

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 681.51

В. И. ПЕТУНИН, А. И. ФРИД

## МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С СЕЛЕКТОРАМИ

Рассматривается задача управления многомерным объектом с одним управляющим воздействием на режимах селективного выбора каналов системы. Показано, что эффективным средством построения таких логико-динамических систем является применение алгоритмов адаптации. Рассмотрены вопросы синтеза систем управления. Приведены результаты моделирования.

*Ключевые слова:* многомерный объект управления, селектор каналов, система автоматического управления, логико-динамическая система, адаптация.

**Введение.** В системах автоматического управления (САУ) сложных технических объектов, например газотурбинных двигателей (ГТД), в которых число управляющих воздействий меньше числа управляемых величин, для формирования управления часто используются логические элементы — селекторы сигналов, изменяющие структуру системы в зависимости от ее состояния [1, 2]. Обычно применяется принцип селектирования, согласно которому регулируется значение параметра двигателя, наиболее приблизившееся к величине, определяемой программой регулирования. Такое селектирование реализуется с помощью алгебраических селекторов (АС), функции преобразования которых имеют вид:  $U = \min(U_1, U_2, \dots, U_m)$  при ограничении параметров сверху или  $U = \max(U_1, U_2, \dots, U_m)$  при ограничении снизу, где  $U_i$  — входные, а  $U$  — выходной сигналы. Аналогичные задачи могут решаться и в САУ летательными аппаратами, например, для ограничения предельных параметров полета [3].

Такие САУ, использующие логику упорядоченного выбора и имеющие динамическую часть в виде регуляторов и объекта управления, называются логико-динамическими системами [2].

В САУ с алгебраическими селекторами структура и динамические характеристики объекта управления обычно различаются для отдельных каналов. Это приводит к тому, что структура и параметры регуляторов в различных каналах на входе АС будут разными. При этом нарушаются условия переключения каналов, возникают „забросы“ регулируемых величин, ухудшается качество САУ.

Следовательно, возникает необходимость адаптации логико-динамических САУ с АС на режимах переключения каналов к изменениям структуры системы.

**САУ с селектором каналов управления.** В САУ с АС на режимах переключения можно рассматривать работу только двух селектируемых каналов, поэтому рассмотрим САУ с АС двух каналов управления (рис. 1). Важным информативным параметром для АС и, следовательно

для САУ, является разность его входных сигналов, т.е. выходных сигналов селективируемых каналов [2]:

$$\varepsilon = U_1 - U_2,$$

знак которой говорит о включении того или иного канала, а величина  $\varepsilon$  — о близости к моменту селективирования.

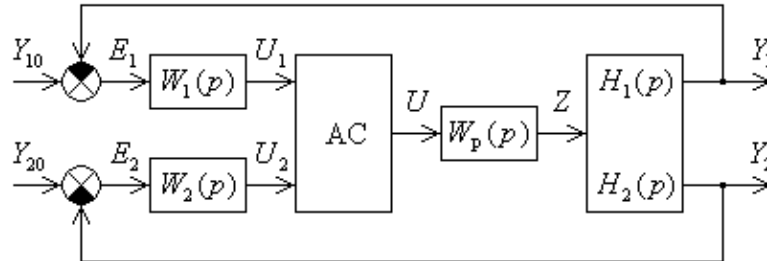


Рис. 1

Рассмотрим САУ ГТД как двумерного объекта с одним управляющим воздействием, в которой используется алгебраический селектор минимального сигнала. Первый канал этой САУ является каналом управления, определяющим режим работы объекта по выходной координате  $Y_1$ , его заданная величина  $Y_{10}$  зависит от времени. Второй канал — канал ограничения, его заданная величина  $Y_{20}$  является постоянной и определяет максимальный режим работы объекта по координате  $Y_2$ . ГТД имеет различные динамические характеристики по разным выходным координатам относительно расхода топлива. Передаточные функции ГТД:

