

УДК 681.51:621.452

В. И. ПЕТУНИН

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С СЕЛЕКТОРОМ КАНАЛОВ

Рассматриваются особенности синтеза многосвязных систем автоматического управления с селектором каналов для газотурбинных двигателей. Отмечено влияние режима переключения каналов на динамические характеристики многосвязной системы. Разработан метод обеспечения требуемых динамических характеристик системы для случая автономности по задающим сигналам. Приведены результаты моделирования. *Синтез; многосвязная система автоматического управления; автономность каналов; газотурбинный двигатель; селектор; передаточная функция; переключение; условие автономности; переходный процесс; модель*

Современные авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) являются сложными объектами управления. В многосвязных системах автоматического управления (САУ) такими объектами с числом управляющих воздействий, меньшим числа управляемых координат, формирование управления часто осуществляется с помощью селекторов [1]. Обычно применяется принцип селектирования, согласно которому регулируется параметр двигателя, наиболее приблизившийся к величине, определяемой программой регулирования. Такое селектирование реализуется с помощью алгебраических селекторов (АС).

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. При этом каждый из каналов управления работает автономно и его параметры обычно выбираются без учета взаимодействия с другими каналами. Это позволяет сохранить статическую точность и запасы устойчивости, свойственные автономным каналам управления.

Однако это справедливо лишь для статических режимов работы системы управления. Взаимодействие каналов сохраняется на переходных режимах и при действии возмущений.

Наличие селектора в многосвязной САУ делает всю систему нелинейной и обуславливает ее как систему с переменной структурой.

Это существенно усложняет задачу синтеза таких систем и обеспечение их динамических характеристик.

В работе представлены некоторые результаты анализа и синтеза многосвязных САУ ГТД с АС относительно режима переключения каналов.

1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МНОГОСВЯЗНОЙ САУ

Структурная схема многосвязной САУ ГТД с селектором каналов приведена на рис. 1, где АС — алгебраический селектор минимального сигнала, U — сигнальный выход АС, L — логический выход АС, определяющий номер включаемого канала; $W_i(p)$ — передаточные функции регуляторов отдельных каналов; $W_{pi}(p)$ — передаточные функции общих регуляторов; $H(p)$ — передаточная матрица ГТД.

В дальнейшем будем рассматривать САУ с двумя селектируемыми каналами, тогда $U = \min\{E_1, E_2\}$, где $E_i = Y_{0i} - Y_i$, а L принимает значение 0 или 1.

В САУ ГТД с АС структура и динамические характеристики объекта управления могут быть различными по отдельным координатам, следовательно, и корректирующие звенья в каналах управления этими координатами также будут разными. Передаточные функции корректирующих звеньев первого — $W_1(p)$ и второго — $W_2(p)$ каналов в контуре управления расходом топлива $Z_1 = G_T$, а также регулятора в контуре управления реактив-

ного сопла $Z_2 = F_c$ выбираются исходя из заданных требований к динамическим характеристикам каждого из них.

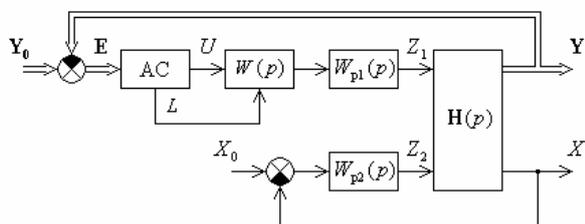


Рис. 1. Структурная схема многосвязной САУ ГТД с АС

Согласно первой статье «Синтез САУ ГТД с селектором каналов» для отдельных каналов управления передаточная функция замкнутого канала

$$\Phi(p) = \frac{W_{yy}(p)H_{гтд}(p)}{1 + W_{yy}(p)H_{гтд}(p)W_{iy}(p)}, \quad (1)$$

где $H_{гтд}(p)$ — передаточная функция ГТД по данному каналу; $W_{yy}(p)$ — передаточная функция управляющего устройства; $W_{iy}(p)$ — передаточная функция измерительного устройства.

