования с помощью системы с табличной настройкой за счет изменения постоянных времени. Для получения настроенной таблицы производится изменение одного из параметров регулятора, а именно T_{p2} , в передаточной функции ПИД-регулятора [1]:

$$W_p(p) = K_p * \frac{(T_{p2}p+1)*(T_{p2}p+1)}{T_{p1}p} \quad (3)$$

При изменении значения T_{p2} изменяются значения коэффициентов усиления пропорционального (K_p) и дифференцирующего звена (K_d), интегрирующее звено не меняется (K_i), поэтому на рисунке 3 нелинейные блоки введены в пропорциональную и дифференциальную ветви ПИД-регулятора, а интегральная ветвь оставлена неизменной. На рисунках 6–8 показаны графики переходных процессов при изменении нагрузки ГТУ при последовательном увеличении значения T_{p2} САУ для частоты вращения свободной турбины пст ГТУ.

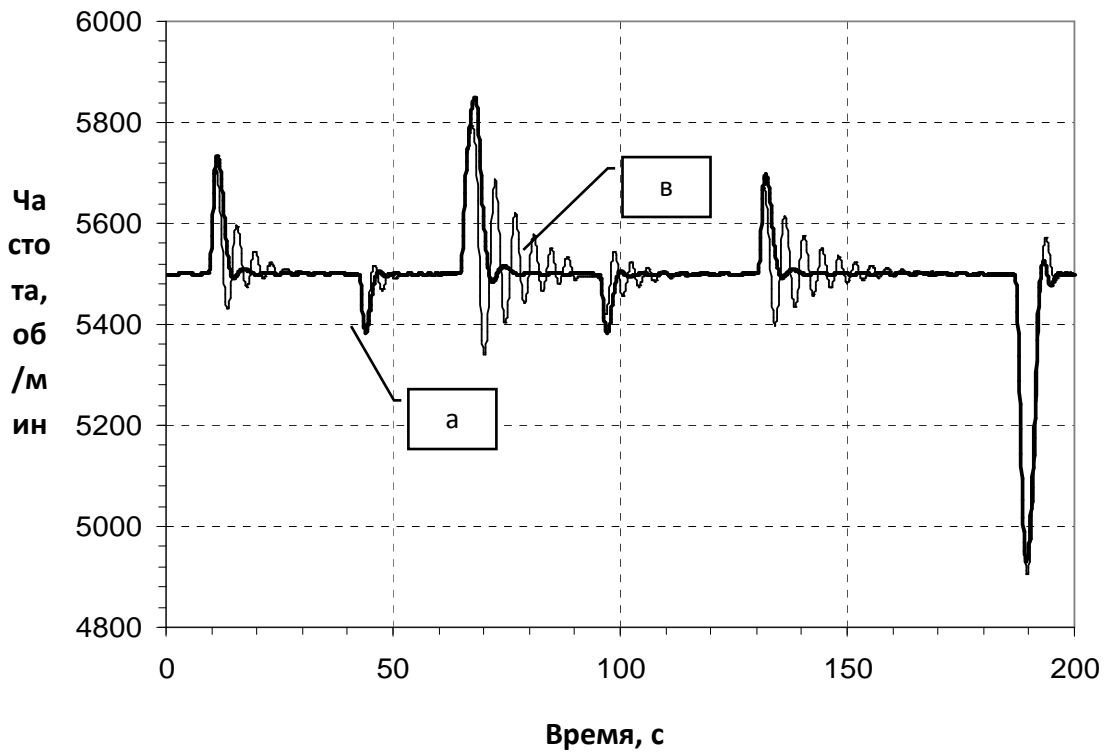


Рис. 6. Временная характеристика с идеальной линейной моделью(а) и моделью с табличной настройкой при $T_{p2}=4$ (в)

