

УДК 681.51:681.3

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2025-18-7-15-23>**Пороговые модели в системах управления газотурбинными двигателями****В. Н. Шелудько¹, О. А. Андриевский^{1✉}, Н. В. Андриевская², П. В. Соколов¹**¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия✉ oaandrievskiy@stud.eltech.ru

Аннотация. Представлена математическая модель системы автоматического управления (САУ) газотурбинным двигателем (ГТД). Ее особенность заключается в том, что главный контур управления по задающему воздействию включает в себя контуры управления основными параметрами ГТД. Сформулирована проблема переопределенного объекта управления. Отмечены недостатки селективного управления. Предложена схема реализации управления переопределенными объектами на основе пороговых моделей коллективного поведения. Разработана структура пороговых моделей коллективного поведения, в которой в качестве агентов выбраны основные регулируемые параметры газотурбинного двигателя. Основные параметры модели (коэффициенты влияния, пороговое значение) рассчитаны экспериментальным методом. Проведен анализ работы штатного селектора, адаптивного группового нечеткого регулятора и пороговой модели коллективного поведения. Исследования проводились на обобщенной математической модели двигателя летательного аппарата.

Ключевые слова: система автоматического управления, газотурбинный двигатель, основные регулируемые параметры двигателя летательных аппаратов, управление переопределенным объектом, селектор каналов управления, пороговая модель коллективного поведения, порог активации, матрица взаимодействия агентов, коэффициенты взаимодействия в модели

Для цитирования: Пороговые модели в системах управления газотурбинными двигателями / В. Н. Шелудько, О. А. Андриевский, Н. В. Андриевская, П. В. Соколов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 7. С. 15–23. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-15-23.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Threshold Models in Gas Turbine Engine Control Systems**V. N. Sheludko¹, O. A. Andrievsky^{1✉}, N. V. Andrievskaya², P. V. Sokolov¹**¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia✉ oaandrievskiy@stud.eltech.ru

Abstract. Presents a mathematical model of the automatic control system (ACS) for a gas turbine engine (GTE). A distinguishing feature of the proposed mathematical model ACS is that the primary control loop, driven by the reference signal, incorporates control loops for the main parameters of the gas turbine engine. The problem of controlling an overdetermined system is formulated, and the limitations of traditional selective control approaches are highlighted. A control framework for overdetermined systems based on threshold models of

collective behavior is proposed. The structure of the threshold model is developed, where the key regulated parameters of the gas turbine engine act as agents. The main model parameters, such as influence coefficients and threshold values, are identified using an experimental approach. The performance of the standard selector, adaptive fuzzy group controller, and threshold collective behavior model is analyzed. The research was conducted using a generalized mathematical model of an aircraft engine.

Keywords: automatic control system, gas turbine engine, key regulated parameters of aircraft engines, over-determined control system, control channel selector, threshold model of collective behavior, activation threshold, agent interaction matrix, model interaction coefficients

For citation: Threshold models in gas turbine engine control systems / V. N. Sheludko, O. A. Andrievsky, N. V. Andrievskaya, P. V. Sokolov// LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 7. P. 15–23. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-15-23.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Основная задача математических моделей систем автоматического управления (САУ) газотурбинными двигателями (ГТД) летательных аппаратов (ЛА) – это поддержание тяги на основных режимах полета. Поэтому основным контуром управления служит контур поддержания частоты вращения ротора вентилятора двигателя за счет подачи топлива G_T в камеру сгорания [1]–[3]. Однако от данного параметра зависит функционирование основных подсистем как САУ ГТД, так непосредственно и двигателя. Основные подсистемы математических моделей САУ ГТД, это камера сгорания (КС), в которой за счет расхода топлива G_T поддерживается температура и давление газов ($T_{КС}$ и $p_{КС}$), система подачи воздуха в КС – входные направляющие аппараты (ВНА) (регулируемый параметр угол поворота лопаток ВНА), компрессоры высокого и низкого

давления, поддерживающие заданный уровень давления ($p_{КВД}$, $p_{КНД}$), система управления дозирующей иглой и др. [4], [5].

Обобщенная структурная схема системы представлена в следующем виде.

На рис. 1 представлены контуры управления регулируемых параметров x_i ($i = \overline{1, m}$) и задающие воздействия x_{3i} ($i = \overline{1, m}$). Вектор регулируемых параметров включает в себя следующие физические переменные газотурбинного двигателя: $\mathbf{X} = [n_1 \ n_2 \ T_{КС} \ p_{КС} \ \alpha_{ВНА} \ p_{КВД} \ \dots]^T$, где n_1, n_2 – частоты вращения валов двигателя (вентилятора и компрессора); $\alpha_{ВНА}$ – положение лопаток входного направляющего аппарата включающие модели объекта управления $W_{O_i}(p)$ и регуляторов $W_{P_i}(p)$. Управляющий сигнал