Приравняем передаточную функцию замкнутой системы к передаточной функции желаемой системы $\Phi^*(p)$:

$$\Phi(p) = \Phi^*(p). \quad (2)$$

Тогда при $W_{iy}(p) = 1$ получаем следующее выражение передаточной функции управляющего устройства (УУ) для данного канала

$$W_{yy}(p) = \frac{1}{H_{гтд}(p)} \cdot \frac{\Phi^*(p)}{1 - \Phi^*(p)}, \quad (3)$$

где $\frac{1}{H_{гтд}(p)}$ — обратная передаточная функция объекта управления;

$\frac{\Phi^*(p)}{1 - \Phi^*(p)}$ — желаемая передаточная функция разомкнутой системы.

Для одного канала управления передаточная функция ГТД

$$H_{гтд}(p) = k_{гтд} \frac{A(p)}{B(p)}.$$

Если желаемая передаточная функция разомкнутой системы $W^*(p)$

$$W^*(p) = \frac{\Phi^*(p)}{1 - \Phi^*(p)} = \frac{k}{pC(p)}, \quad (4)$$

где $\frac{k}{p}$ — определяет астатизм системы, а $\frac{1}{C(p)}$ — ее инерционность, то передаточная функция устройства управления

$$W_{yy}(p) = \frac{1}{k_{гтд}} \cdot \frac{B(p)}{A(p)} \cdot \frac{k}{pC(p)}. \quad (5)$$

Причем в контуре управления САУ с селектором каналов обычно реализуется общий изодромный регулятор и регуляторы отдельных каналов.

Таким образом, динамические характеристики управляющих устройств каналов зависят от передаточных функций ГТД.

2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА СИНТЕЗА АВТОНОМНОЙ МНОГОСВЯЗНОЙ САУ

В многосвязной САУ с селектором каналов, включенным в один из контуров управления (рис. 1), возникает несколько многосвязных систем, работающих в разные моменты времени. Число таких систем определяется числом селектируемых каналов. Очевидно, что при синтезе таких многосвязных систем с целью получения требуемых показателей качества необходимо вводить перекрестные связи между регуляторами отдельных каналов.

Синтез многосвязной САУ для случая двумерного объекта управления (рис. 2) рассмотрен в работе [2].

Здесь $K_{12}(p)$ и $K_{21}(p)$ — передаточные функции перекрестных связей.

Условия автономности данной САУ по задающим сигналам обеспечиваются при выполнении следующих условий [2]:

$$K_{12}(p) = -\frac{W_{p2}(p)H_{12}(p)}{H_{11}(p)W_{p1}(p)}; \quad (6)$$

$$K_{21}(p) = -\frac{W_{p1}(p)H_{21}(p)}{H_{22}(p)W_{p2}(p)}. \quad (7)$$

Таким образом, структура и параметры перекрестных связей $K_{12}(p)$ и $K_{21}(p)$ зависят от вида многосвязной системы, возникающей при переключении каналов, и от характеристик объекта управления.

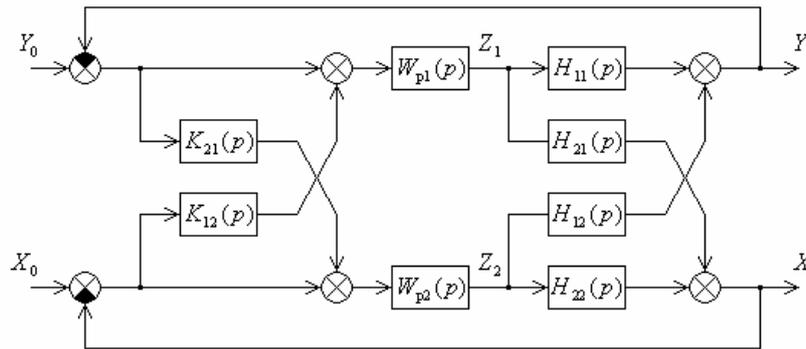


Рис. 2. Структурная схема автономной многосвязной САУ

3. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СЕЛЕКТОРА НА КАЧЕСТВО САУ

При включении корректирующих звеньев регуляторов отдельных каналов в САУ после селектора входными сигналами АС являются сигналы рассогласований каналов, что является необходимым условием определения момента переключения каналов. Однако проведенный анализ показывает, что корректирующие звенья в общем случае получают разными и, следовательно, необходима коммутация этих звеньев в момент селектирования (рис. 1). При этом происходит сигнальное возмущение САУ [3, 4].

