

УДК 621.311.238:681.511.2-047.58

Б.В. Кавалеров, И.Р. Зиятдинов, Ш.Д. БасаргинПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Исследуются возможности построения систем автоматического управления газотурбинными электростанциями. Изучается использование для этого принципов адаптивного управления с эталонной моделью и сигнальным воздействием. В качестве метода адаптации используется метод, основанный на функции Ляпунова, из соображений сокращения времени поиска экстремума. Предприятия отечественного авиационного двигателестроения выпускают газотурбинные установки (ГТУ) не только для авиации, но также для построения электростанций различной мощности. Известно, что ГТУ является работоспособной лишь при наличии системы автоматического управления (САУ), поэтому задачам совершенствования САУ ГТУ уделяется серьезное внимание. В ГТУ, предназначенных для электростанций, возникает необходимость обеспечения заданных показателей качества электроэнергии в условиях постоянно изменяющейся электрической нагрузки и изменения режимов работы электростанции, что увеличивает требования к САУ. В статье представлена и подробно описана модель ГТУ для исследования адаптивного управления. С помощью этой модели получены экспериментальные данные, выявившие проблему управления ГТУ одновременно по двум координатам. Предложено объяснение возникшей ситуации. Показано, что улучшение одной координаты, возможно получить за счет некоторого ухудшения другой координаты. Для дальнейшего изучения выявленной проблемы построена упрощенная динамическая модель второго порядка. С помощью такой модели проведены комплексные исследования различных аспектов адаптивного управления одновременно двумя координатами модели. В результате экспериментов подтвердилось предположение о том, что за счет выбора матрицы Q возможно улучшить одну регулируемую переменную за счет другой. Получены результаты при варьировании параметров адаптивного управления и параметров моделирования. Публикуемые результаты исследований предназначены для поиска оптимальных соотношений параметров адаптивных систем автоматического управления динамическими объектами второго порядка. В дальнейшем эти результаты планируется проверить на четырехмерной модели САУ ГТУ с целью предварительной апробации перспективных решений в создании новых САУ ГТУ в интересах отечественного авиадвигателестроительного комплекса предприятий.

Ключевые слова: газотурбинная установка, моделирование, адаптивная система автоматического управления, эталонная модель.

B.V. KavaleroV, I.R. Ziyatdinov, Sh.D. Basargin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEARCH OF ADAPTIVE CONTROL OF THE DYNAMIC OBJECT OF THE SECOND ORDER TO OPTIMIZE THE WORK OF GAS TURBINE INSTALLATIONS

The article explores the possibilities of building automatic control systems for gas turbine power plants. Modern trends in the development of adaptive management and prospects for its use in the power industry are being studied. It is known that the enterprises of the domestic aviation engine-building produce gas-turbine installations (GTU) not only for aviation, but also for the construction of power plants of various capacities. It is known that a gas turbine unit is operable only if there is an automatic control system (ACS); therefore, serious attention is paid to the tasks of improving the ACS of a gas turbine unit. In gas turbines designed for power plants, there is a need to ensure the specified indicators of the quality of electricity in a constantly changing electrical load and changes in operating modes of the power plant, which increases the requirements for ACS. We consider ways to significantly improve the parameters of automatic control systems through the use of tabular adjustment of regulators, the introduction of adaptive ACS with a reference model. The possibilities of their construction are investigated, their advantages and disadvantages are analyzed. As an adaptation method, it is advisable to choose a method based on the Lyapunov function, in order to reduce the search time for an extremum. A simplified dynamic model of Aviadvigatel OJSC (Perm) is used as a model of a gas turbine unit. It is intended for testing control algorithms and using them as part of semi-natural test benches. As a model of the ACS, the program code of the standard ACS of the electric power GTU is used. We confirmed the assumption that by choosing the matrix Q , it is possible to improve one adjustable variable at the expense of another. Results were obtained by varying the values of K_d , h , dt and the method for solving differential equations.

Keywords: gas-turbine plant, simulation, adaptive automatic control system, reference model.

Введение. Создание электростанций малой и средней мощности на базе авиационных газотурбинных установок (ГТУ) является одним из важных направлений деятельности отечественных предприятий авиационного двигателестроения. Качество вырабатываемой такими электростанциями электроэнергии в значительной степени зависит от того, насколько успешно производится управление частотой вращения ГТУ при разнообразных возмущающих воздействиях со стороны электрической сети при сбросах и набросах электрической нагрузки [1].

Поскольку ГТУ является существенно нелинейным объектом управления, характеристики возмущающих воздействий по-разному влияют на динамику ГТУ при холостом ходе, при номинальном режиме и при частичных нагрузках. Поэтому системы управления ГТУ с учетом этого обстоятельства обычно строятся с нелинейными регуляторами, имеющими так называемую «табличную настройку»,

призванную компенсировать нелинейности объектов управления. Еще большие возможности компенсации не только нелинейностей, но и различных нестабильностей параметров может дать адаптивное управление ГТУ. Но применение адаптивного управления требует проведения серьезных исследований с целью оценки его возможностей и ограничений при управлении различными режимами ГТУ [2–12]. Основным методом исследования при этом ввиду необходимости охватить широкий спектр режимных ситуаций является математическое моделирование.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590012.