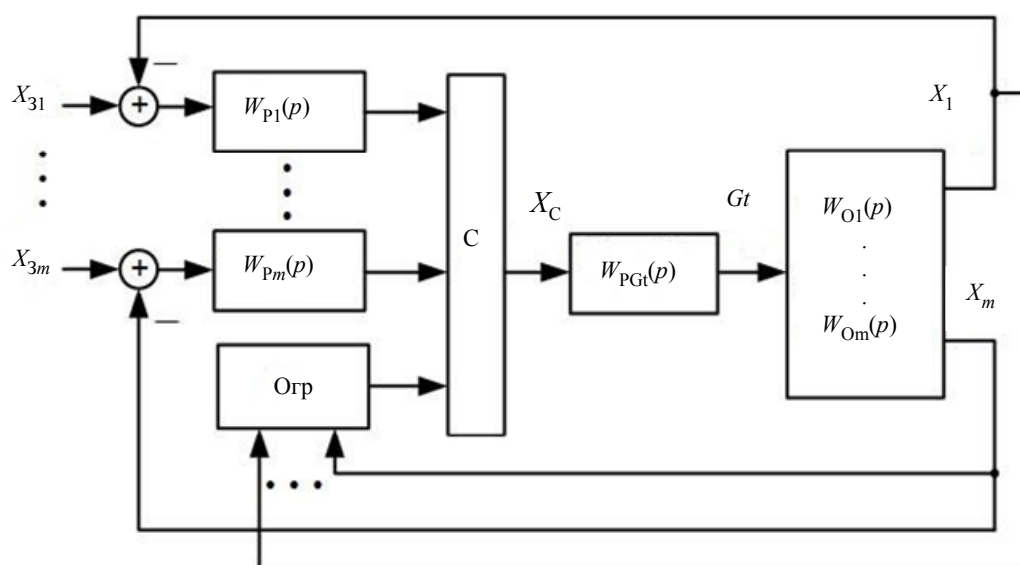


Рис. 1. Структурная схема САУ ГТД
Fig. 1. Block diagram of GTM ACS

каждого контура формирует требование по уровню G_T , которое обеспечивает функционирование всего двигателя в необходимых диапазонах функционирования на соответствующем режиме полета. Для выполнения «требований» по уставке по i -му контуру к G_T в современных двигателях предусмотрен селектор (С), который формирует управляющее воздействие x_C как для основного контура управления, так и для остальных [6]–[8]. Селектор представляет собой логическое устройство, который используя минимаксный подход выбирает в качестве задатчика «главный контур», ближайший к метке уставкой x_C , также селектор учитывает ограничения Огр переменных x_i . Ограничения накладываются не только на абсолютные значения регулируемых параметров, но и на скорости их изменений, т. е. учитывают изменения в статическом и динамическом режимах. Основной регулятор $W_{PGT}(p)$ определяет величину G_T , которая и обеспечивает работоспособность двигателя по всем регулируемым параметрам на соответствующем режиме полета.

Таким образом, возникает проблема управления переопределенным объектом, которая заключается в том, что количество регулируемых параметров (x_i) больше количества управляющих воздействий на математическую модель ГТД (G_T) [7]. Следует отметить, что работа штатного селектора является эффективной в идеальных условиях. Однако в изменяющихся условиях внешней среды, изменений условий полета селектор не адаптируется и эффективность управления как в основном контуре, так и в других снижается.

К основным недостаткам существующего селекторного управления следует отнести [7]–[10]:

- уставка основного контура (выбор сигнала) x_C определяется одним контуром или ограничением;
- логическая формула селектора определяет его как статический элемент, не учитывая динамику процессов в математической модели ГТД;
- в динамическом режиме в селекторе возникает эффект «дребезга» – многократное и частое переключение контуров;
- логическая формула штатного селектора рассчитана для идеального варианта работы двигателя изменения параметров окружающей среды в условиях полета и не учитывает помехи, возникающие как внутри двигателя, так и в средствах измерения параметров работы газотурбинного двигателя.

Проблема селектора на сегодняшний день решается усовершенствованием формы селектора. Для устранения данных недостатков применяются усовершенствованные формулы селектора, переход от однозначной логики формулы селектора к адаптивному нечеткому регулятору, в котором функция селектора представлена в виде нечеткой функции, что способствует повышению качества управления в изменяющихся внешних условиях [8], [11]–[13]. Другой подход – это логико-динамический адаптивный селектор [6], [7], [9], в котором за счет уточняющих дополнительных воздействий корректируется динамика процесса. Данные схемы реализации, безусловно, улучшают качество управления, но оставляют селектор в контуре управления.

В статье предлагается качественно новый подход – заменить селектор на пороговую модель коллективного поведения, которая формирует управляющий сигнал x_C на основе «коллективного решения» всех контуров-агентов. [14]–[17].

