

УДК 681.51:621.452

В. И. ПЕТУНИН

## СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С СЕЛЕКТОРОМ КАНАЛОВ

Рассматриваются особенности синтеза систем автоматического управления с селектором каналов для газотурбинных двигателей. Показано влияние динамических характеристик объекта управления на режимы переключения таких систем. Разработаны методы обеспечения требуемых динамических характеристик систем управления при переключении каналов. Приведены результаты моделирования. *Синтез; система автоматического управления; газотурбинный двигатель; селектор; канал управления; канал ограничения; передаточная функция; переключение; переходный процесс; модель*

### СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ САУ ГТД С СЕЛЕКТОРОМ КАНАЛОВ

К системам автоматического управления (САУ) газотурбинными двигателями (ГТД), реализующим заданные законы управления, предъявляются достаточно жесткие требования как в отношении допустимых отклонений параметров на установившихся режимах работы, так и в отношении динамических погрешностей при переходных процессах.

В основном требования к регулированию газотурбинных двигателей сводятся к следующему:

1) заданная частота вращения турбокомпрессора на основных эксплуатационных режимах должна поддерживаться с максимально возможной точностью и в любом случае с погрешностью менее 0,3%;

2) заданная температура газа на максимальном режиме работы двигателя должна поддерживаться с максимально возможной точностью с допуском менее 0,5%;

3) при приемистости необходимо обеспечивать переход двигателя с режима малого газа до максимального режима за время  $\leq 5$  с;

4) перерегулирование в переходном процессе, вызванное возможными возмущениями, на максимальном режиме работы двигателя не должно приводить к отклонению регулируемого параметра более чем на 2,5% от его текущего значения;

5) время переходных процессов должно быть не более 2... 3 с.

Наличие алгебраического селектора (АС) в многосвязных САУ ГТД с селектированием каналов обуславливает определенные особенности таких систем и дополнительные требования к отдельным каналам и к САУ в целом [1]. Характерным режимом таких систем является режим переключения каналов. Обычно применяется принцип селектирования, согласно которому регулируется параметр двигателя, наиболее приблизившийся к величине, определяемой программой регулирования. Следовательно, в САУ ГТД с АС условия переключения каналов необходимо увязывать с заданным качеством переходных процессов по выходным координатам объекта управления и с динамическими характеристиками отдельных каналов.

Для обеспечения устойчивости и помехозащищенности режима переключения каналов, а также отсутствия скачков при переключениях необходимы одинаковые динамические характеристики каналов. При этом каждый канал в отдельности должен обладать требуемыми показателями качества.

Для обеспечения заданного качества переходных процессов в ограничителях координат ГТД необходимо выдерживание требуемого момента селектирования при включении корректирующих звеньев каналов до АС и компенсации сигнальных возмущений при переключении каналов в САУ с корректирующими звеньями после АС.