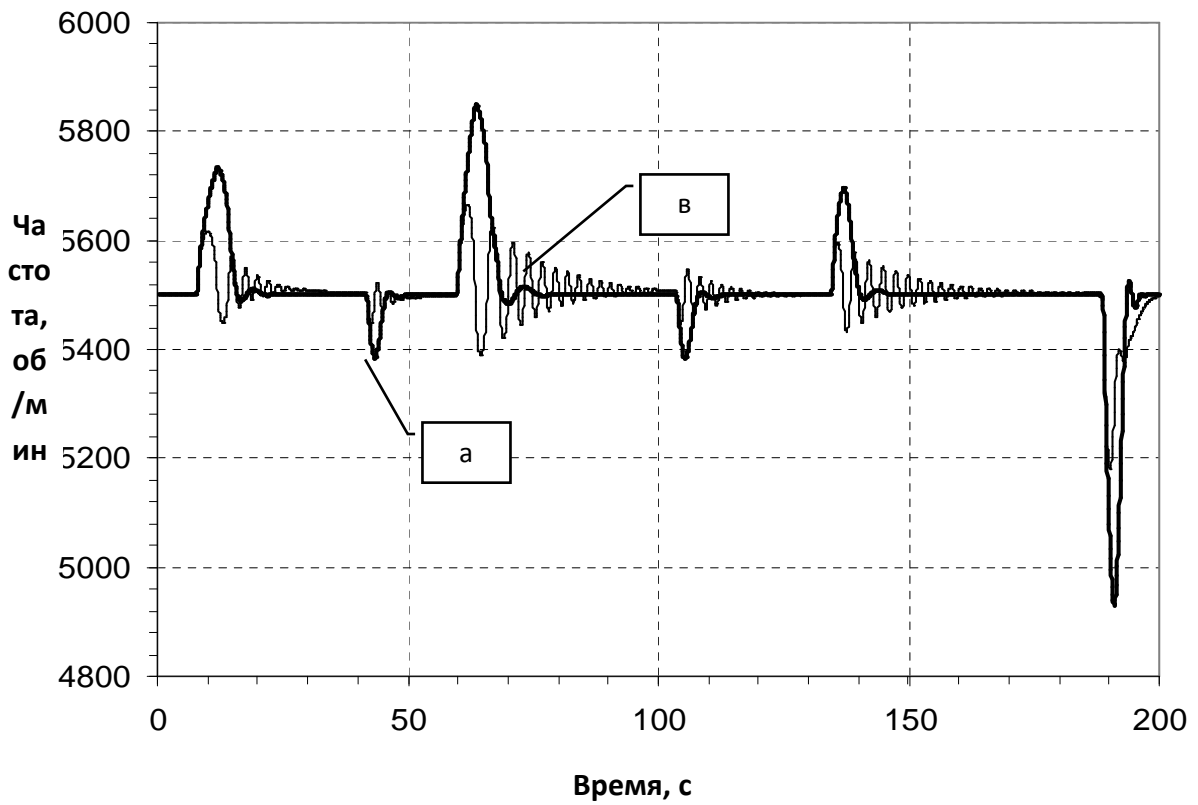


Рис. 7. Временная характеристика с идеальной линейной моделью(а) и моделью с табличной настройкой при $T_{p2}=6$ (в)

