

Система селективного управления газотурбинным двигателем

В. Н. Шелудько¹, П. В. Соколов¹, О. А. Андриевский¹, Н. В. Андриевская²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

vnscheludko@etu.ru, pvsokolov@etu.ru, oaandrievskiy@stud.eltech.ru

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет
nataly-anv@mail.ru

Аннотация. Объектом исследования является система селективного управления газотурбинным двигателем. Рассмотрены принципы построения штатного селектора. В статье приведена модель штатного селектора и выявлены недостатки существующей системы селективного управления. Основным недостатком является работа в статическом режиме. Проведен анализ современных подходов к построению системы селекторного управления газотурбинными двигателями. В качестве альтернативы предложено использование моделей коллективного поведения с применением пороговой модели поведения агентов. Приведены результаты моделирования. Определены задачи усовершенствования модели селектора.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; селектор; адаптивное управление; коллективное поведение; пороговые модели

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проектировании систем автоматического управления газотурбинного двигателя (ГТД), компании-разработчики все чаще начинают уделять внимание на модификационные работы штатного селектора. Штатный селектор – является одним из важных статическим элементом системы управления. Неправильная работа селектора может привести к трагическим последствиям, начиная от разрушения ГТД, заканчивая катастрофами самолетов.

На данный момент, практически все компании-разработчики ГТД используют в своих системах управления селектор штатного типа, который характеризуется выбором лишь «значимого» выходного сигнала. Работа данного селектора не является оптимальной и имеет достаточно серьезные недостатки.

В ходе данной статьи будут рассмотрены современные подходы к построению системы селективного управления на основе адаптации и нечеткого выбора. Благодаря этим методам можно решить основные недостатки штатного селектора:

- улучшить качество управления газотурбинного двигателя;
- повысить достоверность управления;
- исключить дребезг переключаемых контуров управления ГТД.

В данной статье представлен перспективный метод построения селектора на основе пороговых моделей поведения интеллектуальных агентов.

II. РАБОТА ШТАТНОГО СЕЛЕКТОРА И ЕГО НЕДОСТАТКИ

ГТД являются объектами управления, число управляющих воздействий которых меньше числа управляемых параметров. Обычно, управление в таком случае осуществляется с помощью алгоритмов логического селективного выбора контуров управления ГТД [1, 2, 3]. К таким системам относятся системы автоматического управления подачей топлива в камеру сгорания двигателя [3, 4] При селективном выборе регулируется параметр двигателя, наиболее приблизившийся к величине, определяемой программой регулирования. Селективный выбор реализуется с помощью штатного селектора. Основная функция селектора – это выбор «значимого» выхода контура управления для формирования управляющего сигнала по подаче топлива в камеру сгорания. Работа селектора на примере двух основных контуров представлена на рис. 1. [4, 5]

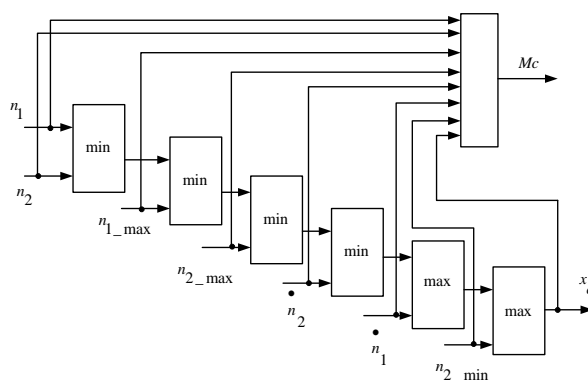


Рис. 1. Структурная схема штатного селектора

На рисунке представлены два контура (выходные сигналы контуров): n_1 – частота вращения вентилятора; n_2 – частота вращения ротора высокого давления. Кроме того, для качественного процесса селективного используются дополнительные динамические переменные: n_{1_max} – максимальное значение частоты вращения вентилятора (зависит от режима полета, то есть является выходным сигналом контура управления по максимальному значению на каждом режиме полета); n_{2_max} – максимальное значение частоты вращения ротора высокого давления; n_1 – выходной сигнал контура приемистости (ускорения частоты вращения вентилятора); n_2 – выходной сигнал контура сброса

(ускорения частоты вращения ротора высокого давления); n_{2_min} – минимальное значение частоты вращения ротора высокого давления на заданном режиме полета. Выход селектора (метка селектора M_c) определяет главным тот контур, который окажется близким к сигналу x_c .