Для выдерживания необходимых условий переключения каналов на переходных режи-

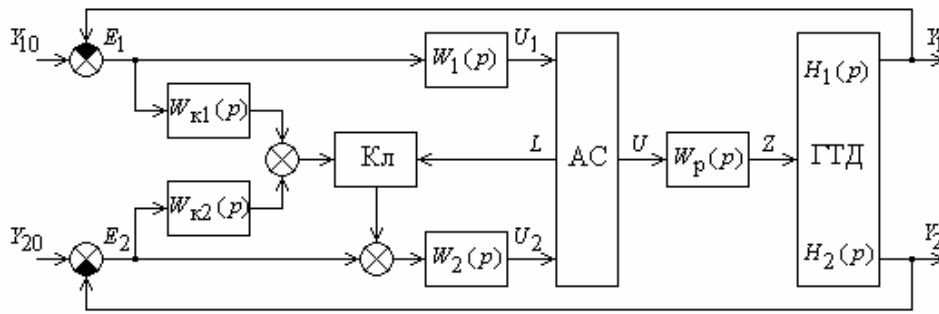


Рис. 1. Структурная схема САУ с регуляторами каналов до селектора

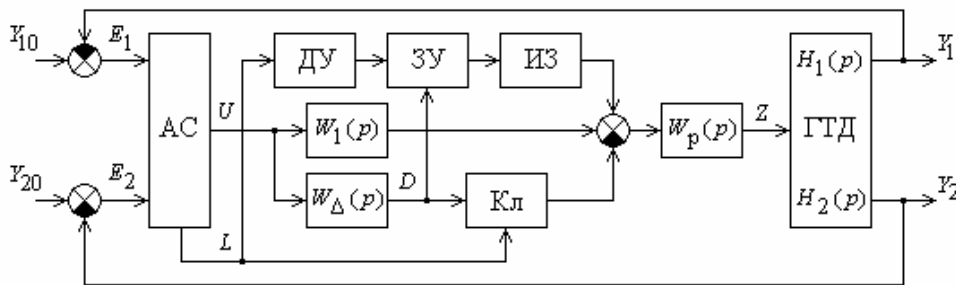


Рис. 2. Структурная схема САУ с регуляторами каналов после селектора

мах динамические характеристики измерителей выходных координат не должны искажать эти условия. Поэтому для канала температуры газа в САУ ГТД с АС инерционность термопары должна быть скорректирована в самонастраивающемся измерителе температуры.

Исходя из этих требований, в работах [1–4] рассмотрены два возможных варианта построения САУ ГТД с селектором каналов: система с регуляторами каналов до селектора (рис. 1) и система с регуляторами каналов после селектора (рис. 2), где  $U$  – сигнальный выход АС;  $L$  – логический выход АС, определяющий момент переключения каналов; Кл – ключ; ДУ – дифференцирующее устройство; ЗУ – запоминающее устройство; ИЗ – изоморфное звено.

Один из каналов является каналом управления, в качестве которого может рассматриваться канал регулирования частоты вращения ротора ГТД, а другим каналом является канал ограничения, например, канал регулирования температуры газа.

Синтез таких систем очевидно должен обеспечить требуемые динамические характеристики отдельных каналов, а также их согласованную работу в САУ с селектором каналов.

## 1. СИНТЕЗ ОТДЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ САУ

Структурная схема отдельного канала САУ ГТД имеет вид рис. 3, где УУ – устройство управления; ИУ – измерительное устройство.

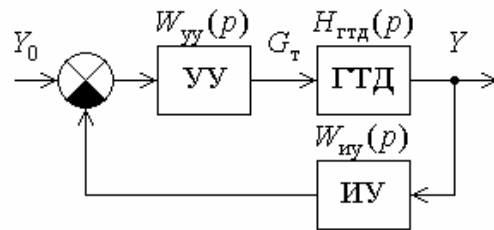


Рис. 3. Структурная схема отдельного канала САУ

Передаточная функция замкнутой САУ

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

Передаточная функция измерительного устройства должна быть равна единице

$$W_{iy}(p) = 1.$$

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

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

тогда

$$\frac{W_{yy}(p)H_{гтд}(p)}{1 + W_{yy}(p)H_{гтд}(p)} = \Phi^*(p).$$

После преобразований получаем следующее выражение передаточной функции УУ:

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

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 передаточная функция ГТД

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

тогда

$$\frac{1}{H_{гтд}(p)} = \frac{1}{k_{гтд}} \cdot \frac{B(p)}{A(p)}.$$

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

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

В САУ с селектором каналов обычно реализуется общий изодромный регулятор с передаточной функцией

$$W_{ир}(p) = \frac{k_{ир}(T_{ир}p + 1)}{pC(p)}, \quad (6)$$

где форсирующее звено  $(T_{ир}p + 1)$  корректирует инерционность ГТД и регуляторы отдельных каналов

$$W_i(p) = \frac{1}{k_{гтд i}} \cdot \frac{B(p)}{A_i(p)} \cdot \frac{k}{k_{ир}(T_{ир}p + 1)}. \quad (7)$$

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЖЕЛАЕМОЙ САУ

Структурная схема желаемой САУ для одного канала представлена на рис. 4.