Математическое описание пороговой модели. Для построения пороговой модели коллективного поведения (ПМКП) использован математический аппарат концепции «управления толпой» [18]–[21]: «толпа» представляет собой совокупность взаимодействующих агентов. Каждый агент находится в одном из состояний: 1 – «действует» или 0 – «бездействует». При принятии решения агент ведет себя конформно, т. е. учитывает «давление» других агентов. Минимальное число действующих соседей-агентов, при котором происходит «возбуждение» агента, называется порогом.

Решение отдельного агента определяется как

$$x_i = BR(x_{-i}) = \begin{cases} 1, & \sum_{j \neq i} t_{ij} x_j \geq \theta_i, \\ 0, & \sum_{j \neq i} t_{ij} x_j < \theta_i, \end{cases} \quad (1)$$

где t_{ij} – влияние j -го агента на i -й агент ($t_{ji} > 0$,

$\sum_{j \neq i} t_{ji} = 1$, $t_{ii} = 0$), θ_i – порог i -го агента. Выражение (1) называется наилучшим ответом (BR – best response). Коэффициенты веса t_{ji} оформляются в виде матрицы веса

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & \cdots & t_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ t_{n1} & \cdots & t_{nn} \end{bmatrix}.$$

Общее коллективное решение определяется, как равновесие Нэша для вектора $\mathbf{X}$:

$$BR(\mathbf{X}) = (BR(x_{-1}), \dots, BR(x_{-n})). \quad (2)$$

Разработка ПМКП включает в себя определение значимых контуров – агентов, идентификацию весов (влияния агентов) t_{ij} и обоснование порога решения θ_i [18], [19].

Для реализации коллективного решения по формированию управляющего воздействия G_T в САУ ГТД можно предложить следующую пороговую модель (рис. 2) [13], [21].

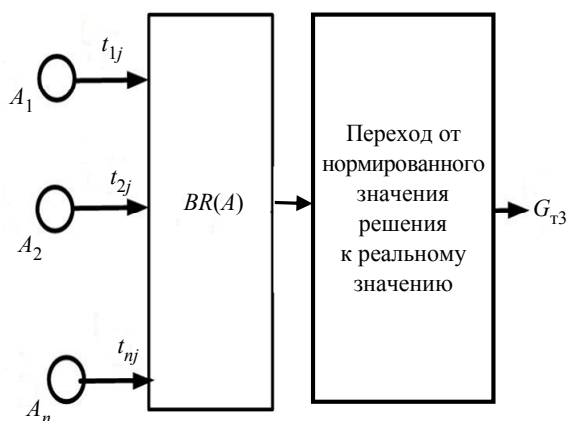


Рис. 2. Структура коллективной пороговой модели
Fig. 2. The structure of the collective threshold model

На рис. 2 представлены A_i – агенты – выходные сигналы контуров, выдвигающие требования по G_T . Индивидуальная динамика агента (контрольного контура), а также коллективное управленческое решение формализуются с использованием выражений (1) и (2). Управляющее задание для каждого контура задается в бинарной форме, отражающей принятое решение о необходимости

действия, после чего преобразуется в конкретное числовое значение уставки.

Пороговая модель применительно к математической модели САУ ГТД функционирует по следующему принципу [21]:

- задается начальное значение уставки для основного контура $n_{в.з}$;
- определяются ведущие контуры, которые имеют преимущественный вес в формировании задающего сигнала по G_T ;
- определяется функциональная зависимость между параметрами ПМКП;
- экспериментальным путем составляется матрица коэффициентов взаимного влияния активируются другие агенты в соответствии моделью коллективного поведения;
- при достижении равновесного состояния формируется сигнал G_T .

Разработка пороговой модели коллективного поведения должна обеспечивать следующие показатели качества:

- быстродействие – время переходных процессов по регулируемым параметрам не более 2–3 с;
- перерегулирование 0 % (апериодический процесс по «значимым» контурам); на максимальном режиме работы двигателя возможно перерегулирование не более 2.5 %;
- статическая ошибка по контуру частоты вращения вентилятора n_1 на всех режимах полета не более 0.5 %;
- статическая ошибка системы управления по контуру температуры газа в камере сгорания $T_{КС}$ на максимальном режиме работы двигателя не более 0.3 %.