— в первом канале

$$H_1(p) = \frac{Y_1(p)}{Z(p)} = K_1 \frac{A_1(p)}{B(p)};$$

— во втором канале

$$H_2(p) = \frac{Y_2(p)}{Z(p)} = K_2 \frac{A_2(p)}{B(p)},$$

где  $p$  — оператор преобразования Лапласа;  $K_1, K_2$  — коэффициенты передачи;  $A_1(p), A_2(p), B(p)$  — полиномы, зависящие от вида объекта. Примем, что порядок  $A_1(p)$  меньше, чем порядок  $B(p)$ , а порядок  $A_2(p)$  равен порядку  $B(p)$ . Такое математическое описание характерно, например, для динамических характеристик ГТД по частоте вращения ротора  $Y_1 = n$  и температуре газа за турбиной  $Y_2 = T_T^*$  при изменении расхода топлива в камере сгорания  $Z = G_T$ . Здесь звездочка в  $T_T^*$  обозначает температуру полного торможения потока газа.

Передаточная функция изодромного регулятора, общего для обоих каналов,

$$W_p(p) = K_p \frac{T_p p + 1}{p(T_p + 1)}.$$

Передаточные функции регуляторов первого  $W_1(p)$  и второго  $W_2(p)$  каналов выбираются исходя из заданных требований к динамическим характеристикам каждого из них.

Это можно сделать следующим образом. Потребуем, чтобы передаточные функции отдельных разомкнутых каналов без учета запаздывания измерителей координат удовлетворяли равенствам:

$$W_1(p) = W_1(p)W_p(p)H_1(p) = W_{M1}(p); \quad (1)$$

$$W_{II}(p) = W_2(p)W_p(p)H_2(p) = W_{M2}(p), \quad (2)$$

где  $W_{M1}(p)$  и  $W_{M2}(p)$  — передаточные функции эталонных моделей разомкнутых каналов.

Если передаточные функции разомкнутых каналов выбрать в виде

$$W_1(p) = W_{II}(p) = W_M(p), \quad (3)$$

то для получения необходимого качества регулирования выходных координат регуляторы, согласно (1) и (2), должны иметь следующие передаточные функции:

$$W_1(p) = \frac{W_M(p)}{W_p(p)H_1(p)};$$

$$W_2(p) = \frac{W_M(p)}{W_p(p)H_2(p)}.$$

При этом инерционность датчиков должна быть скорректирована так, чтобы измерители параметров были безынерционными.

Следовательно,  $W_1(p) \neq W_2(p)$ , и САУ не сможет обеспечить необходимые динамические характеристики при переключении каналов.

Как было отмечено выше, обычно применяется принцип селективного регулирования, согласно которому регулируется параметр ГТД, наиболее приблизившийся к величине, определяемой программой регулирования. Следовательно, для получения необходимого качества регулирования переключение селектора должно происходить в момент равенства рассогласований между текущими значениями выходных координат и их задающими значениями, т.е. в момент равенства сигналов перед регуляторами  $E_1 = E_2$ . Проведенный анализ показывает, что регулятор температуры газа является инерционным по отношению к регулятору частоты вращения ротора ГТД, поэтому селектор переключается с канала частоты вращения ротора на канал температуры газа с запаздыванием. В результате происходит „заброс“ по температуре газа.

**Задача построения адаптивной САУ с селектором каналов.** Рассматриваемые логико-динамические САУ являются системами с переменной структурой, поэтому решение задачи их адаптации возможно на основе алгоритмов самоорганизации каналов.

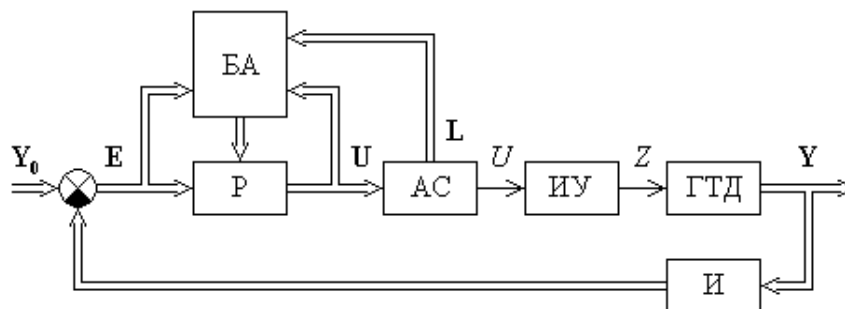


Рис. 2

На рис. 2 приведена обобщенная структурная схема такой системы, где И — измерители выходных координат; Р — регуляторы отдельных каналов управления; БА — блок адаптации; Е — вектор сигналов рассогласования каналов управления; U — вектор входных сигналов АС; U — выходной сигнал АС; L — вектор логического выходного сигнала АС.

