

Синтез логико-динамических систем с селектором каналов управления и коррекцией в обратных связях

Рассмотрена задача управления многомерным объектом с одним управляющим воздействием и с селектором каналов. Показано, что эффективным средством построения таких логико-динамических систем является выравнивание динамических характеристик отдельных каналов управления за счет коррекции в обратных связях. Проведен синтез каналов управления расходом топлива газотурбинных двигателей. Приведены результаты моделирования. Показано соответствие полученных результатов характеристикам адаптивной системы.

В.И. ПЕТУНИН,
д-р техн. наук
(УУНУТ, Уфа)
petunin_vi@mail.ru

Газотурбинный двигатель, система автоматического управления, селектор каналов, обратные связи, качество переходных процессов, адаптивная система

Газотурбинные двигатели (ГТД) и современные летательные аппараты являются сложными много-режимными объектами управления, характеризующимися особенностями, определяющими требования к управляющей части системы автоматического управления (САУ) [1, 2]. В большинстве случаев они являются объектами управления, число управляющих воздействий которых меньше числа управляемых координат. В САУ такими многомерными объектами формирование управления часто осуществляется с помощью алгоритмов логического селективного выбора каналов управления. К таким системам относятся, например, САУ подачи топлива в камеры сгорания ГТД [1] или САУ летательного аппарата с ограничением предельных параметров [3]. Обычно применяется принцип селективного выбора, согласно которому регулируется параметр, наиболее приблизившийся к величине, определяемой программой регулирования. Селективный выбор каналов управления реализуется с помощью алгебраических селекторов. Селекторы вводятся в САУ для устранения зоны совместной работы каналов управления и обеспечивают во всех условиях работы управляющее воздействие только одного из нескольких каналов управления, включаемых в работу в зависимости от режима работы объекта управления [4].

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

В САУ с алгебраическим селектором структура и динамические характеристики объекта управления, как правило, отличаются по отдельным каналам, вследствие чего структура и параметры регуляторов в различных каналах на входе алгебраического селектора будут разными. При этом нарушаются условия переключения каналов, возникают забросы регулируемых величин, ухудшается качество САУ.

Следовательно, возникает необходимость адаптации логико-динамических САУ с алгебраическим селектором на режимах переключения каналов к изменениям структуры системы, обеспечению плавности переходных процессов при переключении каналов. Это может быть достигнуто за счет выравнивания отдельных каналов управления после алгебраических селекторов с помощью коррекции в обратных связях и приближения динамических характеристик каналов к эталонной модели. В этом случае происходит плавное переключение селектором одинаковых по динамическим характеристикам каналов управления с требуемыми характеристиками. Известно [2, 5], что проектирование автопилота летательного аппарата осуществляется с использованием последовательных замыканий контура обратной связи.

Целью данной работы является рассмотрение метода синтеза таких систем с селектором каналов управления для ГТД. Эта работа является продолжением статьи [6].

В САУ с алгебраическим селектором коррекция динамических характеристик отдельных каналов системы может быть введена с помощью дополнительных обратных связей, включенных на входе селектора (рис. 1), где K_{pi} – коэффициенты передачи регуляторов; $W_{pi}(p)$ – корректирующие звенья регуляторов, включенных в обратные связи; $W_{ир}(p)$ – изодромный регулятор.

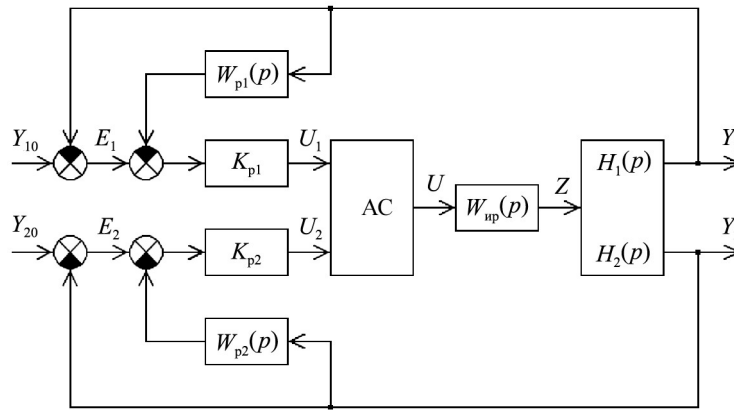


Рис. 1

Рассмотрим синтез отдельных регуляторов такой САУ.