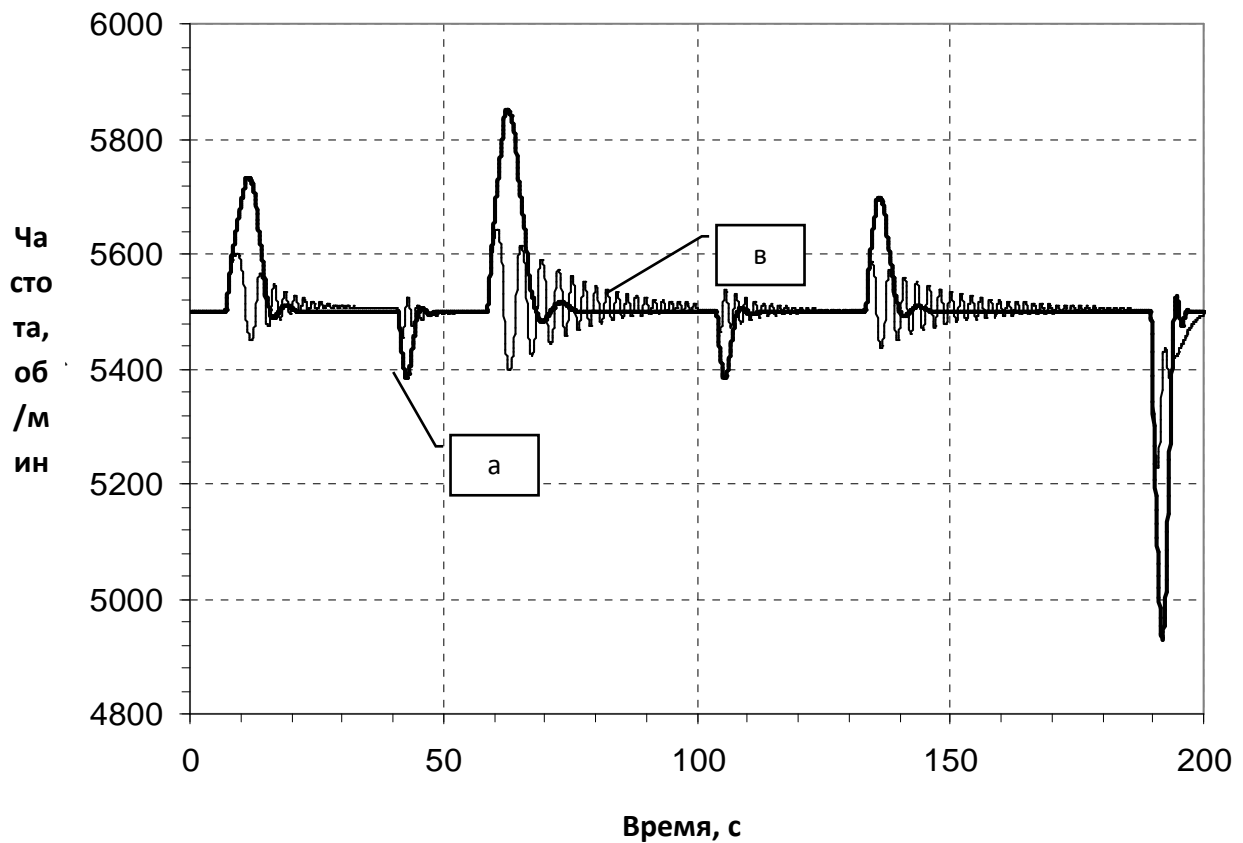


Рис. 8. Временная характеристика с идеальной линейной моделью(а) и моделью с табличной настройкой при $T_{p2}=8$ (б)

Из рассмотрения графиков 5–8 выявлено, что с ростом T_{p2} максимальное отклонение уменьшается, но возрастает колебательность. Окончательный выбор T_{p2} должен быть сделан исходя из компромисса между этими показателями качества и требованиями к системе.

Результаты настройки для различной нагрузки (N_g) сведены в таблицу 1, здесь обозначено: K_P , K_D – соответственно полученные настройки коэффициентов усиления пропорциональной и дифференциальной частей ПИД-регулятора.

Таблица 1

Настройки табличного регулятора для рисунков 5–8

T_{p2}	N_g , кВт	150	500	1000	1500	2000	2500	2600
2	K_P	43,00	40,01	30,40	22,91	15,45	8,00	6,52
	K_D	12,00	11,14	8,40	6,26	4,13	2,00	1,58
4	K_P	85,00	79,01	59,80	44,82	29,90	15,00	12,03

	K_D	24,00	22,29	16,80	12,52	8,26	4,00	3,15
6	K_P	127,00	118,02	89,20	66,73	44,35	22,00	17,55
	K_D	36,00	33,43	25,20	18,78	12,38	6,00	4,73
8	K_P	169,01	157,02	118,60	88,64	58,79	29,00	23,07
	K_D	48	44,58	33,60	25,04	16,51	8,00	6,30

Табличная настройка регулятора означает, что в ПИД-регулятор записана таблица 1, тем самым производится непрерывное изменение коэффициентов усиления САУ при изменении нагрузки ГТУ.