Например, при управлении ГТД путем изменения расхода топлива в камере сгорания на максимальных режимах работы двигателя, для того чтобы все регулируемые параметры не превысили максимальных допустимых значений (ограничение сверху), селектор должен дать команду на управление дозирующим устройством (сигнал управления), соответствующий получению минимальной величины расхода топлива. С помощью селектирования по минимуму определяется очередность выполнения программ при приемистости. Если же ограничивают минимальные значения параметров (ограничения снизу), то предпочтение отдается регулятору параметров, для поддержания которого требуется наибольший расход топлива, т. е. селектирование по максимуму (селектор «max»).

Модель штатного селектора была реализована в MATLAB Simulink [6, 7].

В качестве исходных данных были рассмотрены режимы работы двигателя на различной высоте полета (H – высота полета) и режимах работы двигателя: приемистость и сброс. Результаты моделирования представлены на рис. 2–4.

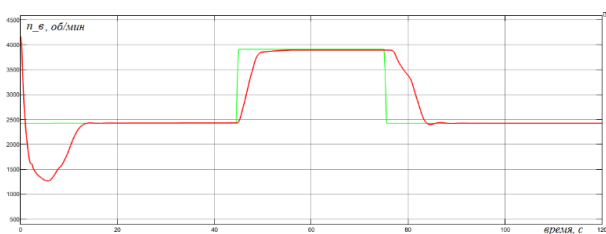


Рис. 2. Работа контура «п_в» при моделировании работы штатного селектора на земле, где красный график – текущее значение частоты вращения вентилятора, зеленый график – уставка частоты вращения вентилятора

На рис. 3 приведен график включения контуров в работу (участие контура в формировании выходного сигнала). Для штатного селектора существует ограничение: в каждый момент времени в работу может вступить только один контур, в таком режиме, в некоторые моменты времени, возникает «дребезг» метки селектора.

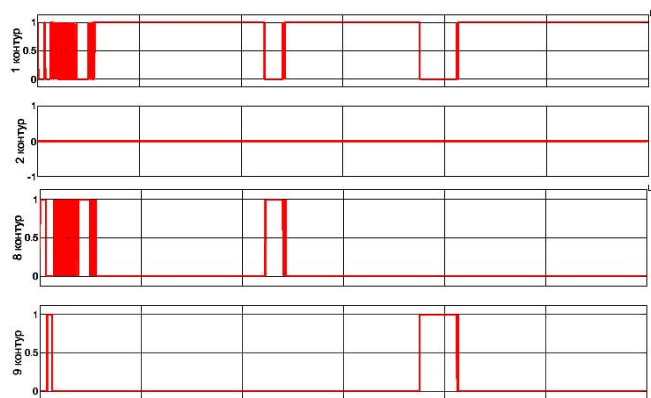


Рис. 3. График работы контуров штатного селектора на земле

0 – контур не участвует в формировании выходного сигнала; 1 – контур участвует в формировании выходного сигнала.

В результате моделирования определено: «дребезг» метки селектора возникает на любых высотах полета, что означает, что в некоторые моменты времени возникает противоречие в выборе того или иного контура.

Таким образом, недостатками работы штатного селектора являются [5, 6, 7]:

- выбор только одного контура;
- эффективная работа селектора только в статическом режиме;
- возникновение «дребезга» в динамическом режиме - то есть переключения «близких по значению» контуров;
- отсутствие адаптации к изменяющимся параметрам режима полета с учетом неконтролируемых возмущений.