При работе логико-динамической САУ ГТД с АС селектор каналов замыкает один из них, оставляя остальные разомкнутыми. Поэтому при работе САУ на режимах ограничения выходных координат задача адаптации системы может быть решена за счет самонастройки разомкнутых каналов и определенного согласования условий переключения. Это позволяет обеспечить необходимые динамические характеристики включаемого канала и качества САУ в целом [2].

Эффективность предложенных алгоритмов подтверждена моделированием рассмотренных САУ ГТД с помощью пакета Simulink системы Matlab.

**Адаптивная САУ двумерного объекта управления.** На рис. 3 представлена структурная схема адаптивной САУ ГТД. В САУ определяется разность сигналов на выходе селекторов минимального и максимального сигналов

$$\varepsilon = U_{\min} - U_{\max} = U_{\text{зам}} - U_{\text{раз}},$$

где  $U_{\text{зам}}$  — выходной сигнал регулятора замкнутого канала;  $U_{\text{раз}}$  — выходной сигнал регулятора разомкнутого канала.

На выходе логического устройства (ЛУ) формируется логический сигнал  $L$ , определяющий замкнутый канал САУ

$$L = \begin{cases} 1 & \text{при } U = U_1; \\ 0 & \text{при } U = U_2. \end{cases}$$

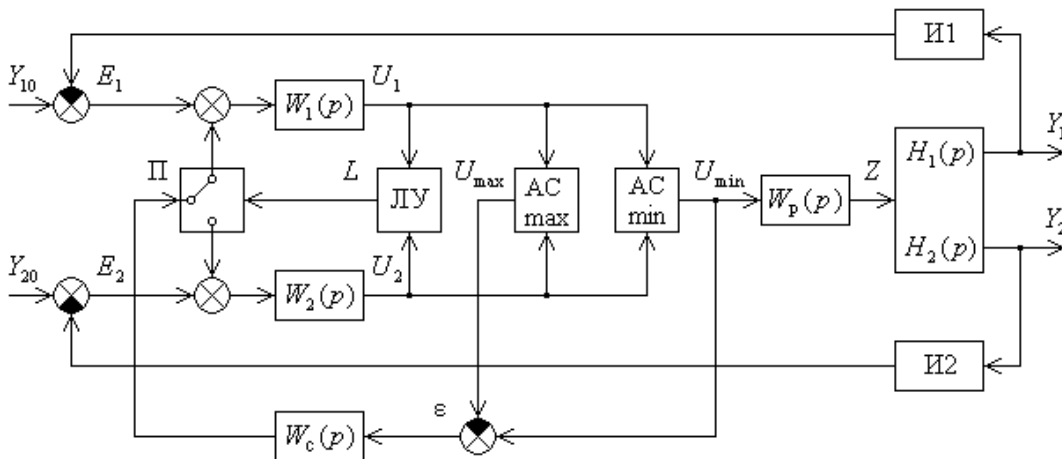


Рис. 3

Сигнал  $\varepsilon$  через блок согласования  $W_c(p)$  и переключатель  $\Pi$  поступает на вход соответствующего регулятора разомкнутого канала с помощью суммирующих элементов, что определяется состоянием переключателя в соответствии с сигналом  $L$  логического устройства. Так как  $\varepsilon < 0$ , то этот сигнал уменьшает задающее воздействие разомкнутого канала и тем самым корректирует момент переключения каналов.

Как было отмечено выше, регуляторы частоты вращения ротора и температуры газа имеют разные динамические характеристики, в результате чего условие переключения селектора минимального сигнала  $U_1 = U_2$  отличается от необходимого условия переключения САУ — равенства рассогласований между текущими значениями выходных координат и их задающими воздействиями  $E_1 = E_2$ .