Модель газотурбинной установки. ГТУ является структурно сложным объектом управления. Кроме того, ГТУ может нормально функционировать только при наличии системы автоматического управления (САУ), что дополнительно повышает размерность исследуемой системы. При моделировании, особенно на первых этапах исследования, следует учесть только наиболее существенные для данной задачи факторы. Поэтому модель ГТУ должна включать в себя все основные нелинейности, компенсировать которые и призвано адаптивное управление.

Рассмотрим модель ГТУ, ее структура показана на рис. 1. На рисунке обозначено: СТ – свободная турбина, ТК – турбокомпрессор, НБ – нелинейный блок, $n_{СТ}$ – частота вращения свободной турбины, $n_{ТК}$ – частота вращения турбокомпрессора, G_T – расход топлива, N_E – располагаемая мощность свободной турбины, N_G – мощность электрогенератора.

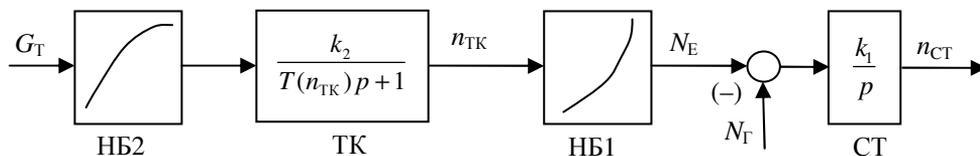


Рис. 1. Структурная схема нелинейной модели ГТУ

Турбокомпрессор моделируется аperiodическим звеном. Свободная турбина в отличие от традиционного подхода [13–15] в нашем случае упрощенно представлена идеальным интегрирующим звеном. Такое упрощение допустимо, поскольку свободная турбина обладает относительно большой постоянной времени, и поэтому в режиме

стабилизации при малых отклонениях $n_{СТ}$ она ведет себя как интегрирующее звено. По этой же причине коэффициент СТ k_1 рассматривается как постоянный, на самом деле он зависит от $n_{СТ}$, но в режиме стабилизации этим тоже можно пренебречь. Наконец, вместо разности моментов на рис. 1 показаны мощности, это тоже объясняется тем, что в режиме стабилизации при малых изменениях $n_{СТ}$ мощности будут пропорциональны моментам ($N = M \cdot \omega$).

Рассмотрим нелинейности. На рис. 1 их два вида:

1) нелинейные зависимости, представленные НБ. НБ1 отражает зависимость мощности свободной турбины от $n_{ТК}$. НБ2 отражает зависимость установившегося значения $n_{ТК}$ от G_T ;

2) зависимость постоянной времени турбокомпрессора от $n_{ТК}$: $T(n_{ТК})$. Здесь этой зависимостью в отличие от k_1 пренебречь нельзя, так как $n_{ТК}$ при работе ГТУ меняется в широких пределах.

Модель ГТУ, показанная на рис. 1, является упрощенной, но вполне достаточной для первого этапа модельных экспериментов. В этой модели, например, дополнительно пренебрегаем динамикой дозатора газа, обратным влиянием СТ на ТК, опережающим приращением мощности на СТ.

Как отмечено выше ГТУ будет работоспособной только при наличии САУ, которая является совокупностью объекта управления и управляющего устройства. На рис. 2 показана упрощенная схема замкнутой САУ, регулирующей $n_{СТ}$. На самом деле в реальных САУ много контуров регулирования, но для нашего рассмотрения важен этот контур, поскольку $n_{СТ}$ определяет частоту вращения электрогенератора, а следовательно, прямо влияет на качество вырабатываемой электроэнергии.

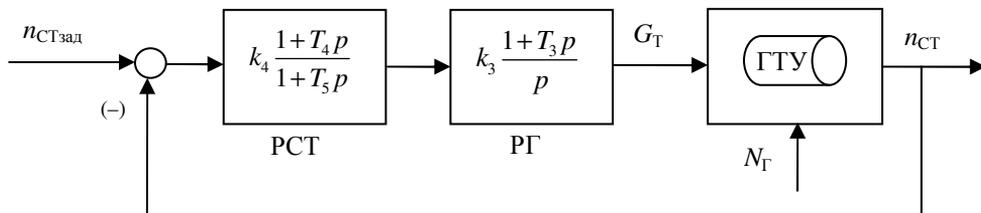


Рис. 2. Структурная схема модели САУ ГТУ

На рис. 2 обозначено: ГТУ – модель ГТУ по рис. 1, РСТ – регулятор свободной турбины, РГ – регулятор газа, $n_{СТзад}$ – сигнал задания частоты вращения свободной турбины $n_{СТ}$. Наличие двух регуляторов на

рис. 2 объясняется следующим обстоятельством: РСТ – это один из нескольких регуляторов, которые замыкаются на дозатор газа через РГ. Логика специального селектора определяет, какой именно регулятор будет замкнут в данном случае на РГ. В режиме стабилизации $n_{СТ}$ основным регулятором является РСТ. Поэтому на первом этапе рассмотрения остальными регуляторами можно пренебречь и рассматривать структуру на рис. 2 как базовую. Далее обсудим, как можно построить адаптивное управление для САУ ГТУ, изображенной на рис. 2.

Адаптивное управление с эталонной моделью. В работе [16] рассматривается адаптивное управление электромеханическими системами с упругими связями. Модель электропривода оказывается структурно подобна модели ГТУ, представленной на рис. 1.