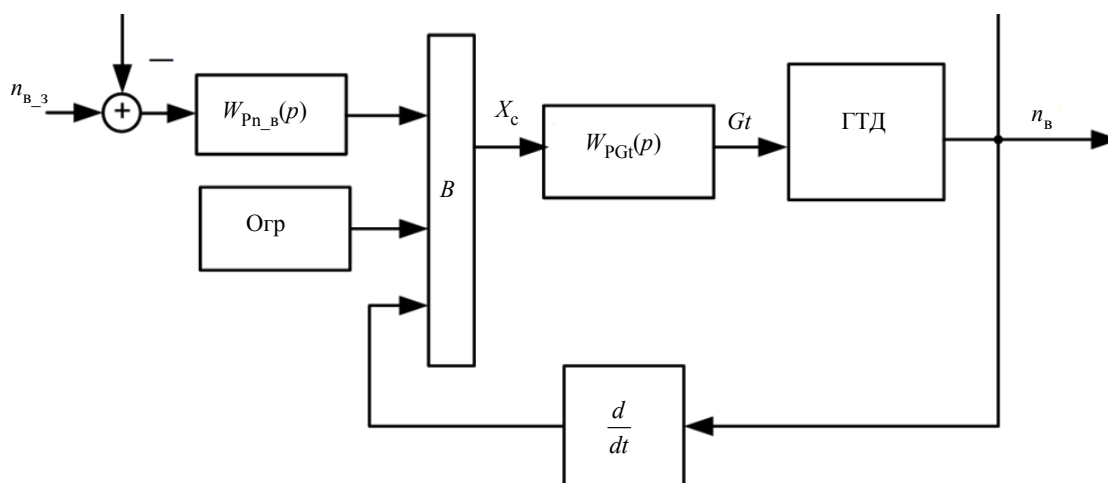


Рис. 3. Структурная схема САУ ГТД по контуру «частота вращения вентилятора»
Fig. 3. Structural diagram of the ACS GTD along the contour «fan speed»

В статье рассмотрена математическая модель САУ ГТД по основному контуру управления (частоте вращения ротора вентилятора).

Для построения пороговой модели коллективного поведения рассмотрен режим полета «земля», высота полета $H = 0$.

В качестве модели ГТД САУ (рис. 3, где n_b – частота вращения ротора вентилятора, $n_{b,з}$ – задающая частота вращения ротора вентилятора) использована упрощенная динамическая модель двигателя ЛА [2]. Блок «В» на рисунке рассмотрен в 3 вариантах: штатный селектор, адаптивный нечеткий групповой регулятор (АНГР) [7] и пороговая модель коллективного поведения (см. рис. 2).

Для пороговой модели коллективного поведения были рассмотрены следующие параметры. Агентом, осуществляющим активацию коллективного поведения, выбрано задающее воздействие по контуру «частота вращения вентилятора». Вектор агентов представлен в виде

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} n_{b,з} \\ n_{b, \max} \\ n_{b, \min} \\ dn_{b, \text{пр}} \\ dn_{b, \text{сбр}} \end{bmatrix},$$

где $n_{b,з}$ – задание по контуру частоты вращения вентилятора; $n_{b, \max}$ – максимальное значение ча-

стоты вращения вентилятора; $n_{b, \min}$ – минимальное значение частоты вращения вентилятора; $dn_{b, \text{пр}}$ – ускорение частоты вращения вентилятора на режиме «приемистость»; $dn_{b, \text{сбр}}$ – ускорение частоты вращения вентилятора на режиме «сброс».

Для расчета параметров пороговой модели были использованы экспериментальные данные режима «приемистость» и «сброс» на высоте $H = 0$ («земля») по основному контуру как в штатном режиме, так и в условиях помех и влияния изменяющихся параметров внешней среды. Весовые коэффициенты учитывают статическую и динамическую зависимости регулируемых параметров и статистические данные о помехах. Результаты идентификации параметров приведены в матрице весов:

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 & 0 & 0.2 & 0.5 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 & 0.2 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}.$$

Порог принятия решения для всех агентов принят на уровне 0.75.

На рис. 4–6 приведены результаты моделирования САУ ГТД по основному контуру. Рассмотрен режим разгона на высоте $H = 0$ м на режимах разгона и сброса. Моделирование осуществлялось на упрощенной математической модели обобщенного двигателя летательного аппарата.