Пусть корректирующее звено $W_1(p)$ канала управления САУ включено постоянно, а корректирующее звено $W_2(p)$ реализуется при включении канала ограничения параллельным подключением к $W_1(p)$ разностного динамического звена с передаточной функцией

$$W_{\Delta}(p) = W_1(p) - W_2(p)$$

по выходному логическому сигналу селектора L (рис. 3), где $L = 0$ при работе канала управления и $L = 1$ при работе канала ограничения; Кл — ключ.

Таким образом, при селектировании происходит структурное изменение корректирующего звена системы, которое приводит к появлению импульсного сигнального возмущения САУ выходным сигналом разностного динамического звена $W_{\Delta}(p)$, равного $D(t_{\text{сел}}) = D(t)$ в момент селектирования каналов и зависящего от динамических характеристик объекта управления. Это вызывает скачок по ограничиваемой координате Y_2 или режим обратного переключения каналов, что существенно ухудшает качество работы канала ограничения. Следовательно, необходима компенсация динамической погрешности САУ с АС в момент селектирования.

Компенсация сигнального возмущения САУ сводится к измерению возмущения $D(t_{\text{сел}}) = D(t)$ и его компенсации на основе методов теории инвариантности [4, 5].

По сигналу дифференцирующего устройства (ДУ) определяется величина импульсного возмущения, которая запоминается в запоминающем устройстве (ЗУ), и формируется ступенчатый сигнал (рис. 3). Этот сигнал пропускается через изодромное звено (ИЗ) с передаточной функцией

$$W_{\text{из}}(p) = \frac{T_p}{T_p + 1}, \quad (8)$$

вследствие чего формируется импульсный компенсирующий сигнал, равный импульсному возмущению и воздействующий на систему. Таким образом, данная система получается инвариантной к структурному возмущению, связанному с переключением каналов.

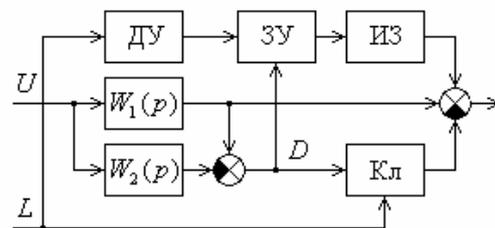
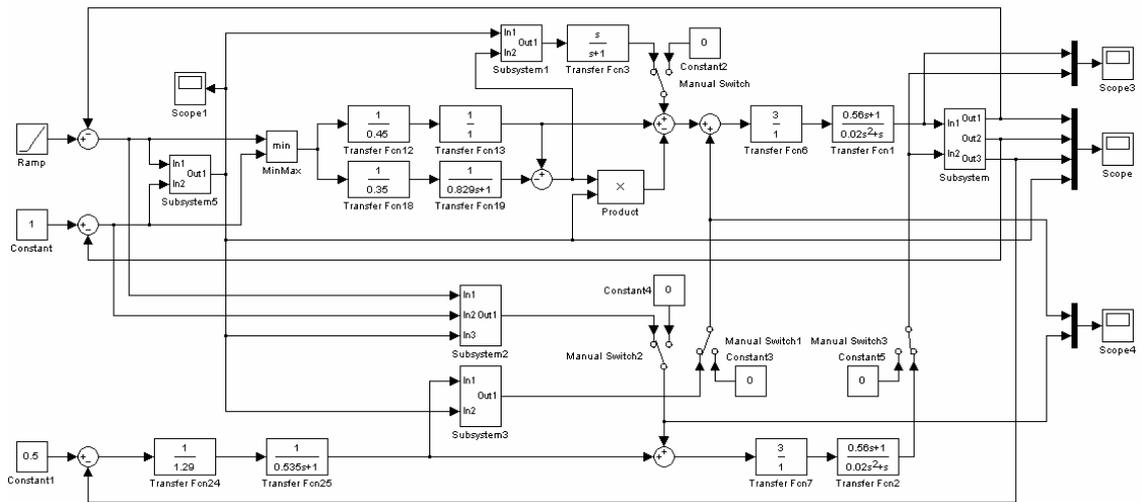