В модели электропривода, приведенной в работе [16], тоже на выходе стоит идеальное интегрирующее звено (моделирует вал электродвигателя), а перед ним – аperiodическое звено (моделирует электрическую часть двигателя). Поэтому возникает желание предположить, что адаптивные алгоритмы, рассмотренные в работе [16], могут быть работоспособны и при работе с ГТУ. Это предположение нашло свое подтверждение, о чем свидетельствуют результаты, ранее опубликованные в [4]. Но остаются и некоторые проблемы. Для их изучения проведем экспериментальные исследования на моделях. Рассмотрим вариант с эталонной моделью.

На рис. 3 показана структура адаптивного управления с эталонной моделью, с сигнальной и параметрической настройками [16], здесь буквами М обозначена эталонная модель.

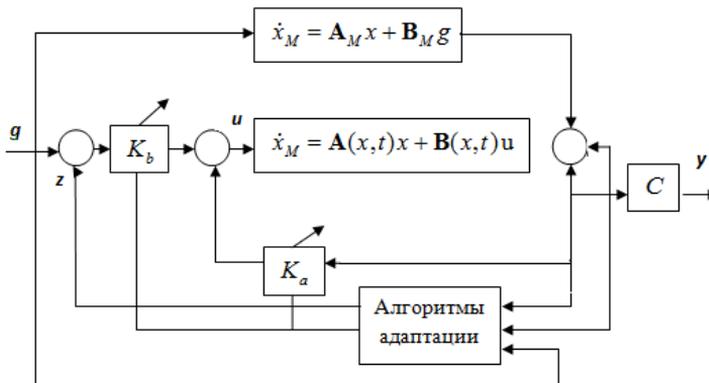


Рис. 3. Структурная схема с эталонной моделью с параметрической и сигнальной настройкой

На первом этапе проще реализовать сигнальное воздействие z , оно подается на вход САУ и корректирует ее поведение, чтобы приблизить это поведение к поведению эталонной модели. Поэтому рассмотрим далее только сигнальное воздействие.

Для сигнальной адаптации на основе прямого (второго) метода Ляпунова можно записать [16]:

$$\mathbf{z}(t) = -h \operatorname{sgn}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}); \quad h > 0, \quad (1)$$

где $(\operatorname{sgn} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e})_i = \operatorname{sgn}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e})_i$. Матрица \mathbf{P} является решением матричного уравнения (уравнение Сильвестра)]:

$$\mathbf{P} \mathbf{A}^T + \mathbf{A}^T \mathbf{P} = -\mathbf{Q}, \quad (2)$$

где матрицу \mathbf{Q} рекомендуется выбирать диагональной (>0). Матрицы \mathbf{A} и \mathbf{B} описывают модель, представленную на рис. 2, в пространстве состояний. Размерность этих матриц будет равняться для рассматриваемого случая четырем. Эта размерность определяется числом единичных интеграторов в схеме переменных состояния на рис. 2 (блок РСТ может быть записан через единственный интегратор). Вектор \mathbf{e} – четырехмерный вектор ошибок, т.е. разностей между выходами единичных интеграторов модели, представленной на рис. 2, и эталонной модели. Условие отрицательной определенности функции Ляпунова $V(\mathbf{e})$ относительно ошибки \mathbf{e} выполняется, если значение параметра h выбрать как

$$h \geq M_\phi \|\mathbf{B}_i^+\|, \quad (3)$$

чем гарантируется $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) = 0$.

Эталонную модель выбираем структурно соответствующую модели, представленной на рис. 1 и 2, но с постоянными параметрами, линеаризация производится в точке номинального режима 2,5 МВт. Коэффициенты регуляторов РСТ и РГ подобраны так, что переходный процесс по частоте соответствует требованиям стандарта на качество электроэнергии, вырабатываемой генератором. Настройка регуляторов близка к так называемой настройке на «симметричный оптимум» [17, 18].

Расчет матриц выполним для следующих значений параметров: $k_1 = 0,092$, $T = 0,5$, $k_2 = 22,235$, $k_3 = 1,25$, $T_3 = 0,8$, $k_4 = 4,44$, $T_4 = 0,4$, $T_5 = 0,1$:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0,092 & 0 & 0 \\ -394,897 & -2,000 & 22,235 & -296,173 \\ -22,200 & 0 & 0 & -16,650 \\ -10,000 & 0 & 0 & -10,000 \end{pmatrix},$$

$\mathbf{V} = (0 \ 394,897 \ 22,2 \ 10)^T$, тогда решение уравнения (2) для единичной матрицы \mathbf{Q} дает:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 381,4292 & 1,6073 & 43,3538 & -159,7680 \\ 1,6073 & -0,1764 & 0,0225 & 3,1050 \\ 43,353 & 0,0225 & -6,4002 & 16,8944 \\ -159,7680 & 3,1050 & 16,8944 & -120,1426 \end{pmatrix}$$

и рассчитанные по (1) коэффициенты усиления:

$$(0,5000 \ 38,1269 \ -35,7390 \ -399,7866).$$

На рис. 4 показано, как формируется сигнальное воздействие на основании сигналов ошибки (рассогласований) между моделью САУ ГТУ и эталонной моделью.