Следовательно, возникает необходимость адаптации системы переключения контуров на разных режимах работы ГТД с учетом влияния неконтролируемых возмущений.

Актуальность разработки адаптивного группового регулятора определяется тем, что селективные регуляторы имеют следующие недостатки:

- принципом работы селективных регуляторов является выбор минимального или максимального сигнала в определенной последовательности;
- при проектировании селективных регуляторов разработчики ориентируются на среднестатистические характеристики ГТД, не учитывая их отклонения при эксплуатации;
- в селективных регуляторах отсутствует адаптация к неконтролируемым возмущениям.

III. АДАПТИВНЫЕ СЕЛЕКТОРЫ

Альтернативой данному штатному селектору являются адаптивные селекторы и селекторы на основе нечеткой логики [8, 9], которые определяют задающее значение как результат общего вклада каждого из контуров.

В адаптивном селекторе [8] режим переключения контуров определяется близостью переходных характеристик с динамическими характеристиками отдельных контуров. На рис. 4 представлены два контура, где K_i – динамические модели контуров по частоте вращения вентилятора (1) и частоте ротора высокого давления (2); M_i – заданные (желаемые) динамические модели контуров; $Огр_i$ – ограничения по частотам вращения; C – селектор; $ИУ$ – исполнительное устройство (дозировочная игла); $ГТД$ – газотурбинный двигатель; $БА$ – блок адаптации. Для обеспечения устойчивости и помехозащищенности режима переключения контуров, а также отсутствия скачков при переключениях необходимы одинаковые

динамические характеристики контуров. При этом каждый контур в отдельности должен обладать требуемыми показателями качества. Таким образом, «дребезг метки» исключается, так как переключение осуществляется не по моментальному значению выходной переменной контура, а на основе сопоставления динамических показателей качества.

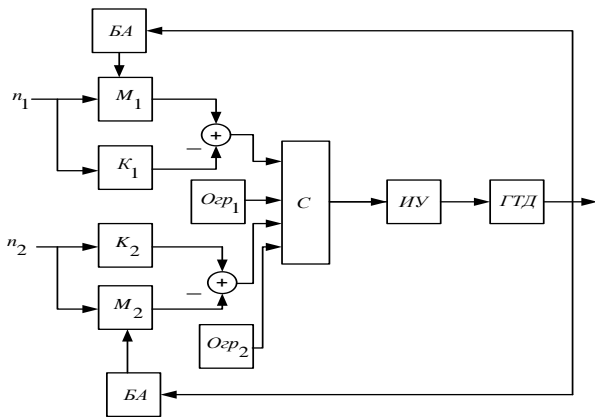


Рис. 4. Адаптивный селектор

Такой подход позволяет включать адаптивные регуляторы в любой контур, тем самым обеспечивая компенсацию внешних нерегулируемых воздействий.

Групповой нечеткий селектор [9] предполагает разбить контуры «минимуму» и «максимуму» (рис. 5).

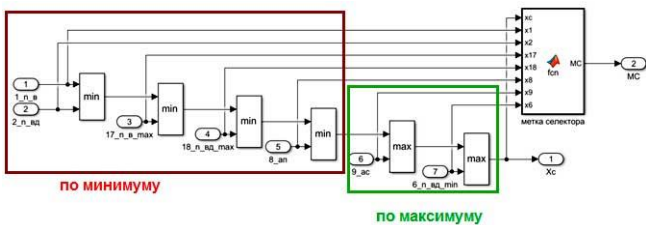


Рис. 5. Выделение контуров на группы исходя из логики нечеткого селектора

Таким образом, конфликт нескольких контуров ограничивается только двумя группами. Входящие в каждую группу выходные переменные обеспечивают нечеткую логику управления, то есть для каждого контура определяется лингвистическая переменная и соответствующая ей функция принадлежности. С помощью такого подхода так же «смягчается» «дребезг метки».