Следовательно, необходимо согласование этих условий. Как известно [4], согласование поведения отдельных каналов САУ возможно за счет введения контура управления их относительным движением. В данном случае оно обеспечивается за счет введения

контура адаптации — сигнальной самонастройки по разности сигналов  $\varepsilon$  на выходе регуляторов с воздействием на задающее воздействие разомкнутого канала системы. Это позволяет построить САУ ГТД, адаптивную к изменению ее структуры при переключении каналов селектором.

Пусть замкнутым является канал регулирования частоты вращения ротора, т.е. первый канал. Тогда выход контура сигнальной самонастройки включен с помощью первого суммирующего элемента на вход регулятора температуры газа — второго разомкнутого канала.

Сигнал на выходе регулятора частоты вращения ротора

$$U_1 = W_1(p)E_1,$$

сигнал на выходе регулятора температуры газа

$$U_2 = \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_2 + \frac{W_c(p)W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} U_1,$$

тогда разность сигналов на выходе регуляторов

$$\varepsilon = \Delta U = U_1 - U_2 = \frac{W_1(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_1 - \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_2.$$

При  $W_c(p) = K$  и достаточно большой величине  $K$  получаем

$$\varepsilon \rightarrow 0; \quad U_2 \rightarrow U_1,$$

или

$$\begin{aligned} U_1 - U_2 &= \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{W_1(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_1 - \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_2 \cong \\ &\cong m(E_1 - E_2), \end{aligned}$$

где  $m$  мало.

Таким образом, за счет работы контура сигнальной самонастройки момент переключения селектора минимального сигнала  $U_1 = U_2$  приближается к условию переключения каналов по ошибкам каналов  $E_1 = E_2$ . Это позволяет ликвидировать заброс и обеспечить необходимое качество переходного процесса при замыкании и включении в работу регулятора температуры газа.

Аналогичные процессы характерны для САУ и при переключении селектора с замкнутого канала температуры газа на канал частоты вращения ротора.

На рис. 4 приведены результаты моделирования переходных процессов в САУ двухвального ГТД при переключении каналов: *a* — с канала частоты вращения ротора вентилятора на канал температуры газа, *b* — с канала температуры газа на канал частоты вращения ротора вентилятора, с контуром и без контура адаптации, при этом выходные координаты ГТД  $n_v$  и  $T_T^*$  представлены в относительных единицах  $Y = \Delta Y / Y_{\max}$ . Результаты моделирования рассмотренной САУ ГТД при задающих воздействиях каналов  $Y_{\text{упр}0} = 0,25t$ ,  $Y_{\text{отр}0} = 0,8$  и выполнении условия (3) показывают, что при прямом и обратном переключении каналов селектором качество переходных процессов включаемого канала существенно улучшается при введении контура адаптации. САУ сохраняет заданное качество при изменении структуры, т.е. является адаптивной.