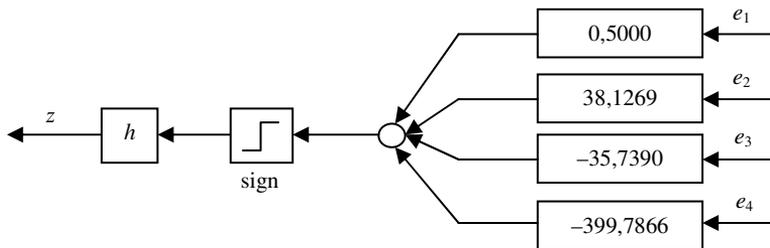


Рис. 4. Формирование сигнального воздействия

Результаты экспериментов. Моделирование показало, что улучшение качества регулирования получается незначительным. На рис. 5 показаны переходные процессы по $n_{СТ}$ при сбросе мощности генератора с 2,5 до 2 МВт. При $h = 10\ 000$ переходный процесс получается ближе к эталонной модели, чем при $h = 500$. Однако переходные процессы по остальным переменным сопровождаются сильными колебаниями вокруг желаемой траектории. Такие колебания, являясь допустимыми для электропривода, могут оказаться недопустимыми для ГТУ, для их устранения функция sign может быть заменена сигмоидальной [19, 20]. Переходные процессы, показанные на рис. 5, получены для модели ГТУ с нелинейностями только типа 2 ($T(n_{TK})$), нели-

нейности 1-го типа отключены, при их подключении ситуация еще более ухудшается. Причиной этого видится то, что схема, показанная на рис. 4, пытается устранить все 4 ошибки за счет одного сигнального воздействия z , поэтому, например, вторая переменная $n_{ТК}$ настраивается в обоих случаях лучше, это вызвано тем, что на нее сигнальное воздействие поступает раньше, чем на $n_{СТ}$ (рис. 6).

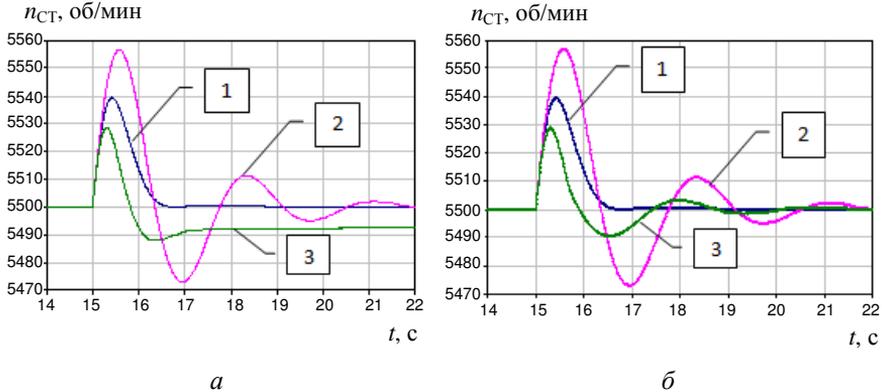


Рис. 5. Переходный процесс по $n_{СТ}$: $a - h = 500$, $b - h = 10\,000$; 1 – эталонная модель, 2 – САУ ГТУ без адаптивного управления, 3 – с адаптивным управлением

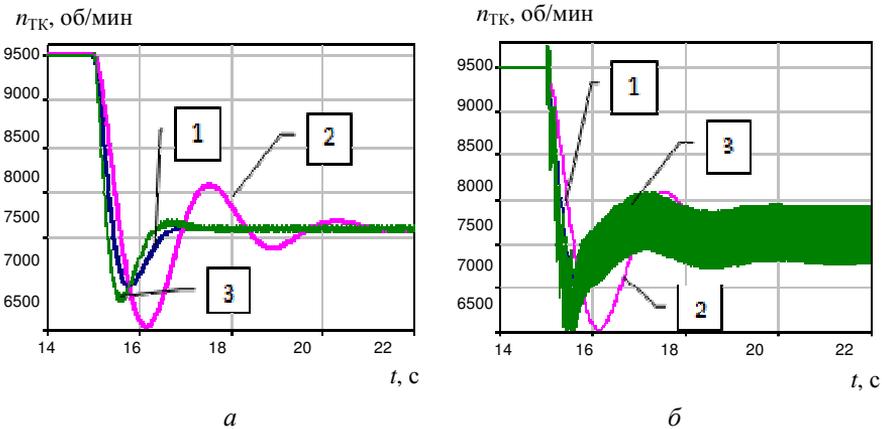


Рис. 6. Переходный процесс по $n_{ТК}$: $a - h = 500$, $b - h = 10\,000$; 1 – эталонная модель, 2 – САУ ГТУ без адаптивного управления, 3 – САУ ГТУ с адаптивным управлением

Если оставить для схемы на рис. 4 только один сигнал ошибки e_1 , тогда для первой переменной $n_{СТ}$ получаем почти полное совпадение с эталонной моделью даже при учете всех нелинейностей в модели САУ ГТУ (рис. 7), однако при этом другие переменные вообще никак не настраиваются.