Данные подходы к решению проблемы селектирования контуров ГТД, безусловно, ликвидируют недостатки штатного селектора, но имеют сложности в реализации.

IV. ПОСТРОЕНИЕ СЕЛЕКТОРА НА МОДЕЛЯХ ПОРОГОВОГО ПОВЕДЕНИЯ

В данной статье представлен качественно новый подход, использующий пороговые модели коллективного поведения [10, 11].

Мультиагентная система управления строится на основе взаимодействия автономных децентрализованных подсистем – интеллектуальных агентов.

Модель порогового коллективного поведения представляет собой описание некоторого множества агентов $N = \{1, 2, \dots, n\}$. Каждый агент имеет возможности «действовать» или «бездействовать»: $x_i \in \{0, 1\}$, где $x_i = 0$ означает, что агент бездействует, а $x_i = 1$ – действует. На каждого агента оказывают влияние «соседи» – другие агенты. Тогда решение i -го агента зависит от двух факторов: собственного «мнения» – порога $Q_i \in [0, 1]$ и влияния соседей. Тогда поведение агента можно описать в виде:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \sum_{j \neq i} t_{ij} x_j \geq Q_i \\ 0, & \sum_{j \neq i} t_{ij} x_j \leq Q_i \end{cases}, \quad (1)$$

где t_{ij} – степень влияния соседей, ($\sum_{j \neq i} t_{ij} = 1, t_{ii} = 0$).

Выражение (1) может быть представлено в следующем виде, если граф связей агентов является полным:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i} x_j \geq Q_i \\ 0, & \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i} x_j \leq Q_i \end{cases} \quad (2)$$

В системе агентов может быть достигнуто единое мнение Q , называемое единым относительным порогом агентов. Тогда поведение агента будет определено как:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \sum_{j \neq i} x_j \geq Q d_i \\ 0, & \sum_{j \neq i} x_j \leq Q d_i \end{cases}, \quad (3)$$

где d_i – число соседей агента.

Модель (3) называется макромоделью с единым относительным порогом. В данной модели «влияние» любого соседа на i -го агента одинаковое. Но можно использовать модели, если агенты имеют различный вес – «репутацию». Для этого разработаны модели с репутацией [10].

Для реализации селектора модель коллективного поведения может быть использована следующим образом: агенты – это выходы контуров систем управления ГТД. Каждому выходу сопоставляется мнение – «действовать x_i ». Степень влияния агентов – это близость значений выходов контура. Тогда участие каждого контура будет отражено в виде единого относительного порога. Таким образом, будут исключены основные недостатки штатного селектора: выбор одного и только одного контура для формирования управляющего сигнала – подачи топлива G_T и будут учтены влияния всех контуров, то есть удастся избежать конфликтов – «дребезга». Кроме того, в моделях коллективного порога можно учесть влияние

других параметров ГТД и связь между этими параметрами. При построении модели порогового поведения целесообразно разбить контуры-агенты на две группы «минимум» и «максимум». В каждой группе определить ведущего агента. Адаптация селективного поведения будет обеспечиваться путем расчета степени влияния t_{ij} и порога срабатывания «единого мнения» Q . Результаты моделирования селектора представлены на рис. 6.