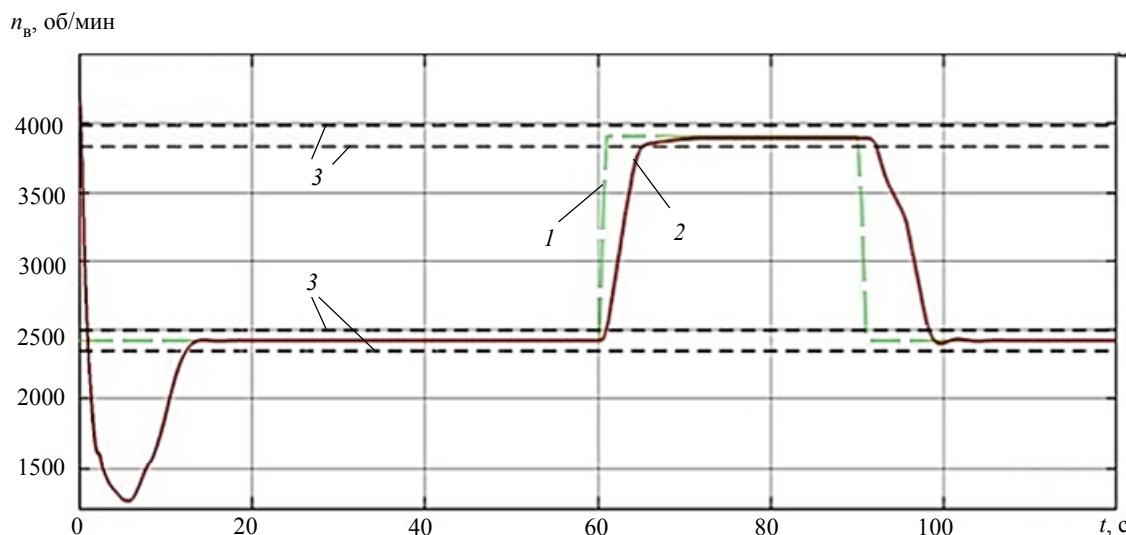


Рис. 4. Результат моделирования теоретической модели переходного процесса по n_b при использовании штатного селектора: 1 – задающее воздействие, 2 – переходный процесс n_b , 3 – 5 %-ная зона для определения показателей качества

Fig. 4. Simulation result of the theoretical model of the transient process for n_b using the standard selector:

1 – the reference input, 2 – the transient response n_b , and 3 – the 5 % tolerance band used for assessing quality metric:

n_B , об/мин

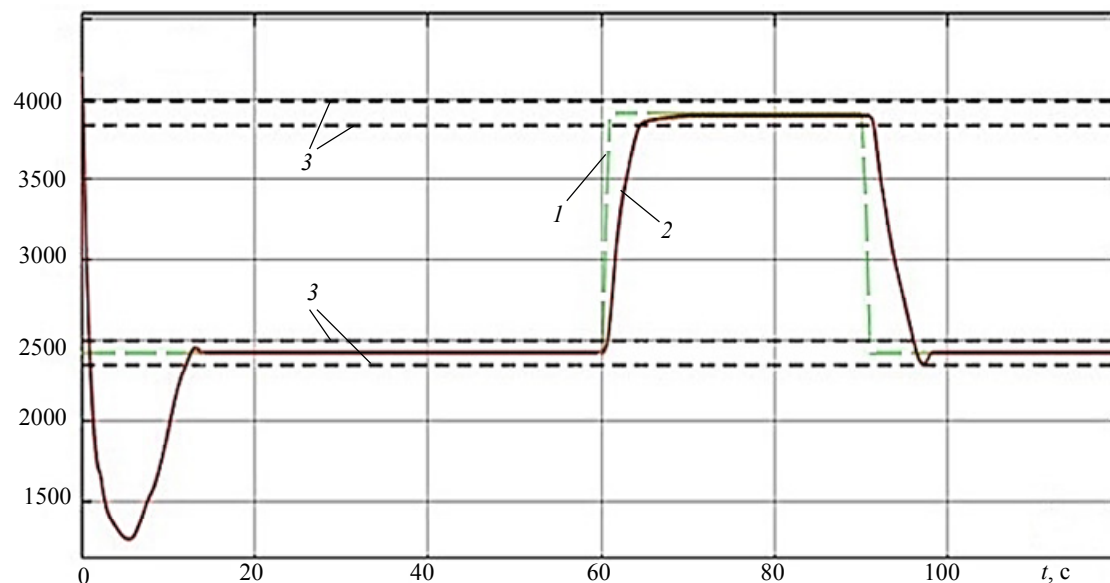


Рис. 5. Результат моделирования теоретической модели переходного процесса по n_B при использовании адаптивного нечеткого группового регулятора: 1 – задающее воздействие; 2 – переходный процесс n_B ; 3 – 5 %-ная зона для определения показателей качества

Fig. 5. Simulation result of the theoretical model of the transient process for n_B using the adaptive fuzzy group controller: 1 – the reference input; 2 – the transient response n_B and 3 – the 5 % tolerance band used for assessing quality metrics