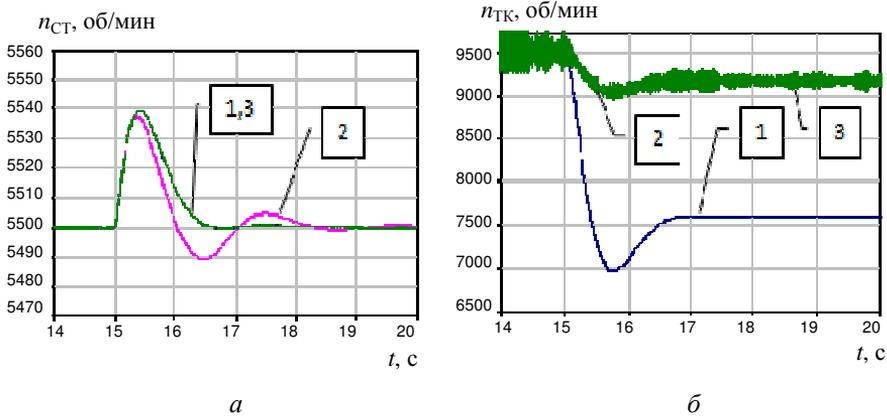


Рис. 7. Переходный процесс по $n_{СТ}$ и $n_{ТК}$ при одном сигнале ошибки e_1 , $h = 500$:
 а – $n_{СТ}$, б – $n_{ТК}$; 1 – эталонная модель, 2 – САУ ГТУ без адаптивного управления,
 3 – САУ ГТУ с адаптивным управлением

Объяснить эти результаты, по-видимому, можно тем обстоятельством, что матрица Q была выбрана единичная, и поэтому лучше настраиваются переменные, расположенные ближе к месту сигнального воздействия. Если варьировать матрицу Q , можно постараться найти компромисс между качеством настройки переменных. При этом случай, показанный на рис. 7, может рассматриваться как крайний, когда настройка проводится только по одной переменной.

Чтобы проверить такое утверждение и исключить различные влияющие факторы, возьмем модель простейшей динамической системы 2-го порядка и проведем исследование на ней.

Динамическая модель второго порядка. Для проверки выберем модель системы, показанную на рис. 8. Регулятор здесь самый простой – пропорциональный – K_r . Два звена этой модели аналогичны звеньям модели на рис. 1, но здесь нет явно заданных нелинейностей. Нелинейности будут имитироваться изменением коэффициента K_d . За эталонную модель принимается модель, показанная на рис. 8, с неизменными коэффициентами.

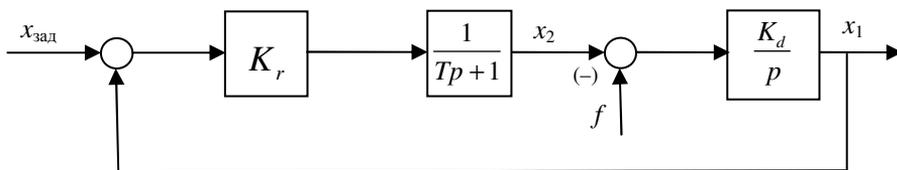


Рис. 8. Динамическая система второго порядка

При этом для эталонной модели примем, что $K_d = 1$. Для модели настраиваемой системы этот коэффициент будет задаваться экспериментатором для проверки адаптивного управления. На рис. 8 показаны: f – возмущающее воздействие, x_1 и x_2 – переменные, по аналогии с моделью САУ ГТУ будем считать, что они имеют размерность: обороты в минуту (об/мин).

Возьмем коэффициент регулятора $K_r = 5$, тогда матрицы $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -50 & -10 \end{pmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 50 \end{pmatrix}$, для единичной матрицы \mathbf{Q} по уравнению (1) получаем следующие коэффициенты для формирования сигнального воздействия: (0,5000 2,5500). Зададим $K_d = 5$.

Эксперименты показали, что при варьировании K_d наибольшая ошибка проявляется вблизи точного значения (значения K_d эталонной модели) (рис. 9). Моделирование выполнялось при $h = 100$, шаг интегрирования дифференциальных уравнений модели $dt = 0,00001$. При этом наиболее точный результат дает самый простой метод Эйлера при решении дифференциальных уравнений модели. Более сложные методы увеличивают ошибку. На графиках показана ε – максимальная абсолютная ошибка между аналогичными переходными процессами динамической системы второго порядка (см. рис. 8) и эталонной модели (об/мин).

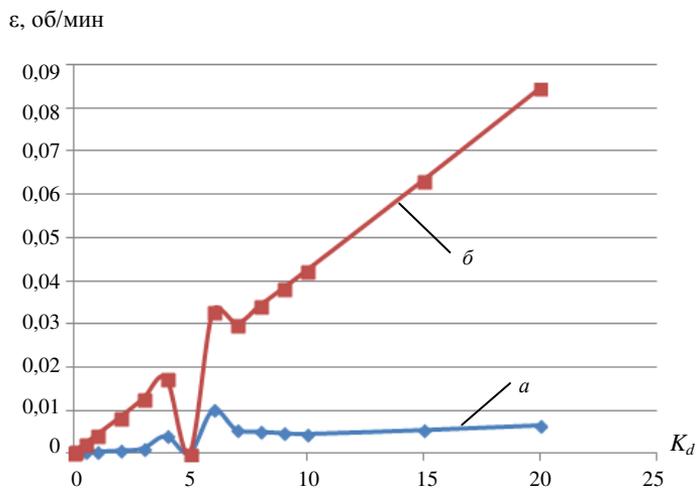


Рис. 9. Зависимость ошибки от отклонения параметра модели:
 a – метод Эйлера, b – метод Рунге-Кутты, шаг расчета – $dt = 0,00001$ с

Попытка выявить причину, почему вблизи совпадения моделей ошибка нарастает, позволила сделать вывод, что причиной этого может быть слишком большой коэффициент h , при его уменьшении ошибка вблизи точного значения уменьшается. Иными словами, сигнальное воздействие слишком сильно начинает «раскачивать» систему. На рис. 10 показаны результаты, подтвердившие это предположение.