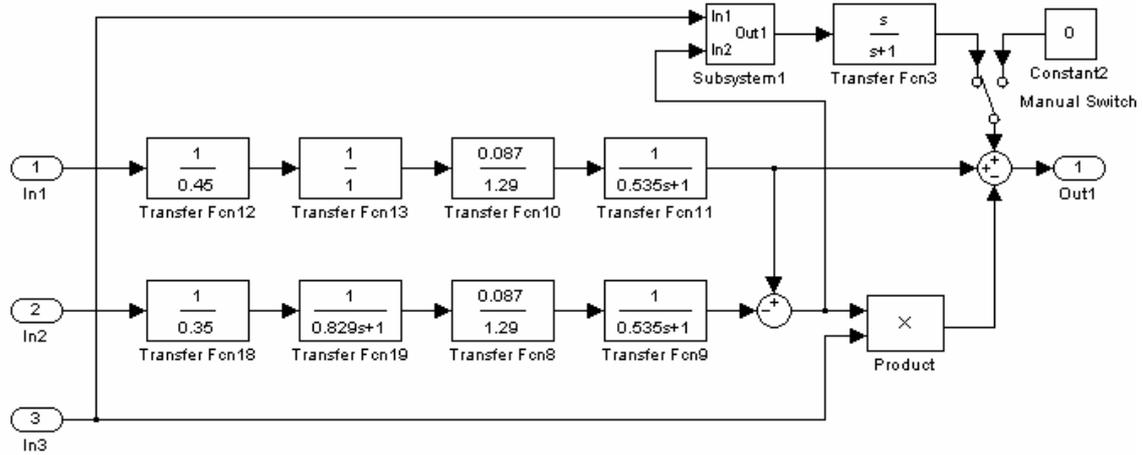
Рис. 3. Схема компенсации сигнальных возмущений при переключении корректирующих звеньев

4. КОМПЕНСАЦИЯ СИГНАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ. ИНВАРИАНТНОСТЬ МНОГОСВЯЗНОЙ САУ К ИЗМЕНЕНИЮ СТРУКТУРЫ

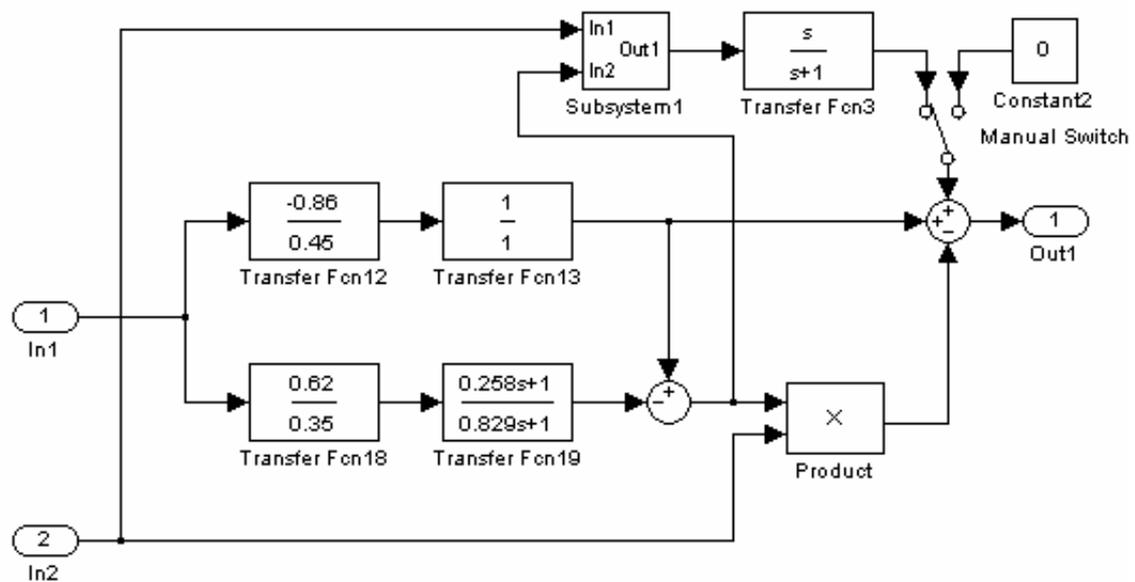
Взаимодействие регуляторов, действующих на разные регулирующие воздействия ГТД, рассмотрено в работе [1].