n_B , об/мин

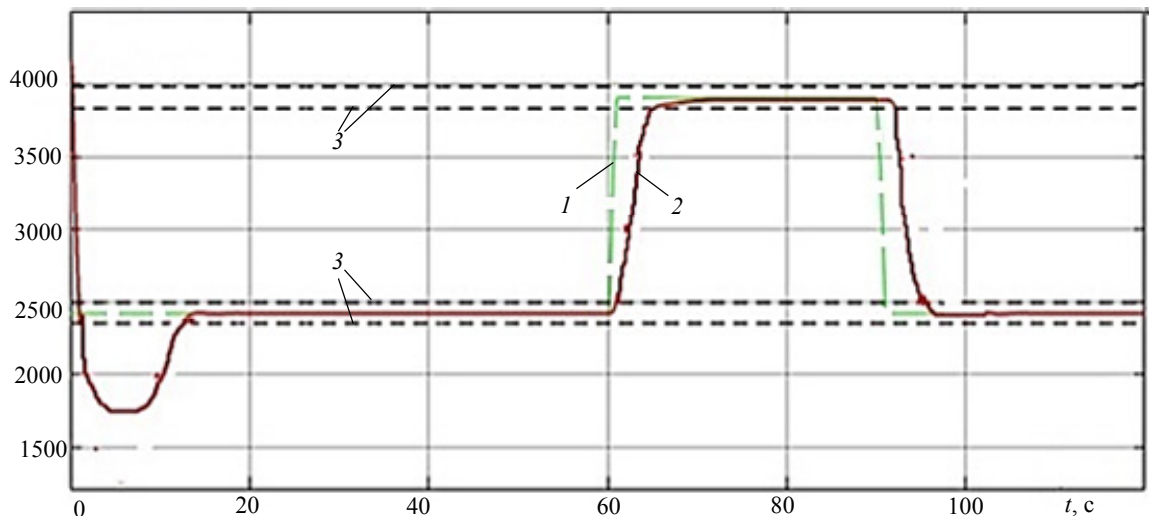


Рис. 6. Результат моделирования теоретической модели переходного процесса по n_B при использовании адаптивной пороговой модели коллективного поведения: 1 – задающее воздействие; 2 – переходный процесс n_B ; 3 – 5 %-ная зона для определения показателей качества

Fig. 6. Simulation result of the theoretical model of the transient process for n_B using the threshold model of collective behavior: 1 – the reference input; 2 – the transient response n_B and 3 – the 5 % tolerance band used for assessing quality metrics

Анализ результатов моделирования показал предпочтительность пороговой модели коллективного поведения перед штатным селектором: увеличение быстродействия и уменьшение переуправления.

Выводы и заключение. Проведен анализ селективного управления в системах управления

двигателями летательных аппаратов. Предложен метод построения мультиагентного регулятора контуров САУ подачи топлива в камеру сгорания двигателя на базе моделей коллективного поведения. Разработана пороговая модель для контура управления частотой вращения вентилятора. Получены параметры пороговой модели (относи-

тельные пороги и весовые коэффициенты) идентифицированы на основе результатов моделирования модели двигателя как в идеальных условиях, так и с учетом помех. Результаты моделирования системы автоматического управления по каналу «частота вращения вентилятора» свидетельствуют о том, что адаптивный нечеткий

групповой регулятор в сочетании с пороговой моделью коллективного поведения демонстрирует более высокие показатели качества управления по сравнению со стандартным селектором. А пороговая модель коллективного поведения заметно улучшает такие показатели качества, как перерегулирование и время переходного процесса.

Список литературы

1. Интегральные системы автоматического управления силовыми установками самолетов / Ю. С. Белкин, Б. В. Боев, О. С. Гуревич, Ю. В. Ковачич, Т. С. Мартынова, А. А. Шевяков, О. К. Югов; под ред. А. А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1983. 283 с.
2. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2008. Т. 2. 368 с.
3. Системы автоматического управления авиационными ГТД: Энциклопедический справочник / под ред. О. С. Гуревича. М.: Торус Пресс, 2011. 208 с.
4. Остапенко С. В., Андриевская Н. В., Южаков А. А. Повышение отказоустойчивости газотурбинных двигателей за счет использования встраиваемой экспериментальной модели // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2023. № 11. С. 372–378.
5. Gurevich O., Smetanin S., Trifonov M. Automatic control to reduce the effect of deterioration of gas turbine engine components on its performance characteristics // AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum, virtual conf., August 9–11, 2021. 11 p. URL: <https://elib.rary.ru/item.asp?edn=tccogi> (дата обращения: 21.04.25).
6. Петунин В. И. Синтез систем автоматического управления газотурбинными двигателями с селектором каналов // Вестн. УГАТУ. Сер. «Управление, вычислительная техника и информатика». 2008. Т. 11, № 1 (28). С. 3–10.
7. Петунин В. И. Логико-динамические системы с селективным выбором каналов управления авиационными объектами. М.: Изд-во Инновационное машиностроение, 2018. 291 с.
8. Сторожев С. А., Южаков А. А. Групповое управление переопределенными объектами на базе нечеткой логики // Управление большими системами. Тр. Всерос. школы-конф. мол. уч. Челябинск: Изд-во Издательский центр ЮУрГУ, 2022. С. 186–193.
9. Петунин В. И. Методы согласования и адаптации систем автоматического управления газотурбинными двигателями с селекторами каналов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 2. С. 59–66.
10. Андриевская Н. В., Андриевский О. А. Применение пороговых моделей коллективного поведения для реализации селектора в газотурбинных двигателях // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2024. № 1. С. 103–106.
11. Сторожев С. А., Южаков А. А. Адаптация логико-динамической системы автоматического управления газотурбинным двигателем к изменяющимся условиям эксплуатации // Автоматизация в промышленности. 2024. № 9. С. 32–36.
12. Сторожев С. А., Южаков А. А. Адаптивное групповое управление переопределенным объектом на примере камеры сгорания газотурбинного двигателя // Сб. «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века». Пермь, 2022. С. 313–320.
13. Система селективного управления газотурбинным двигателем / В. Н. Шелудько, П. В. Соколов, О. А. Андриевский, Н. В. Андриевская // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2023. Т. 1. С. 79–82.
14. Андриевский О. А., Андриевская Н. В., Соколов П. В. Применение моделей коллективного поведения при реализации систем управления газотурбинным двигателем // Авиация и космонавтика. Тез. 21 междунар. конф. МАИ (НИИ). Москва: Перо, 2022. С. 89–91.
15. Бреер В. В., Новиков Д. А., Рогаткин А. Д. Управление толпой: Математические модели порогового коллективного поведения. М.: ЛЕНАНД, 2016. 168 с.
16. Микро- и макромоделли социальных сетей. Ч. 2. Идентификация и имитационные эксперименты / А. В. Батов, В. В. Бреер, Д. А. Новиков, А. Д. Рогаткин // Проблемы управления. 2014. № 6. С. 45–51.
17. Барабанов И. Н., Новиков Д. А. Динамические модели управления возбуждением толпы в дискретном времени // Автоматика и телемеханика. 2016. № 10. С. 123–139.
18. Рогаткин А. Д. Модель Грановеттера с непрерывным временем // УБС. 2016. № 60. 139–160.
19. Бреер В. В., Новиков Д. А., Рогаткин А. Д. Модели порогового коллективного поведения в задачах управления эколого-экономическими системами // УБС. 2015, № 55. С. 35–54.
20. Андриевская Н. В., Андриевский О. А. Исследование систем управления газотурбинных двигателей для выбора пороговых моделей коллективного поведения // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2024. № 5. С. 166–169.
21. Гостев В. И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.