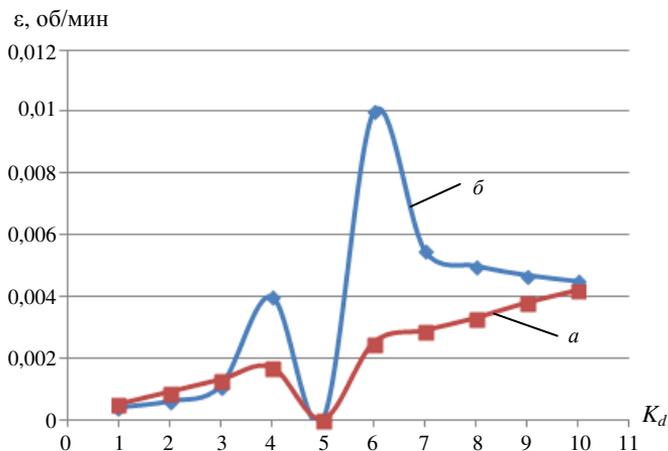


Рис. 10. Зависимость ошибки от отклонения параметра модели:
 $a - h = 10$, $\delta - h = 100$, шаг расчета – $dt = 0,00001$ с

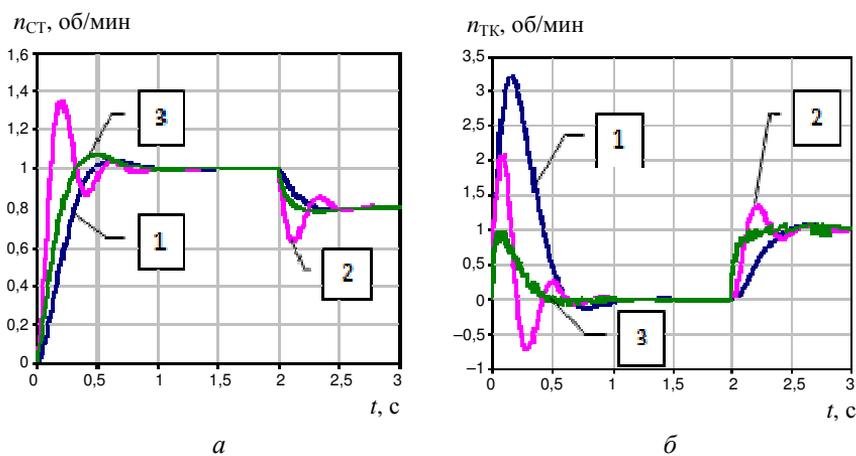


Рис. 11. Переходный процесс по $n_{СТ}$ и $n_{ТК}$ при первой матрице Q : $a - n_{СТ}$, $b - n_{ТК}$; 1 – эталонная модель, 2 – САУ ГТУ без адаптивного управления, 3 – САУ ГТУ с адаптивным управлением

Наконец, варьирование коэффициентов матрицы Q подтвердило предположение о том, что за счет ее выбора можно улучшить одну регулируемую переменную за счет другой. На рис. 11 показан переход-

ный процесс по $n_{СТ}$ и $n_{ТК}$ при матрице $Q = \begin{pmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, на рис. 12 – при матрице $Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$. В обоих случаях $h = 100$.

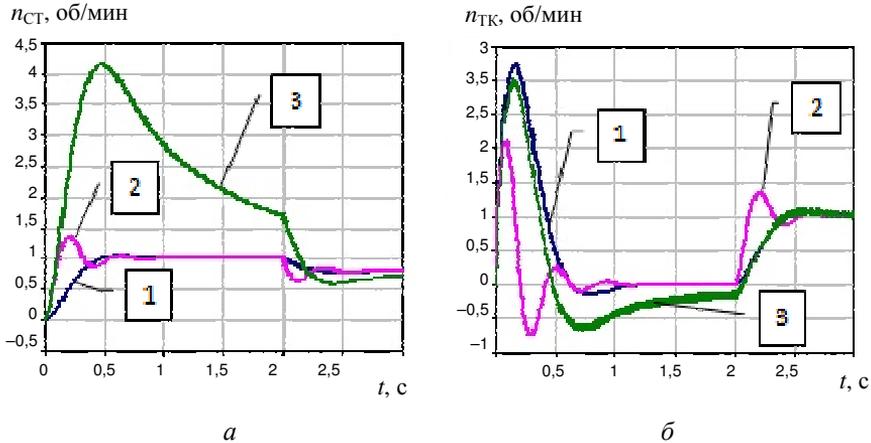


Рис. 12. Переходный процесс по $n_{СТ}$ и $n_{ТК}$ при второй матрице Q :
 а – $n_{СТ}$, б – $n_{ТК}$; 1 – эталонная модель, 2 – САУ ГТУ без адаптивного управления, 3 – САУ ГТУ с адаптивным управлением

Выводы. Использование динамической модели второго порядка позволило за счет неучета второстепенных факторов исследовать влияние параметров адаптивного управления на качество переходных процессов. Получены следующие результаты при варьировании величин K_d , h , dt и метода решения дифференциальных уравнений:

1. Метод Эйлера может обеспечивать меньшую ошибку, чем метод Рунге–Кутты и методы более высоких порядков.