Передаточная функция разомкнутого канала выбирается равной передаточной функции эталонной модели разомкнутой системы

$$W(p) = \frac{Y(p)}{E(p)} = W_m(p). \quad (1)$$

Тогда передаточная функция замкнутого канала

$$\Phi(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)} = \frac{W_m(p)}{1 + W_m(p)} = \Phi_m(p). \quad (2)$$

В соответствии с рис. 1 получаем

$$W(p) = \frac{K_p W_{np}(p) H(p)}{1 + K_p W_{np}(p) H(p) W_p(p)}. \quad (3)$$

Пусть передаточная функция объекта управления

$$H(p) = K_{oy} \frac{A(p)}{B(p)}; \quad K_{oy} K_p = 1. \quad (4)$$

Тогда

$$W(p) = \frac{W_{np}(p) A(p)}{B(p) + W_{np}(p) A(p) W_p(p)} = W_m(p),$$

или

$$W_{np}(p) A(p) = B(p) W_m(p) + W_{np}(p) A(p) W_p(p) W_m(p).$$

В результате синтеза получаем передаточную функцию корректирующего звена регулятора, включенного в обратную связь:

$$W_p(p) = \frac{W_{np}(p) A(p) - B(p) W_m(p)}{W_{np}(p) A(p) W_m(p)}. \quad (5)$$

Так как выделение сигнала рассогласования канала $E = Y_0 - Y$ условно, можно определить общую передаточную функцию обратной связи канала $W_{oc}(p) = W_p(p) + 1$:

$$W_{oc}(p) = \frac{W_{np}(p) A(p) - B(p) W_m(p) + W_{np}(p) A(p) W_m(p)}{W_{np}(p) A(p) W_m(p)}. \quad (6)$$

Пусть передаточная функция изохромного регулятора имеет вид

$$W_{\text{ир}}(p) = K_{\text{ир}} \frac{T_{\text{ир}}p + 1}{p},$$

передаточная функция эталонной модели

$$W_{\text{м}}(p) = \frac{K_{\text{м}}}{p};$$

$$K_{\text{м}} = K_{\text{ир}}.$$

Тогда

$$\Phi_{\text{м}}(p) = \frac{K_{\text{м}}}{p + K_{\text{м}}}.$$

Для одновального ГТД имеем

$$A_1(p) = 1; A_2(p) = T_{\text{оу}2}p + 1; B(p) = T_{\text{оу}}p + 1; T_{\text{ир}} = T_{\text{оу}}.$$

В результате синтеза получаем:

$$W_{\text{р1}}(p) = 0; \quad (7)$$

$$W_{\text{р2}}(p) = \frac{T_{\text{оу}2}p^2}{K_{\text{ир}}(T_{\text{оу}2}p + 1)}; \quad (8)$$

$$W_{\text{оc1}}(p) = 1; \quad (9)$$

$$W_{\text{оc2}}(p) = \frac{T_{\text{оу}2}p^2 + K_{\text{ир}}(T_{\text{оу}2}p + 1)}{K_{\text{ир}}(T_{\text{оу}2}p + 1)}. \quad (10)$$

Для двухвального ГТД имеем:

$$A_1(p) = T_{\text{оу}1}p + 1; A_2(p) = T_{\text{оу}2}''p^2 + T_{\text{оу}2}'p + 1;$$

$$B(p) = (T_{\text{оу}}'p + 1)(T_{\text{оу}}''p + 1); T_{\text{ир}} = T_{\text{оу}}'.$$