В результате осуществляется приспособление регулятора к изменяющейся нагрузке. Однако такое приспособление в строгом смысле нельзя назвать адаптацией. Несмотря на то что отдельные авторы считают такой регулятор адаптивным, на самом деле речь надо вести, как указывается, например, в [7], не о адаптивном регуляторе, а о регуляторе нелинейном. Следовательно, здесь в соответствии с системным принципом соответствия нелинейный регулятор соответствует нелинейному объекту. Собственно адаптации, т.е. приспособления САУ к изменяющимся условиям внешней среды, здесь не происходит. Таблица настроек получается один раз и впоследствии не меняется.

Нелинейные системы с автоматической настройкой регулятора

Полученная ранее таблица 1 рассчитывалась вручную. Для сокращения времени и повышения качества настройки применим алгоритм оптимизации, основанный на использовании симплексного метода [3]. На рисунке 9 представлена схема автоматической настройки. Задача этой схемы — получить настроечную таблицу. Поэтому вновь подчеркнем, что в строгом смысле рассматриваемая система также не является адаптивной. В этой схеме таблица получается один раз перед началом функционирования САУ.

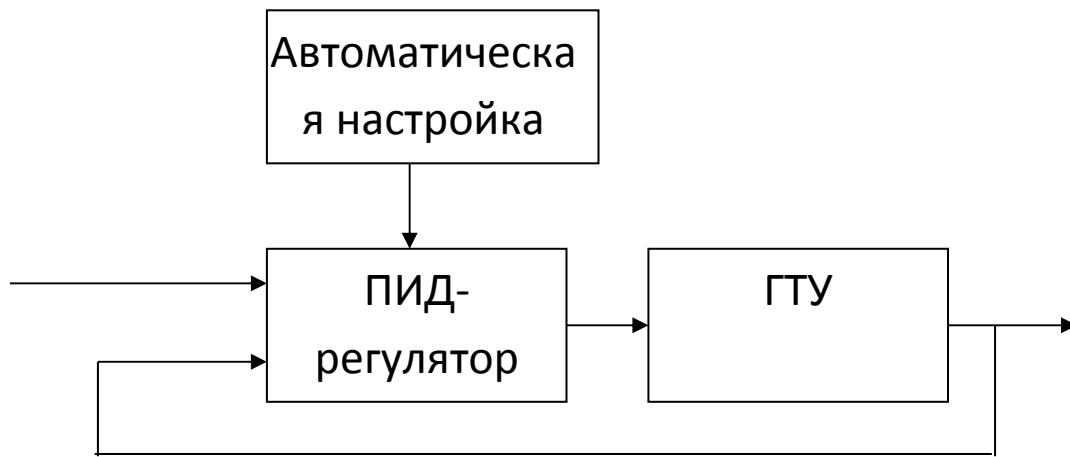


Рис. 9. Нелинейная система с автоматической настройкой регулятора

Для схемы на рисунке 9 осуществим сброс и наброс нагрузки в определенные промежутки времени, изменяя потребляемую мощность нагрузки. В результате постоянная времени ротора турбокомпрессора также будет изменяться (рис. 10).