2. При малых отклонениях параметров и больших h наблюдается увеличение ошибки регулирования в несколько раз более существенное, чем при больших отклонениях параметров.

3. При малых h регулирование лучше вблизи малых отклонений параметров, но хуже – при больших отклонениях параметров. С ростом h уменьшается наклон линии (улучшается «жесткость» регулирования), но не вблизи точного значения параметра.

4. В матрице Q важно соотношение, а не абсолютные величины элементов матрицы. При одинаковом соотношении элементов матрицы результаты совпадают. Увеличивая первый элемент матрицы Q , приближаемся к системе, замкнутой только по первой переменной.

5. Соответствующим выбором элементов Q , как и простым выбором коэффициентов сигнального воздействия, достигается в определенной мере улучшение x_1 за счет x_2 и наоборот.

6. Имеется некоторый оптимум в выборе элементов матрицы Q , который обеспечивает некоторое наилучшее соотношение ошибок по x_1 и x_2 . Это соотношение и его особенности предполагается в дальнейшем исследовать.

7. Подобным же образом возможно исследовать оптимальные значения по вариациям h , dt и методам решения дифференциальных уравнений, вслед за этим результаты предполагается перенести на модели САУ ГТУ для дальнейшего изучения.

Библиографический список

1. Lalit Chandra Saikia, Shashi Kant Sahu. Automatic generation control of a combined cycle gas turbine plant with classical controllers using Firefly Algorithm // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2013. – Vol. 53. – P. 27–33.

2. Кавалеров Б.В., Бахирев Г.А., Килин Г.А. Адаптивное управление частотой вращения газотурбинной установки с настраиваемой моделью // *Электротехника*. – 2017. – № 11. – С. 43–46.

3. Кавалеров Б.В., Бахирев И.В., Басаргин Ш.Д. Исследование параметрической адаптации регулятора газотурбинной установки электростанции мощностью 6 МВт // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 11–2. – С. 281–285.

4. Кавалеров Б.В., Зиятдинов И.Р., Бахирев И.В. Исследование адаптивного управления газотурбинной электроэнергетической установкой при пуске соизмеримого по мощности асинхронного двигателя // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 12–1. – С. 49–57.

5. Кавалеров Б.В., Бахирев И.В., Килин Г.А. Исследование адаптивного управления частотой вращения электроэнергетических газотурбинных установок // *Электротехника*. – 2016. – № 11. – С. 21–27.

6. Кавалеров Б.В., Зиятдинов И.Р. Исследование системы управления с эталонной моделью и параметрической настройкой для электроэнергетической газотурбинной установки // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 12–6. – С. 1107–1111.

7. Кавалеров Б.В., Зиятдинов И.Р., Бахирев И.В. Исследование системы управления с эталонной моделью и сигнальной настройкой для электроэнергетической газотурбинной установки // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 6–2. – С. 235–240.

8. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах // Сер. Синергетика: от прошлого к будущему. – СПб.: ЛКИ, 2008. – 384 с.
9. Ricketts В.Е. Modelling of a gas turbine: A precursor to adaptive control // IEE Colloquium on Adaptive Controllers in Practice '97. Digest. – 1997. – № 176.
10. On line Tuning Premise and Consequence FIS: Design Fuzzy Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller Based on Lyapunov Theory / F. Piltan, N. Sulaiman, A. Gavahian, S. Roosta, S. Soltani // International Journal of Robotics and Automation. – 2011. – Vol. 2. – № 5. – P. 381–400.
11. Гусев Ю.М. Система автоматического управления ТВВД с оптимизацией удельного расхода топлив // Вестник Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. – 2011. – Т. 15. – № 5(45).
12. Скороспешкин В.Н. Адаптивная система автоматического регулирования // Науковедение: интернет-журнал. – 2014. – № 2(21).
13. Кухарчук В.Г. Современные принципы построения комплексных систем управления авиационных газотурбинных двигателей. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 1995. – 164 с.
14. Гуревич О.С. Управление авиационными газотурбинными двигателями: учеб. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 100 с.
15. Гольберг Ф.Д., Батенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 82 с.
16. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модельным управлением. – Л.: Энергоатомиздат; Ленингр. отд-ние, 1984. – 216 с.
17. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат; Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
18. Automating controller tuning for gas-turbine mini power stations in computer testing / A.I. Polulyakh, I.G. Lisovin, B.V. Kavalero, A.A. Shigapov // Automation and Remote Control. – 2014. – Vol. 75. – Iss. 7. – P. 1330–1336.
19. Бахирев И.В., Кавалеров Б.В. Адаптивное управление газотурбинной установкой с эталонной моделью и сигмоидальной функцией // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 3.1(61). – С. 118–123.

20. Cybenko G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function // *Mathematics of Control, Signals and System*. – 1989. – № 2(4). – P. 303–314.

References

1. Lalit Chandra Saikia, Shashi Kant Sahu. Automatic generation control of a combined cycle gas turbine plant with classical controllers using Firefly Algorithm. *Electrical Power and Energy Systems*, 2013, vol. 53, pp. 27-33.

2. Kavalеров B.V., Bakhirev G.A., Kilin G.A. Adaptivnoe upravlenie chastotoi vrashcheniia gazoturbinoi ustanovki s nastraivaemoi model'iu [Adaptive frequency control of a gas turbine unit with a custom model]. *Elektrotehnika*, 2017, no. 11, pp. 43-46.