В результате синтеза получаем:

$$W_{\text{р1}}(p) = \frac{(T_{\text{оу}1} - T_{\text{оу}}'')p^2}{K_{\text{ир}}(T_{\text{оу}1}p + 1)}; \quad (11)$$

$$W_{\text{р2}}(p) = \frac{T_{\text{оу}2}''p^3 + (T_{\text{оу}2}' - T_{\text{оу}}'')p^2}{K_{\text{ир}}(T_{\text{оу}2}''p^2 + T_{\text{оу}2}'p + 1)}; \quad (12)$$

$$W_{\text{оc1}}(p) = \frac{(T_{\text{оу}1} - T_{\text{оу}}'')p^2 + K_{\text{ир}}(T_{\text{оу}1}p + 1)}{K_{\text{ир}}(T_{\text{оу}1}p + 1)}; \quad (13)$$

$$W_{\text{оc2}}(p) = \frac{T_{\text{оу}2}''p^3 + (T_{\text{оу}2}' - T_{\text{оу}}'')p^2 + K_{\text{ир}}(T_{\text{оу}2}''p^2 + T_{\text{оу}2}'p + 1)}{K_{\text{ир}}(T_{\text{оу}2}''p^2 + T_{\text{оу}2}'p + 1)}. \quad (14)$$

Если передаточная функция эталонной модели равна

$$W_{\text{м}}(p) = \frac{K_{\text{м}}}{p(\tau p + 1)}; K_{\text{м}} = K_{\text{ир}},$$

тогда

$$\Phi_m(p) = \frac{K_m}{\tau p^2 + p + K_m}.$$

Для одновального ГТД в результате синтеза получаем:

$$W_{p1}(p) = 0; \quad (15)$$

$$W_{p2}(p) = \frac{T_{oy2} p^2 (\tau p + 1)}{K_{ир} (T_{oy2} p + 1)}; \quad (16)$$

$$W_{oc1}(p) = 1; \quad (17)$$

$$W_{oc2}(p) = \frac{T_{oy2} p^2 (\tau p + 1) + K_{ир} (T_{oy2} p + 1)}{K_{ир} (T_{oy2} p + 1)}. \quad (18)$$

Для двухвального ГТД в результате синтеза получаем:

$$W_{p1}(p) = \frac{(T_{oy1} - T''_{oy}) p^2 (\tau p + 1)}{K_{ир} (T_{oy1} p + 1)}; \quad (19)$$

$$W_{p2}(p) = \frac{[T''_{oy2} p^3 + (T'_{oy2} - T''_{oy}) p^2] (\tau p + 1)}{K_{ир} (T''_{oy2} p^2 + T'_{oy2} p + 1)}; \quad (20)$$

$$W_{oc1}(p) = \frac{(T_{oy1} - T''_{oy}) p^2 (\tau p + 1) + K_{ир} (T_{oy1} p + 1)}{K_{ир} (T_{oy1} p + 1)}; \quad (21)$$

$$W_{oc2}(p) = \frac{[T''_{oy2} p^3 + (T'_{oy2} - T''_{oy}) p^2] (\tau p + 1) + K_{ир} (T''_{oy2} p^2 + T'_{oy2} p + 1)}{K_{ир} (T''_{oy2} p^2 + T'_{oy2} p + 1)}. \quad (22)$$

Аналогично может быть проведен синтез для большего числа каналов управления, т. е. для многомерной САУ.

Моделирование рассмотренной САУ ГТД проведено помощью пакета Simulink системы MATLAB. Переходные процессы в САУ с алгебраическими селекторами двухвального ГТД для двухмерной системы приведены на рис. 2. Здесь L – логический сигнал, определяющий момент переключения каналов. Результаты моделирования получены при переключении с канала частоты вращения на канал температуры газа $Y_{10} = 0,3t$; $Y_{20} = 0,8$ (рис. 2, а) и с канала температуры газа на канал частоты вращения $Y_{20} = 0,3t$; $Y_{10} = 0,8$ (рис. 2, б).

Результаты моделирования трехмерной САУ ГТД ($Y_{10} = 0,3t$; $Y_{20} = 0,8$; $Y_{30} = 0,8$) приведены на рис. 3.