Информация об авторах

Шелудько Виктор Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматического управления, ректор СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: vnsheludko@etu.ru

Андриевский Олег Александрович – аспирант кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: oaandrievskiy@stud.eltech.ru

Андриевская Наталья Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, Комсомольский проспект, д. 29, Пермский край, г. Пермь, 614990, Россия.
E-mail: andrievskaia_nv@pstu.ru

Соколов Петр Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: pvsokolov@etu.ru

Вклад авторов:

Шелудько В. Н. – общее руководство.

Соколов П. В. – общее руководство, оформление и редактирование статьи.

Андриевский О. А. – формирование концепции системы, формирование требований к системе, моделирование, оформление статьи.

Андриевская Н. В. – формирование концепции системы.

References

1. Integral'nye sistemy avtomaticheskogo upravlenija silovymi ustanovkami samoletov / Ju. S. Belkin, B. V. Boev, O. S. Gurevich, Ju. V. Kovachich, T. S. Mart'janova, A. A. Shevjakov, O. K. Jugov; pod red. A. A. Shevjakova. M.: Mashinostroenie, 1983. 283 s. (In Russ.).

2. Inozemcev A. A., Nihamkin M. A., Sandrackij V. L. Osnovy konstruirovaniya aviacionnyh dvigatelej i jenergeticheskikh ustanovok. M.: Mashinostroenie, 2008. T. 2. 368 s. (In Russ.).

3. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija aviacionnymi GTD: Jenciklopedicheskij spravocnik / pod red. O. S. Gurevicha. M.: Torus Press, 2011. 208 s. (In Russ.).

4. Ostapenko S. V., Andrievskaja N. V., Juzhakov A. A. Povyshenie otkazoustojchivosti gazoturbinnnyh dvigatelej za schjot ispol'zovanija vstraivaemoj jeksperimental'noj modeli. Nauch.-tehn. vestn. Povolzh'ja. 2023. № 11. S. 372–378. (In Russ.).

5. Gurevich O., Smetanin S., Trifonov M. Automatic control to reduce the effect of deterioration of gas turbine engine components on its performance characteristics // AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum, virtual conf., August 9–11, 2021. 11 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=tccogi> (data obrashhenija: 21.04.25).

6. Petunin V. I. Sintez sistem avtomaticheskogo upravlenija gazoturbinnymi dvigateljami s selektorom kanalov // Vestn. UGATU. Ser. «Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika». 2008 T. 11, № 1 (28). S. 3–10. (In Russ.).

7. Petunin V. I. Logiko-dinamicheskie sistemy s selektivnym vyborom kanalov upravlenija aviacionnymi ob#ektami. M.: Izd-vo Innovacionnoe mashinostroenie, 2018. 291 s. (In Russ.).

8. Storozhev S. A., Juzhakov A. A. Gruppovoe upravlenie pereopredelennymi ob#ektami na baze nechetkoj logiki // Upravlenie bol'shimi sistemami. Tr. Vseros. shkol'no-konf. mol. uch. Cheljabinsk: Izd-vo Izdatel'skij centr JuUrGU, 2022. S. 186–193. (In Russ.).