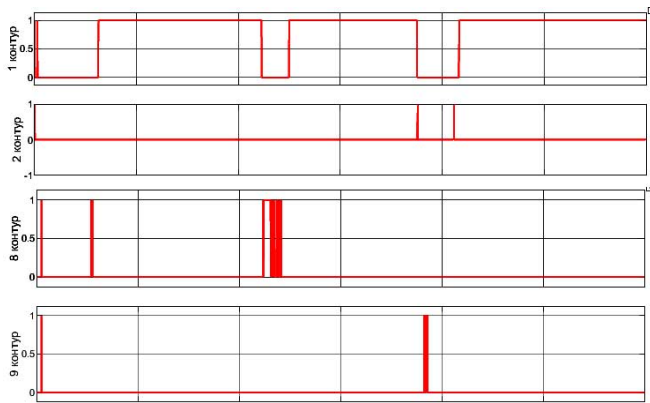


Рис. 6. График работы селектора на основе моделей коллективного поведения

Таким образом, модели коллективного поведения предоставляют достаточной большой диапазон для реализации эффективного выбора управляющего сигнала в ГТД, учитывающего свойства многосвязности и многоконтурности систем управления ГТД.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что важной задачей при введении нового типа системы селективного управления газотурбинным двигателем является вопрос грамотного выбора веса влияния для каждого агента с учетом работы различных режимов газотурбинного двигателя и с учетом влияния внешних факторов, таких как помехи датчиков, изменений окружающих условий.

Решением данной задачи должно обеспечивать создание методики грамотного выбора таких

параметров, как весовых коэффициентов влияния, так и выбор единого порога агентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дорошко С.М. *Авиационные реактивные и газотурбинные двигатели*. Рига: Изд-во РТУ, 2008. 258 с.
- [2] Елисеев Ю.С. *Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок* / Ю.С. Елисеев и др. М.: Изд-во МГТУ им. И. Э. Баумана, 2000. 639 с.
- [3] Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок*. М.: Машиностроение, 2008. Т.2. 368 с.
- [4] Гуревич О.С. *Управление авиационными газотурбинными двигателями*. М: Изд-во МАИ, 2001. 100 с.
- [5] Хижняков Ю.Н., Южаков А.А., Сторожев С.А., Никулин В.С. *Селективное управление газотурбинным двигателем* // *Электротехника*. 2020. № 11. С. 18-21.
- [6] Сторожев С.А., Южаков А.А. *Метод переключения регуляторов контуров САУ ГТД* // *Математическое моделирование [Electronic resource]* : II междунар. конф. / Моск. авиац. ин-т. Москва : Перо, 2021. С. 117-118. URL: <https://math.mai.ru/files/abstracts2021.pdf> (дата обращения: 28.08.2021).
- [7] Андриевская Н.В., Андриевский О.А., Кузнецов М.Д., Леготкина Т.С., Никулин В.С., Сторожев С.А., Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. *Нейронечеткое управление выбросами вредных веществ авиационного газотурбинного двигателя* // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2020. Т. 21. № 6. С. 348-355.
- [8] Петунин В.И. *Синтез систем автоматического управления газотурбинными двигателями с селектором каналов* // *Вестник УГАТУ, серия «Управление, вычислительная техника и информатика»*. 2008, Т. 11. № 1 (28). С. 3-10.
- [9] Сторожев С.А., Южаков А.А. *Групповое управление преопределенными объектами нечеткой логики* // *Управление большими системами: труды XVIII Всероссийской школыконференции молодых ученых, 5–8 сентября 2022 г.* Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. С. 186-193. Текст электронный.
- [10] Бреер В.В., Новиков Д.А., Рогаткин А.Д. *Управление толпой: математические модели порогового коллективного поведения*. М.: ЛЕНАНД, 2016. 116 с.
- [11] Андриевский О.А., Андриевская Н.В., Соколов П.В. *Применение моделей коллективного поведения при реализации системы управления газотурбинным двигателем* // *Авиация и космонавтика = Aviation and Cosmonautics (AviaSpace2022) [Electronic resource]* : 21-я Международ. конф., Москва, 21-25 нояб. 2022 г.: тезисы / Моск. авиац. ин-т (нац. исслед. ун-т). - Москва: Изд-во «Перо», 2022. С. 89-90. URL: <https://aik.mai.ru/files/abstracts2022.pdf> (дата обращения: 20.03.2023).