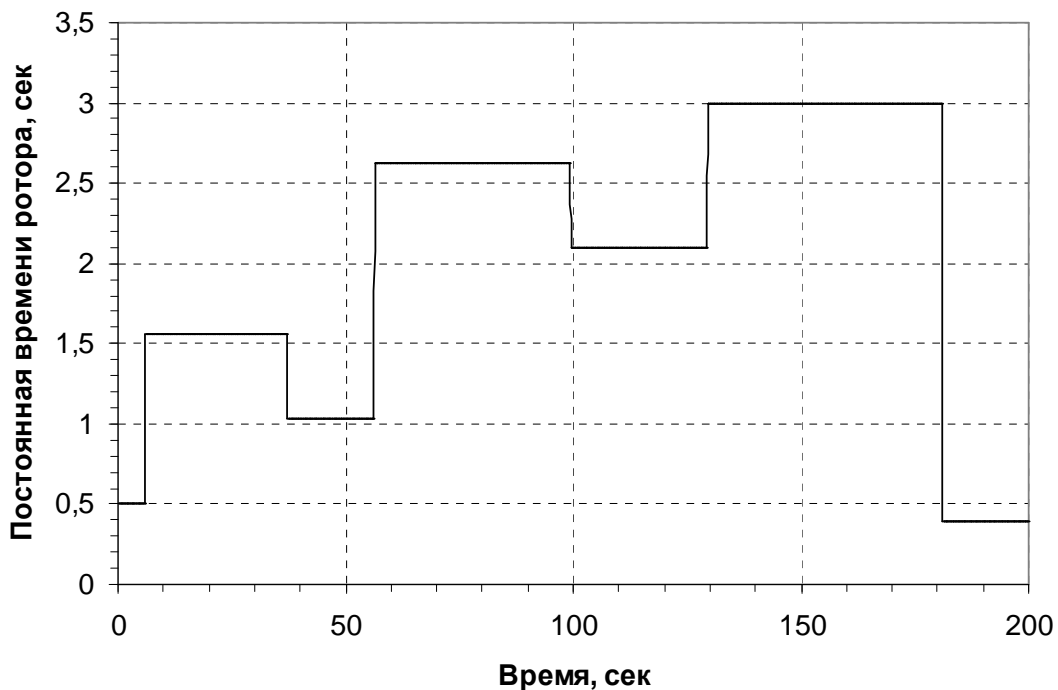


Рис. 10. Изменение постоянной времени ротора турбокомпрессора T_{TK}

Далее произведем настройку регулятора симплексным методом по схеме на рисунке 9 для каждого участка нагрузки, получим общую таблицу настройки САУ. Сравним результаты настройки с ранее полученной настройкой при $T_{P2}=6$ (рис. 10).