Вертикальными линиями на рис. 2 обозначено приближение условия $U_1 = U_2$ к условию $E_1 = E_2$. Ступенчатые сигналы на рис. 3 определяют время работы отдельных каналов. Все переменные приведены в относительных единицах. Необходимо отметить хорошее качество переходных процессов при переключении каналов – плавность процессов и достаточное быстроедействие.

В САУ с обратными связями происходит выравнивание передаточных функций каналов с выхода селектора до выходов каналов, т. е селектирование одинаковых по динамике каналов. Это характерно для ГТД, когда передаточные функции каналов имеют одинаковые знаменатели и разные числители.

При выравнивании динамических характеристик каналов в САУ с селектором каналов и с обратными связями перерегулирования при переключении каналов не возникает.

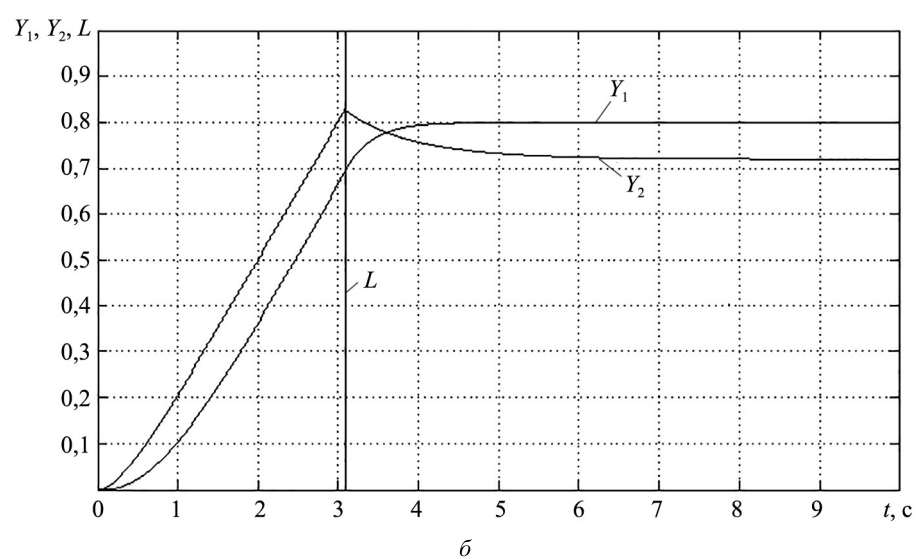
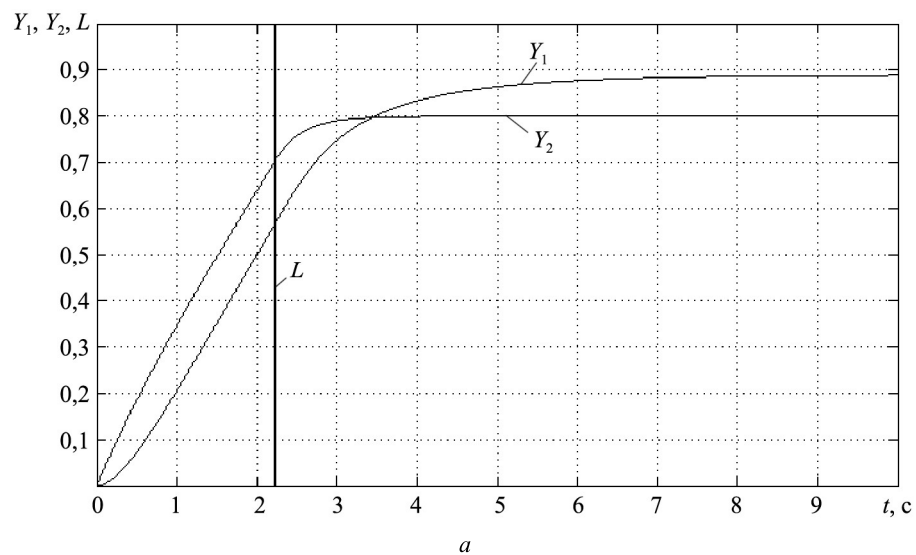