9. Petunin V. I. Metody soglasovanija i adaptacii sistem avtomaticheskogo upravlenija gazoturbinnymi dvigateljami s selektorami kanalov // Izv. vuzov. Aviacionnaja tehnika. 2022. № 2. S. 59–66. (In Russ.).

10. Andrievskaja N. V., Andrievskij O. A. Primenenie porogovyh modelej kollektivnogo povedenija dlja realizacii selektora v gazoturbinnnyh dvigateljah // Nauch.-tehn. vestn. Povolzh'ja. 2024. № 1. S. 103–106. (In Russ.).

11. Storozhev S. A., Juzhakov A. A. Adaptacija logiko-dinamicheskoj sistemy avtomaticheskogo upravlenija gazoturbinnym dvigatelem k izmenjajushhimsja uslovijam jekspluatacii // Avtomatizacija v promyshlennosti. 2024. № 9. S. 32–36. (In Russ.).

12. Storozhev S. A., Juzhakov A. A. Adaptivnoe gruppovoe upravlenie pereopredelennym ob#ektom na primere kamery sgoranija gazoturbinnogo dvigatelja // Sb. «Iskusstvennyj intellekt v reshenii aktual'nyh social'nyh i jekonomicheskikh problem XXI veka». Perm', 2022. S. 313–320. (In Russ.).

13. Sistema selektivnogo upravlenija gazoturbinnym dvigatelem / V. N. Shelud'ko, P. V. Sokolov, O. A. Andrievskij, N. V. Andrievskaja // Mezhdunar. konf. po mjagkim vychislenijam i izmerenijam. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU, 2023. T. 1. S. 79–82. (In Russ.).

14. Andrievskij O. A., Andrievskaja N. V., Sokolov P. V. Primenenie modelej kollektivnogo povedenija pri real-

realizacii sistem upravljenija gazoturbinnym dvigatelem // Aviacija i kosmonavtika. Tez. 21 mezhdunar. konf. MAI (NIU). Moskva: Pero, 2022. S. 89–91. (In Russ.).

15. Breer V. V., Novikov D. A., Rogatkin A. D. Upravlenie tolpoj: Matematicheskie modeli porogovogo kolektivnogo povedenija. M.: LENAND, 2016. 168 s. (In Russ.).

16. Batov A. V., Breer V. V., Novikov D. A., Rogatkin A. D. Mikro- i makromodeli social'nyh setej. Ch. 2. Identifikacija i imitacionnye jeksperimenty // Problemy upravlenija. 2014. № 6. S. 45–51. (In Russ.).

17. Barabanov I. N., Novikov D. A. Dinamicheskie modeli upravlenija vzbuzhdeniem tolpy v diskretnom vremeni // Avtomatika i telemekhanika. 2016. № 10. S. 123–139. (In Russ.).

18. Rogatkin A. D. Model' Granovettera s nepreryvnym vremenem // UBS. 2016. № 60. S. 139–160. (In Russ.).

19. Breer V. V., Novikov D. A., Rogatkin A. D. Modeli porogovogo kolektivnogo povedenija v zadachah upravlenija jekologo-jekonomicheskimi sistemami // UBS. 2015. № 55. S. 35–54. (In Russ.).

20. Andrievskaja N. V., Andrievskij O. A. Issledovanie sistem upravlenija gazoturbinnym dvigatelem dlja vybora porogovyh modelej kolektivnogo povedenija // Nauch.-tehn. vestn. Povolzh'ja. 2024. № 5. S. 166–169. (In Russ.).

21. Gostev V. I. Proektirovanie nechetkih reguljatorov dlja sistem avtomaticheskogo upravlenija. SPb.: BHV-Peterburg, 2011. 416 s. (In Russ.).

Information about the authors

Victor N. Sheludko – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automatic Control Systems, Rector of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vnsheludko@etu.ru

Oleg A. Andrievsky – postgraduate student of the Departments of Automatic control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: oaandrievskiy@stud.eltech.ru

Natalya V. Andrievskaya – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Microprocessor Automation Tools, Perm Polytechnic University, Komsomolsky Prospekt, 29, Perm Krai, Perm, 614990, Russia.

E-mail: andrievskaia_nv@pstu.ru

Peter V. Sokolov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: pvsokolov@etu.ru

Author contribution statement:

Sheludko V. T. – general management, system concept.

Sokolov P. V. – general management, article design and editing.

Andrievsky O. A. – system concept, system requirements, simulation, article design.

Andrievskaya N. V. – system concept.

Статья поступила в редакцию 07.04.2025; принята к публикации после рецензирования 23.05.2025; опубликована онлайн 29.09.2025.

Submitted 07.04.2025; accepted 23.05.2025; published online 29.09.2025.