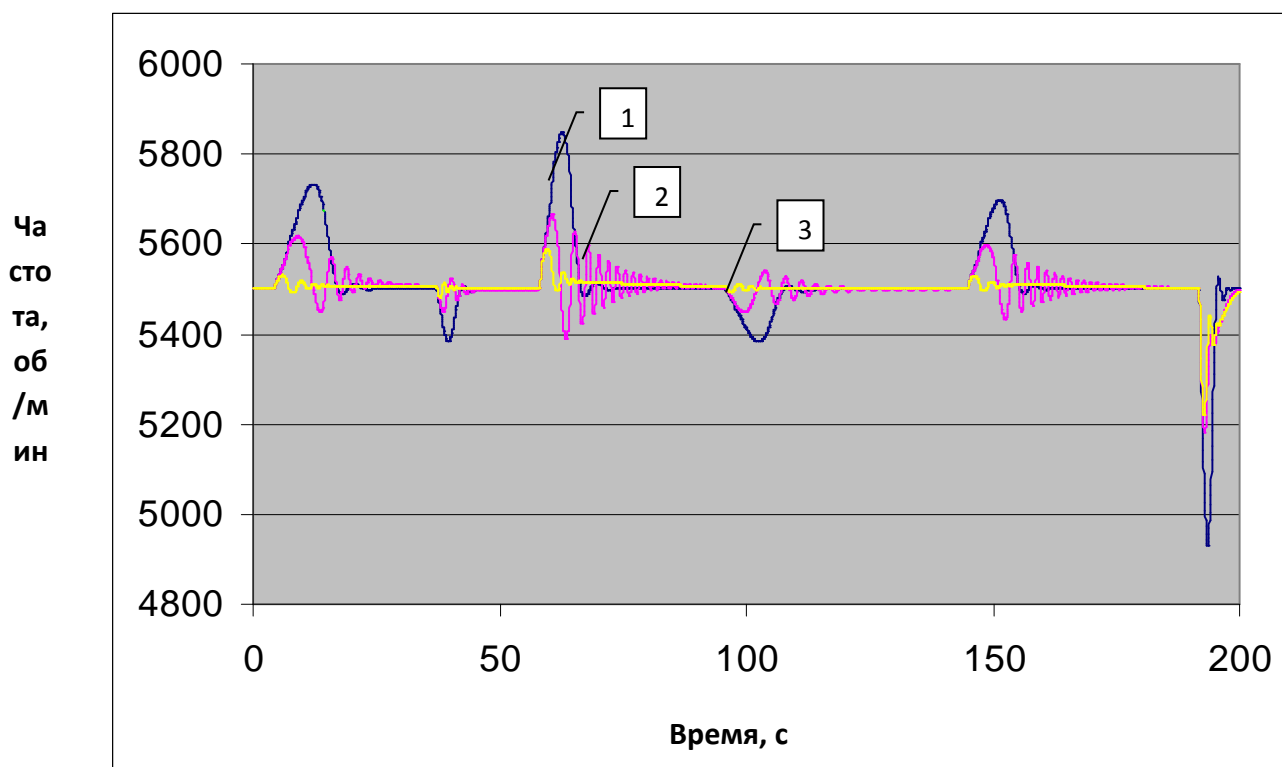


Рис. 10. Переходные процессы: 1 — Линейная система с настройками регулятора для нелинейной, 2 — Нелинейная система с настройками регулятора при $T_{p2}=6$, 3 — Нелинейная система с автоматической настройкой

Как видим из рисунка 10, при сравнении трех САУ качество переходного процесса нелинейной системы с автоматической настройкой регулятора значительно лучше, что доказывает эффективность рассматриваемой схемы по сравнению с линейной системой с настройками регулятора для нелинейной системы и нелинейной системой с настройками регулятора при $T_{p2}=6$.

Полученные параметры сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Параметры П и Д табличной настройки

	об/мин	150	500	1000	1500	2000	2500	2600
авто-настройка	K_P	126,00	144,3	323,51	220,66	133,39	1,54	15,38
	K_D	470,00	438,17	519,69	294,13	73,87	1,10	2,54
при $T_{p2}=6$	K_P	127,00	118,01	89,20	66,73	44,35	22,00	17,55
	K_D	36,00	33,43	25,20	18,78	12,38	6,00	4,73

Из таблицы 2 видно существенное различие коэффициента усиления дифференцирующего звена ПИД-регулятора K_d , что подтверждает, насколько сильно различаются переходные процессы нелинейной системы с настройками регулятора при $T_{p2}=6$ и нелинейной системы с автоматической настройкой.

Вывод

Проведенные исследования нелинейных алгоритмов управления показали, что при учете нелинейности переходный процесс системы существенно изменяется, поэтому для качественного улучшения процесса целесообразно использовать табличную настройку и автоматическую настройку параметров системы. При сравнении трех моделей переходный процесс нелинейной системы с автоматической настройкой регулятора намного лучше, что доказывает эффективность этой модели по сравнению с линейной системой с настройками регулятора для нелинейной системы и нелинейной системой с настройками регулятора при $T_{p2}=6$.

В дальнейшем поставлена задача улучшить показатели качества и устойчивости, используя методы адаптивного управления [2, 5], чему будет посвящена отдельная статья.

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» [6].

Список литературы

1. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
2. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 216 с.
3. Гольберг Ф.Д., Батенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления. – М.: Изд-во МАИ., 1999. – 82 с.
4. Зиятдинов И.Р., Махнутин А.К., Кавалеров Б.В. Исследование линейных алгоритмов управления газотурбинными установками // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. URL: www.science-education.ru/122-21395 (дата обращения: 09.09.2015).
5. Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В., Бахирев И.В. Исследование системы управления с эталонной моделью и сигнальной настройкой для электроэнергетической газотурбинной установки // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6-2. – С. 235–240.
6. Кавалеров Б.В., Бахирев И.В., Килин Г.А., Маталасова Е.А. О задачах исследования адаптивного управления электростанциями на базе конвертированных авиационных ГТУ //

Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 11. – С. 65–77.

7. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 400 с.

Рецензенты:

Шулаков Н.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры электротехники и электромеханики, ФГБОУ ВПО «Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет», г. Пермь;

Казанцев В.П., д.т.н., профессор, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.