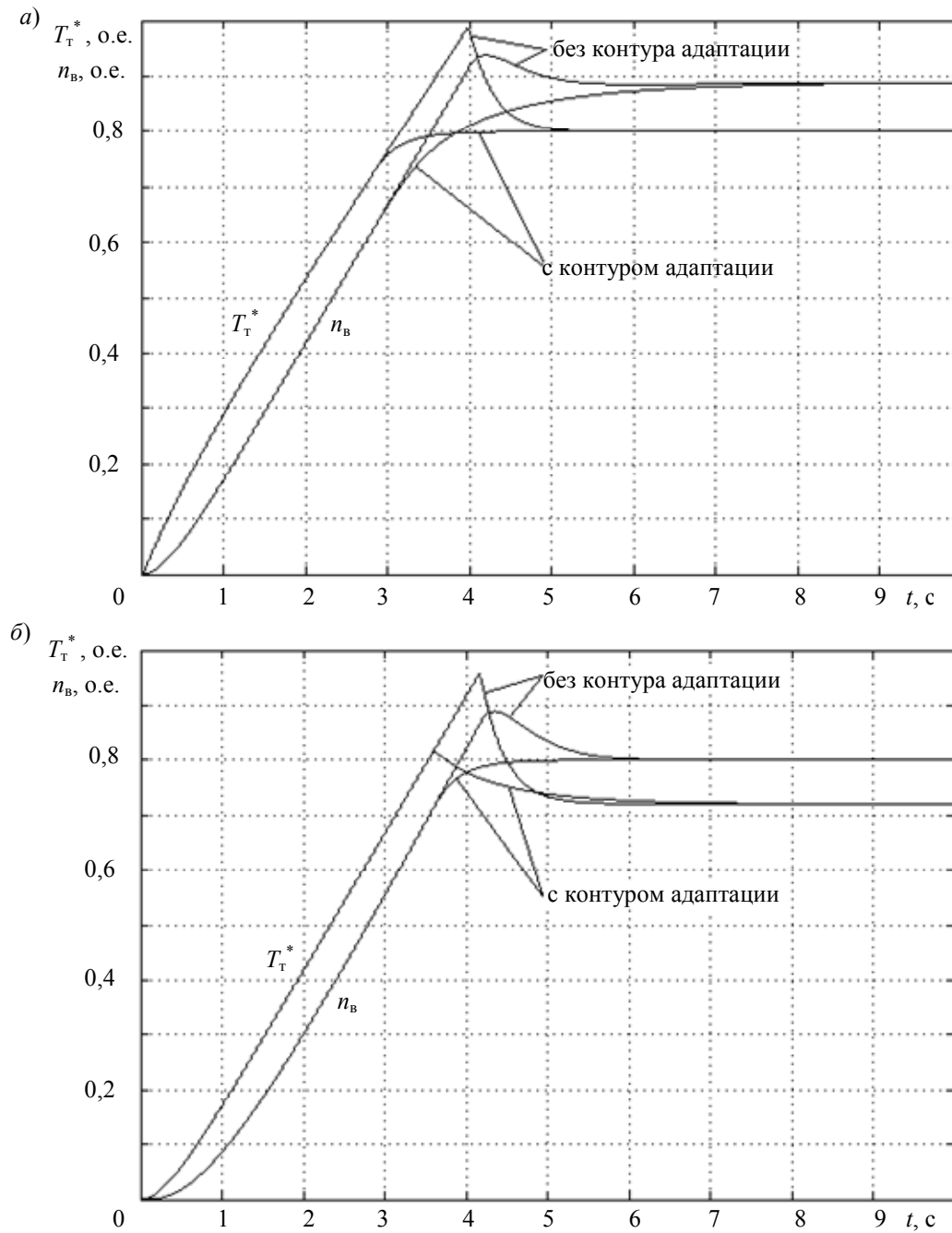


Рис. 4

**Адаптивная САУ многомерного объекта управления.** Аналогичный подход используется при построении адаптивной САУ многомерного объекта управления с одним регулирующим воздействием. На рис. 5 приведена структурная схема адаптивной САУ ГТД, поясняющая данный подход. В каждом канале управления определяется разность сигналов на выходе регуляторов

$$\varepsilon_i = U_{\min} - U_i.$$

Сигнал  $\varepsilon_i$  через блок согласования  $W_c(p)$  поступает на вход соответствующего регулятора канала с помощью суммирующего элемента. Контур сигнальной самонастройки работает во всех  $N$  каналах. Если  $i$ -й канал разомкнут, то  $\varepsilon_i < 0$ , и этот сигнал уменьшает задающее воздействие данного разомкнутого канала, тем самым корректируя момент пере-

ключения каналов; если замкнут, т.е. является ведущим, то  $\varepsilon_i = 0$ , и этот сигнал не меняет задающее воздействие данного замкнутого канала.