Рис. 2

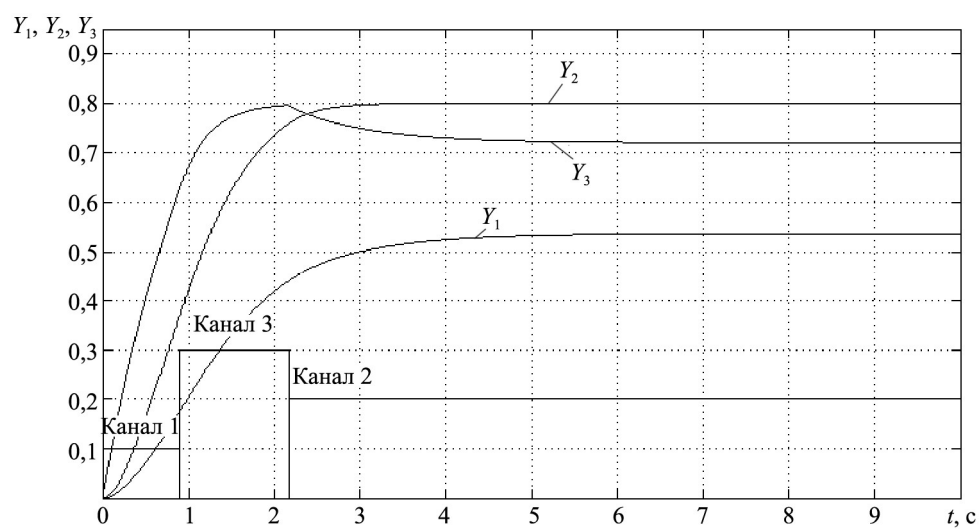


Рис. 3

САУ с обратными связями можно сопоставить с САУ, в которой есть адаптация каналов управления [6].

На рис. 4 показана структурная схема адаптивной САУ ГТД, поясняющая данный способ [6].

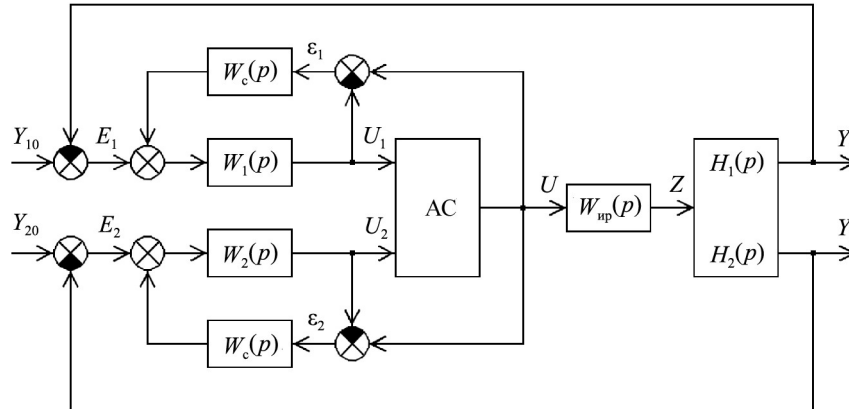


Рис. 4

Как было отмечено, регуляторы частоты вращения ротора и температуры газа имеют разные динамические характеристики, в результате чего условие переключения селектора минимального сигнала

$$U_1 = U_2 \quad (23)$$

отличается от необходимого условия переключения САУ – равенства рассогласований между текущими значениями выходных координат и их задающими воздействиями:

$$E_1 = E_2. \quad (24)$$

Следовательно, необходимо согласование этих условий. В данном случае оно обеспечивается за счет введения контура адаптации – сигнальной самонастройки по разности сигналов ε 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 [6].

В каждом канале управления определяется разность сигналов на выходе регуляторов

$$\varepsilon_i = U_{\min} - U_i. \quad (25)$$

Сигнал ε_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 и тем самым корректирует момент переключения каналов. Если i -й канал замкнут, т. е. является ведущим, то $\varepsilon_i = 0$, и этот сигнал не меняет задающее воздействие данного замкнутого канала.