a



б



в

Рис. 4. Схемы моделирования: а) – многосвязной САУ ГТД с АС; б) – subsystem2; в) – subsystem3

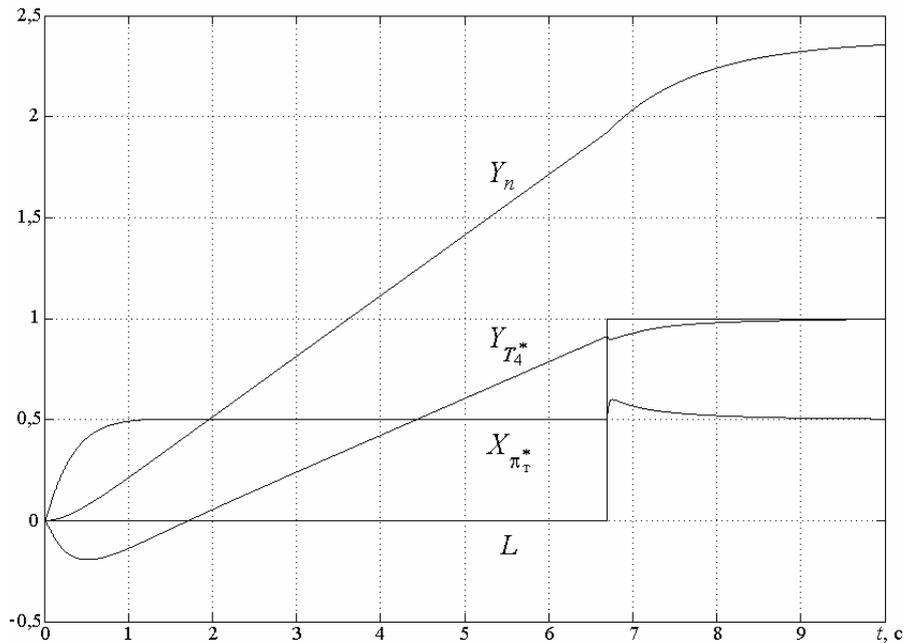


Рис. 5. Переходные процессы в многосвязной САУ ГТД без компенсации сигнальных возмущений в перекрестных связях

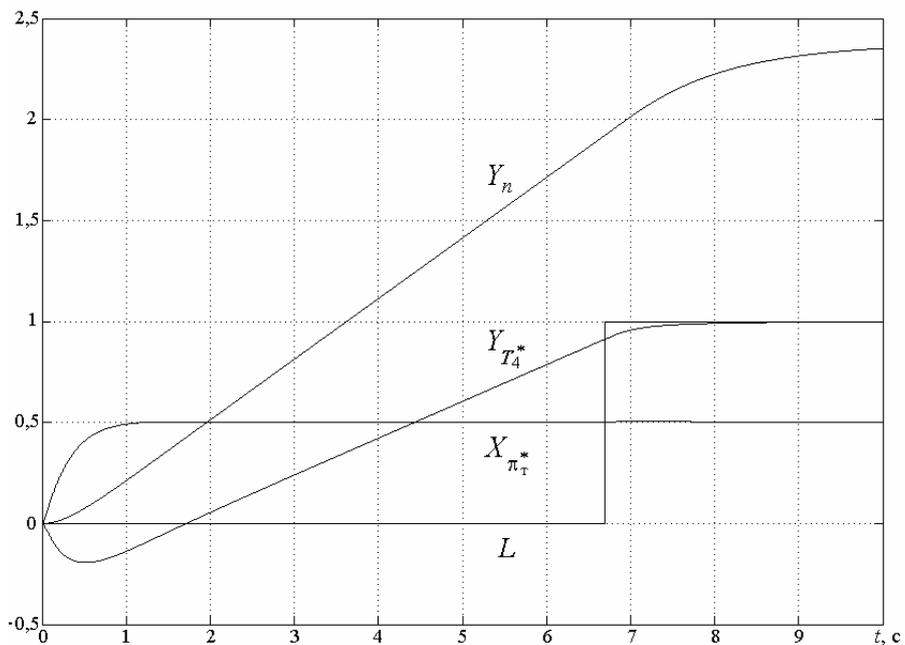


Рис. 6. Переходные процессы в многосвязной САУ ГТД с компенсацией сигнальных возмущений в перекрестных связях