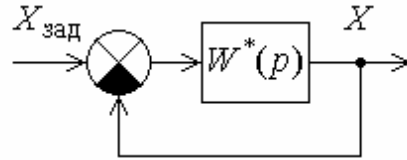


Рис. 4. Структурная схема желаемой САУ

Здесь  $W^*(p)$  – передаточная функция разомкнутой желаемой системы. Тогда передаточная функция замкнутой желаемой системы

$$\Phi^*(p) = \frac{W^*(p)}{1 + W^*(p)}.$$

Очевидно, что

$$W^*(p) = \frac{\Phi^*(p)}{1 - \Phi^*(p)}.$$

Если

$$W^*(p) = \frac{k}{pC(p)},$$

то

$$\Phi^*(p) = \frac{k}{pC(p) + k}. \quad (8)$$

Инерционность исполнительных устройств должна быть учтена в  $C(p)$ , в случае необходимости она может быть скорректирована.

Передаточная функция замкнутой системы  $\Phi^*(p)$  должна быть приближена к стандартной передаточной функции с учетом требований к качеству переходных процессов.

Рассмотрим следующие частные случаи.

1. Пусть

$$W^*(p) = \frac{k}{p},$$

тогда

$$\Phi^*(p) = \frac{k}{p + k} = \frac{1}{Tp + 1}.$$

При этом имеем экспоненциальный, монотонный переходной процесс с временем регулирования  $t_{рег} = 3T = 3/k$ .

2. Пусть

$$W^*(p) = \frac{k}{p(\tau p + 1)},$$

тогда

$$\Phi^*(p) = \frac{k}{\tau p^2 + p + k} = \frac{\omega^2}{p^2 + 2\xi\omega p + \omega^2},$$

где  $\xi = \frac{1}{2\sqrt{k\tau}}$ ;  $\omega^2 = \frac{k}{\tau}$ .

При  $\xi \geq 1$  — переходный процесс монотонный. Тогда  $k\tau \leq 0,25$ .

При  $\xi = 0,707$  — переходный процесс с перерегулированием  $\sigma_m < 5\%$ . Тогда  $k\tau \leq 0,5$ .

3. Пусть

$$W^*(p) = \frac{k}{p(\tau_2^2 p^2 + \tau_1 p + 1)},$$

тогда

$$\begin{aligned} \Phi^*(p) &= \frac{k}{\tau_2^2 p^3 + \tau_1 p^2 + p + k} = \\ &= \frac{\omega^3}{p^3 + A_1 \omega p^2 + A_2 \omega^2 p + \omega^3}, \end{aligned}$$

где  $A_1 \omega = \frac{\tau_1}{\tau_2^2}$ ;  $A_2 \omega^2 = \frac{1}{\tau_2^2}$ ;  $\omega^3 = \frac{k}{\tau_2^2}$ .

При  $A_1 = A_2 = 3$  — переходный процесс монотонный.

При  $A_1 = A_2 = 2,15$  — переходный процесс с перерегулированием  $\sigma_m < 5\%$ .

### 3. СИНТЕЗ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ГТД

Для контура дозирования топлива в основную камеру сгорания по каналу частоты вращения передаточная функция объекта управления

$$H_{nG_\tau}(p) = k_n \frac{A_n(p)}{B(p)},$$

где порядок полинома  $A_n(p)$  на единицу меньше порядка полинома  $B(p)$  (табл. 1).

Таблица 1

Число валов ГТД	Порядок полинома	
1	0	1
2	1	2
3	2	3

Для максимального режима работы передаточная функция одновального ГТД по частоте вращения ротора может быть получена в соответствии с работой [5]:

$$H_{nG_\tau}(p) = \frac{0,45}{0,56p + 1}.$$

Тогда передаточная функция устройства управления для канала частоты вращения

$$W_{yyn}(p) = \frac{1}{k_n} \cdot \frac{B(p)}{A_n(p)} \cdot \frac{k}{pC(p)}.$$

Если передаточная функция желаемой системы

$$W^*(p) = \frac{3}{p(0,02p + 1)}$$

и передаточная функция общего изодромного регулятора

$$W_{np}(p) = \frac{3(0,56p + 1)}{p(0,02p + 1)},$$

то передаточная функция регулятора по каналу частоты вращения

$$W_n(p) = W_1(p) = \frac{1}{0,45} = 2,222.$$

Для максимального режима работы передаточная функция двухвального ГТД по частоте вращения ротора высокого давления может быть получена в соответствии с работой [6]:

$$\begin{aligned} H_{n_2G_\tau}(p) &= 0,866 \cdot \frac{0,206p + 1}{0,133p^2 + 0,94p + 1} = \\ &= 0,866 \cdot \frac{0,206p + 1}{(0,766p + 1)(0,174p + 1)}. \end{aligned}$$