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

$$U_1 = W_1(p)E_1. \quad (26)$$

Сигнал на выходе регулятора температуры газа

$$U_2 = \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)}E_2 + \frac{W_c(p)W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)}U_1. \quad (27)$$

Тогда разность сигналов на выходе регуляторов

$$\varepsilon = \Delta U = U_1 - U_2 = \frac{W_1(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)}E_1 - \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)}E_2. \quad (28)$$

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

$$\varepsilon = U_1 - U_2 = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{W_1(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_1 - \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_2 = 0. \quad (29)$$

Следовательно, при $\varepsilon \rightarrow 0$ получено $U_2 \rightarrow U_1$.

Таким образом, за счет работы контура сигнальной самонастройки сигнал на выходе разомкнутого канала U_2 приближается к сигналу замкнутого канала U_1 , и происходит своевременное переключение селектора минимального сигнала. Это, соответственно, позволяет ликвидировать заброс и обеспечить необходимое качество переходного процесса при замыкании и включении в работу регулятора температуры газа.

Результаты моделирования переходных процессов в САУ двухвального ГТД (см. рис. 4) при управлении расходом топлива соответствуют данным рис. 2; $W_c(p) = K = 100$.

На данную САУ получен патент [7].

Вопросы помехоустойчивости САУ ГТД к воздействию случайных и ступенчатых возмущений, обусловленных изменением расхода топлива, рассмотрены в статье [8].

Аналогичные исследования САУ ГТД проводятся в работах [9, 10].

Таким образом, заданные свойства САУ с селектором каналов управления обеспечиваются за счет приближения их динамических характеристик к характеристикам эталонной модели с помощью обратных связей.

Синтезированы два варианта структурных схем логико-динамических САУ с селектором каналов, обеспечивающие качественное управление многомерным объектом управления, причем число каналов управления ГТД может быть больше двух.

Использование разных подходов к синтезу логико-динамической САУ многомерного объекта приводит к одинаковым результатам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы автоматического управления авиационными ГТД: Энциклопедический справочник / Под ред. О.С. Гуревича. М.: Торус Пресс, 2011. 208 с.
2. Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Чикулаев М.С. Системы автоматического управления самолетом. М.: Машиностроение, 1987. 240.
3. Петунин В.И. Синтез систем автоматического управления летательными аппаратами с автоматами ограничений предельных параметров // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. № 10. С. 18–24.
4. Петунин В.И. Логико-динамические системы с селективным выбором каналов управления авиационными объектами. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 292 с.
5. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М.: Техносфера, 2015. 312 с.
6. Петунин В.И. Методы согласования и адаптации систем автоматического управления газотурбинными двигателями с селекторами каналов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 2. С. 59–66.
7. Способ управления многомерным объектом: пат. 2446299 Рос. Федерация, № 2010147794/06; заявл. 23.11.2010; опубл. 27.03.2012.
8. Петунин В.И. Повышение помехоустойчивости систем автоматического управления газотурбинными двигателями с помощью компенсатора возмущений // Авиакосмическое приборостроение. 2021. № 11. С. 37–45.
9. Ефанов В.Н., Иванова Н.С. Экспертная система оценки технического состояния газотурбинных двигателей с использованием базы знаний темпоральных прецедентов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 1. С. 61–68.
10. Иноземцев А.А. и др. Алгоритмический метод повышения отказоустойчивости системы автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 2. С. 179–183.

Поступила в редакцию 7.04.25

После доработки 10.04.25

Принята к публикации 11.04.25

Synthesis of Logical-Dynamic Systems with a Control Channel Selector and Feedback Correction

V.I. PETUNIN

UUST, Ufa

The problem of controlling a multidimensional object with one control action and a channel selector is considered. It is shown that an effective means of constructing such logical-dynamic systems is the alignment of the dynamic characteristics of individual control channels due to feedback correction. The synthesis of fuel consumption control channels for gas turbine engines is carried out. The simulation results are presented. The correspondence of the results obtained to the characteristics of the adaptive system is shown.

Gas turbine engine, automatic control system, channel selector, feedback, quality of transient processes, adaptive system