Показано, что, так как регуляторы частоты вращения и температуры газа могут только поочередно работать с регулятором, управляющим площадью сечения сопла, необходимо рассматривать динамические характеристики САУ для каждой из возможных пар регуляторов. Отмечено, что для получения хороших динамических характеристик рассматриваемых систем целесообразно изменять параметры регулятора, управляющего площадью

сопла, при переключении каналов управления расходом топлива.

Анализ динамических характеристик многосвязной САУ с селектором каналов, проведенный в настоящей работе, показывает, что при переключении каналов необходимо переключение перекрестных связей каналов. Однако при этом происходит структурное и параметрическое возмущение САУ. Это возмущение, как и в случае САУ с одним управля-

ющим воздействием [4, 5], может быть устранено путем построения инвариантной многосвязной САУ. В этом случае в каждой перекрестной связи должно происходить переключение динамических звеньев согласно рис. 3.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ

Рассмотрим пример исследования динамических характеристик многосвязной САУ с селектором каналов для одновального ГТД. При этом в контур дозирования топлива включены канал управления частотой вращения ротора n и канал ограничения температуры газа T_4^* , взаимодействующие через алгебраический селектор минимального сигнала, а в контуре управления площадью сечения реактивного сопла — регулятор степени расширения газа на турбине π_T^* .

Уравнения движения одновального ГТД с регулируемым соплом [6]:

$$\begin{aligned} (0,56p + 1)X_n &= 0,45X_{G_T} + 0,86X_{F_c}; \\ (0,56p + 1)X_{T_4^*} &= \\ &= (0,29p + 0,35)X_{G_T} - (0,16p + 0,62)X_{F_c}; \\ (0,56p + 1)X_{\pi_T^*} &= \\ &= -0,087X_{G_T} + (0,69p + 1,29)X_{F_c}. \end{aligned}$$

Тогда передаточная матрица ГТД:

$$H(p) = \frac{1}{0,56p + 1} \times \begin{bmatrix} 0,45 & 0,86 \\ 0,29p + 0,35 & -(0,16p + 0,62) \\ -0,087 & 0,69p + 1,29 \end{bmatrix}.$$

Передаточные функции издромных регуляторов по контурам управления расходом топлива и площади сечения реактивного сопла:

$$W_{\text{вр}}(p) = 3 \cdot \frac{0,56p + 1}{p(0,02p + 1)}.$$

Тогда передаточные функции отдельных регуляторов:

- по частоте вращения ротора

$$W_n(p) = 2,222;$$

- по температуре газа

$$W_{T_4^*} = \frac{2,857}{0,829p + 1};$$

- по степени расширения газа на турбине

$$W_{\pi_T^*}(p) = \frac{0,775}{0,535p + 1}.$$

В соответствии с выражениями (6) и (7) получаем следующие передаточные функции перекрестных связей САУ (рис. 2) для условия автономности отдельных каналов:

$$\begin{aligned} K_{12n} &= -\frac{0,775}{0,535p + 1} \cdot \frac{0,86}{0,45} \cdot \frac{1}{2,222}; \\ K_{12T_4^*} &= \frac{0,775}{0,535p + 1} \cdot \frac{0,16p + 0,62}{0,35} \cdot \frac{1}{2,857}; \\ K_{21n} &= \frac{2,222}{1} \cdot \frac{0,087}{1,29} \cdot \frac{1}{0,775}; \\ K_{21T_4^*} &= \frac{2,857}{0,829p + 1} \cdot \frac{0,087}{1,29} \cdot \frac{1}{0,775}. \end{aligned}$$