3. Kavalеров B.V., Bakhirev I.V., Basargin Sh.D. Issledovanie parametriceskoi adaptatsii regulatora gazoturbinoi ustanovki elektrostantsii moshchnost'iu 6 MVt [The study of the parametric adaptation of the regulator of the gas turbine unit of a 6 MW power plant]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 11-2, pp. 281-285.

4. Kavalеров B.V., Ziiatdinov I.R., Bakhirev I.V. Issledovanie adaptivnogo upravleniia gazoturbinoi elektroenergeticeskoi ustanovkoi pri puske soizmerimogo po moshchnosti asinkhronnogo dvigatel'ia [Investigation of an adaptive control algorithm with gas turbine units taking into account the dynamics of an asynchronous engine]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 12-1, pp. 49-57.

5. Kavalеров B.V., Bakhirev I.V., Kilin G.A. Issledovanie adaptivnogo upravleniia chastotoi vrashcheniia elektroenergeticeskikh gazoturbinykh ustanovok [Investigation of the electric power gas turbines rotation frequency adaptive control]. *Elektrotehnika*, 2016, no. 11, pp. 21-27.

6. Kavalеров B.V., Ziiatdinov I.R. Issledovanie sistemy upravleniia s etalonnnoi model'iu i parametriceskoi nastroikoi dlia elektroenergeticeskoi gazoturbinoi ustanovki [Investigation of the control system with a reference model and parametric adjustment for an electric power gas turbine unit]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 12-6, pp. 1107-1111.

7. Kavalеров B.V., Ziiatdinov I.R., Bakhirev I.V. Issledovanie sistemy upravleniia s etalonnnoi model'iu i signal'noi nastroikoi dlia elektroenergeticeskoi gazoturbinoi ustanovki [Investigation of the control system with a reference model and signal setting for an electric power gas turbine unit]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 6-2, pp. 235-240.

8. Tiukin I.Iu., Terekhov V.A. Adaptatsiia v nelineinykh dinamicheskikh sistemakh. [Adaptation in nonlinear dynamic systems]. *Sinergetika: ot proshlogo k budushchemu*. Saint Petersburg: LKI, 2008. 384 p.

9. Ricketts B.E. Modelling of a gas turbine: A precursor to adaptive control. *IEE Colloquium on Adaptive Controllers in Practice '97*. Digest, 1997, no. 176.

10. Piltan F., Sulaiman N., Gavahian A., Roosta S., Soltani S. On line Tuning Premise and Consequence FIS: Design Fuzzy Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller Based on Lyapunov Theory. *International Journal of Robotics and Automation*, 2011, vol. 2, no. 5, pp. 381-400.

11. Gusev Iu.M. Sistema avtomaticheskogo upravleniia TVVD s optimizatsiei udel'nogo raskhoda topliv [TVVD automatic control system with specific fuel consumption optimization]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 15, no. 5(45).

12. Skorospeshkin V.N. Adaptivnaia sistema avtomaticheskogo regulirovaniia [Adaptive automatic control system]. *Naukovedenie: internet-zhurnal*, 2014, no. 2(21).

13. Kukharchuk V.G. Sovremennye printsipy postroeniia kompleksnykh sistem upravleniia aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei [Modern principles of building integrated control systems for aircraft gas turbine engines]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1995. 164 p.

14. Gurevich O.S. Upravlenie aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigateliami [Aviation Gas Turbine Engine Management: Study Guide]. Moscow: Moskovskii aviatsionnyi institut, 2001. 100 p.

15. Gol'berg F.D., Batenin A.V. Matematicheskie modeli gazoturbinnnykh dvigatelei kak ob"ektov upravleniia [Mathematical models of gas turbine engines as control objects]. Moscow: Moskovskii aviatsionnyi institut, 1999. 82 p.

16. Bortsov Iu.A., Poliakhov N.D., Putov V.V. Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i model'nym upravleniem [Electromechanical systems with adaptive and model control]. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otdelenie, 1984. 216 p.

17. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovkii G.G. Upravlenie elektroprivodami [Electric Drive Control]. Leningrad: Energoizdat, Leningradskoe otdelenie, 1982. 392 p.

18. Polulyakh A.I., Lisovin I.G., Kavalerov B.V., Shigapov A.A. Automating controller tuning for gas-turbine mini power stations in computer testing. *Automation and Remote Control*, 2014, vol. 75, iss. 7, pp. 1330-1336.

19. Bakhirev I.V., KavaleroV B.V. Adaptivnoe upravlenie gazoturbinnoi ustanovkoi s etalonnou model'iu i sigmoidal'noi funktsiei [Adaptive control of a gas turbine plant with a reference model and sigmoidal function]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*, 2015, no. 3.1(61), pp. 118-123.

20. Cybenco G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals and System*, 1989, no. 2(4), pp. 303-314.

Сведения об авторах

Зиятдинов Илья Рудольфович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: i.ziyatdinoff@mail.ru).

Кавалеров Борис Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

Басаргин Шамиль Давыдович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: izajtinov@gmail.com).

About the author

Ziyatdinov Ilya Rudolfovich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of the Electro technical and electromechanical department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: i.ziyatdinoff@mail.ru).

KavaleroV Boris Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, head of the department of electrical engineering and electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

Basargin Shamil Davidovich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of the Electro technical and electromechanical department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: izajtinov@gmail.com).

Получено 30.10.2019