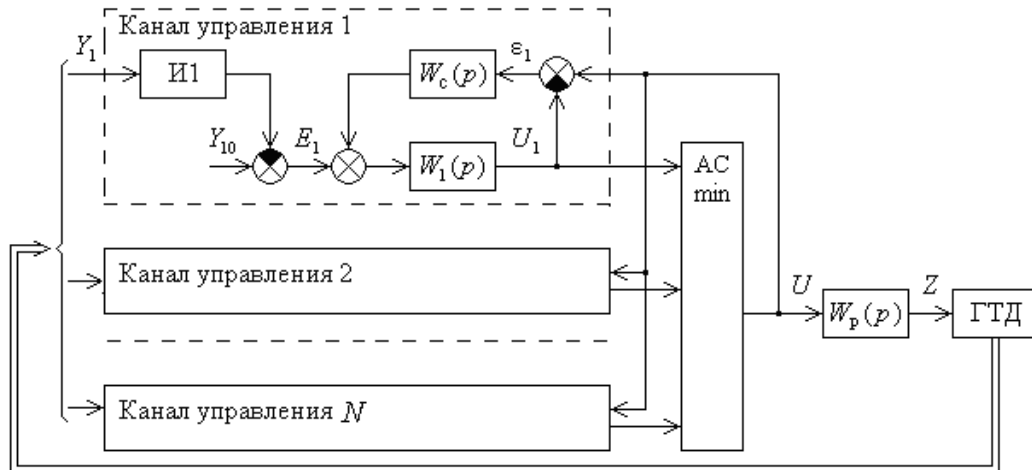


Рис. 5

На рис. 6 приведены результаты моделирования переходных процессов в САУ двухвального ГТД при управлении расходом топлива, при этом выходные координаты ГТД: частота вращения ротора компрессора  $n_k$ , частота вращения ротора вентилятора  $n_b$  и температура газа за турбиной  $T_T^*$  также представлены в относительных единицах. Результаты моделирования рассмотренной САУ ГТД при задающих воздействиях каналов:  $n_{k0} = 0,3t$ ,  $n_{b0} = 0,8$ ,  $T_{T0}^* = 0,8$  и выполнении условия (3) показывают, что за время протекания переходного процесса замкнутым был канал  $n_k$ , затем  $T_T^*$  и в конце —  $n_b$ . Качество переходного процесса включаемого канала существенно улучшается при введении контура адаптации — оно соответствует эталонным процессам отдельных каналов. САУ сохраняет заданное качество при изменении структуры, т.е. является адаптивной.

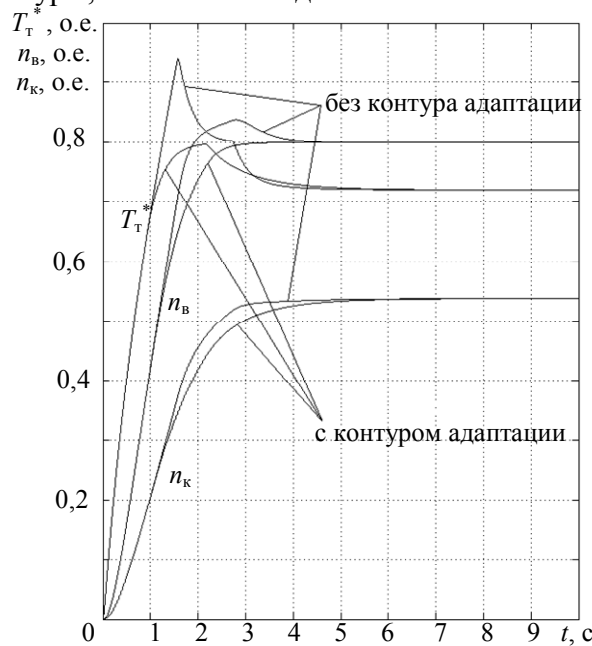


Рис. 6

**Заключение.** Таким образом, применение рассмотренного метода адаптации логико-динамических САУ ГТД с селекторами каналов позволяет существенно улучшить динамические характеристики таких систем управления и тем самым увеличить ресурс работы двигателя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интегральные системы автоматического управления силовыми установками самолетов / Под ред. А. А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1983. 283 с.
2. Петунин В. И. Принципы построения логико-динамических систем автоматического управления газотурбинными двигателями // Вестн. УГАТУ. 2003. Т. 4, № 1. С. 78—87.
3. Петунин В. И. Синтез систем автоматического управления летательными аппаратами с автоматами ограничений предельных параметров // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 10. С. 18—24.
4. Мирошник И. В. Согласованное управление многоканальными системами. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 128 с.

*Сведения об авторах***Валерий Иванович Петунин**

— канд. техн. наук, доцент; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра авиационного приборостроения;  
E-mail: petunin\_vi@mail.ru

**Аркадий Исаакович Фрид**

— д-р техн. наук, профессор; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра вычислительной техники и защиты информации; E-mail: arkfrid@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
авиационного приборостроения

Поступила в редакцию  
04.02.11 г.