Тогда передаточные функции перекрестных связей при моделировании с учетом переноса их точек входа и выхода:

$$\begin{aligned} K_{12n \text{ мод}} &= -\frac{0,86}{0,45}; \\ K_{12T_4^* \text{ мод}} &= \frac{0,16p + 0,62}{0,35} \cdot \frac{1}{0,829p + 1}; \\ K_{21n \text{ мод}} &= \frac{2,222}{1} \cdot \frac{0,087}{1,29} \cdot \frac{1}{0,535p + 1}; \\ K_{21T_4^* \text{ мод}} &= \frac{2,857}{0,829p + 1} \cdot \frac{0,087}{1,29} \cdot \frac{1}{0,535p + 1}. \end{aligned}$$

Цифровое моделирование переходных процессов, происходящих в многосвязной САУ, соответствующей рис. 1 и рис. 2, производится с использованием пакета Simulink системы MATLAB. Схема моделирования приведена на рис. 4. Входными сигналами САУ являются линейно-нарастающий сигнал в канале частоты вращения $Y_{10} = Y_{n0}$ и постоянные сигналы в канале температуры газа $Y_{20} = Y_{T_4^*0}$ и канале управления площадью сечения сопла $X_0 = X_{\pi_T^*0}$. При этом моделируется переходный процесс переключения с канала управления по частоте вращения на канал ограничения по температуре газа.

Результаты моделирования переходных процессов в рассмотренной САУ ГТД с селектором каналов приведены на рис. 5 и 6.

Как видно из рис. 5, при переключении каналов с помощью алгебраического селектора минимального сигнала и при переключении перекрестных связей в многосвязной системе без использования рассмотренной компенсации (рис. 3), происходит сигнальное возмущение САУ по выходным координатам.

Эти возмущения устраняются при использовании компенсации сигнальных возмущений в перекрестных связях (рис. 6). В этом случае обеспечивается монотонность протекания переходных процессов при переключении каналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены принципы построения многосвязных САУ ГТД с АС. Показано, что переключение каналов с помощью селектора вызывает изменение структуры многосвязной САУ, при котором происходит снижение динамической точности. Разработан метод синтеза многосвязных САУ ГТД с АС, использование которого позволяет обеспечить заданное качество переходных процессов на режимах переключения каналов.

Предложенные принципы построения многосвязных логико-динамических систем могут быть использованы специалистами при разработке новых высокоэффективных САУ ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Интегральные** системы автоматического управления силовыми установками самолетов / под ред. А. А. Шевякова. М. : Машиностроение, 1983. 283 с.
2. **Морозовский, В. Т.** Многосвязные системы автоматического управления / В. Т. Морозовский. М. : Энергия, 1970. 288 с.
3. **Петунин, В. И.** Принципы построения логико-динамических систем автоматического управления газотурбинными двигателями / В. И. Петунин // Вестник УГАТУ. 2003. Т. 4, № 1. С. 78–87.
4. **Петунин, В. И.** Об инвариантности САУ ГТД с селектором каналов к изменению структуры / В. И. Петунин, С. Т. Кадырова // Вычислительная техника и новые информационные технологии : межвуз. науч. сб. 2007. № 6. С. 48–55.
5. **Петунин, В. И.** Патент РФ № 2319026 на изобретение: МПК 8 F02C 9/28. Система автоматического регулирования газотурбинного двигателя / В. И. Петунин, А. И. Фрид, С. Т. Кадырова. Заявка № 2006125865/06; Заявл. 17.07.2006; Зарегистр. в Гос. реестре изобретений РФ 10.03.2008. Бюл. № 7.
6. **Шевяков, А. А.** Автоматика авиационных и ракетных силовых установок / А. А. Шевяков. М. : Машиностроение, 1970. 660 с.

ОБ АВТОРЕ



Петунин Валерий Иванович, доц. каф. авиац. приборостроения. Дипл. инж.-электромех. по авиац. приборостроению (УГАТУ, 1970). Канд. техн. наук по сист. обработки инф. и управления (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. систем авт. управления ГТД, логико-дин. систем, адапт. и интел. систем.