Тогда передаточная функция устройства управления для канала частоты вращения

$$W_{yyn_2}(p) = \frac{1}{k_{n_2}} \cdot \frac{B(p)}{A_{n_2}(p)} \cdot \frac{k}{pC(p)}.$$

Если передаточная функция желаемой системы

$$W^*(p) = \frac{3}{p(0,02p + 1)}$$

и передаточная функция общего изодромного регулятора

$$W_{np}(p) = \frac{3(0,766p + 1)}{p(0,02p + 1)},$$

то передаточная функция регулятора по каналу частоты вращения

$$\begin{aligned} W_{n_2}(p) &= W_1(p) = \\ &= \frac{1}{0,866} \cdot \frac{0,174p + 1}{0,206p + 1} = 1,155 \cdot \frac{0,174p + 1}{0,206p + 1}. \end{aligned}$$

#### 4. СИНТЕЗ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ГАЗА ГТД

Для контура дозирования топлива в основную камеру сгорания по каналу температуры газа передаточная функция объекта управления

$$H_{T_4^*G_T}(p) = k_{T_4^*} \frac{A_{T_4^*}(p)}{B(p)},$$

где  $A_{T_4^*}(p)$  и  $B(p)$  — полиномы одного порядка (табл. 2).

Таблица 2

Число валов ГТД	Порядок полинома	
1	1	1
2	2	2
3	3	3

Для максимального режима работы передаточная функция одновального ГТД по температуре газа после турбины может быть получена в соответствии с работой [5]:

$$H_{T_4^*G_T}(p) = 0,35 \cdot \frac{0,829p + 1}{0,56p + 1}.$$

Тогда передаточная функция устройства управления для канала температуры газа

$$W_{y_{T_4^*}T_4^*}(p) = \frac{1}{k_{T_4^*}} \cdot \frac{B(p)}{A_{T_4^*}(p)} \cdot \frac{k}{pC(p)}.$$

Если передаточная функция желаемой системы

$$W^*(p) = \frac{3}{p(0,02p + 1)}$$

и передаточная функция общего изодромного регулятора

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

то передаточная функция регулятора по каналу температуры газа

$$W_{T_4^*}(p) = W_2(p) = \frac{1}{0,35} \times \frac{1}{0,829p + 1} = \frac{2,857}{0,829p + 1}.$$

Для максимального режима работы передаточная функция двухвального ГТД по температуре газа после турбины может быть получена в соответствии с работой [6]:

$$H_{T_4^*G_T}(p) = 0,333 \cdot \frac{0,064p^2 + 0,667p + 1}{0,133p^2 + 0,94p + 1} = 0,333 \cdot \frac{0,064p^2 + 0,667p + 1}{(0,766p + 1)(0,174p + 1)}.$$

Тогда передаточная функция устройства управления для канала температуры газа

$$W_{y_{T_4^*}T_4^*}(p) = \frac{1}{k_{T_4^*}} \cdot \frac{B(p)}{A_{T_4^*}(p)} \cdot \frac{k}{pC(p)}.$$

Если передаточная функция желаемой системы

$$W^*(p) = \frac{3}{p(0,02p + 1)}$$

и передаточная функция общего изодромного регулятора

$$W_{\text{ир}}(p) = \frac{3(0,766p + 1)}{p(0,02p + 1)},$$

то передаточная функция регулятора по каналу температуры газа

$$W_{T_4^*}(p) = W_2(p) = \frac{1}{0,333} \times \frac{0,174p + 1}{0,064p^2 + 0,667p + 1} = 3 \cdot \frac{0,174p + 1}{0,064p^2 + 0,667p + 1}.$$

Принципы построения малоинерционных измерителей температуры газа ГТД рассмотрены в работе [7].

#### 5. СИНТЕЗ ПЕРЕКРЕСТНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ КАНАЛАМИ

Рассмотрим САУ ГТД, структурная схема которой представлена на рис. 1. Здесь  $W_{K1}(p)$  и  $W_{K2}(p)$  — передаточные функции корректирующих звеньев перекрестных связей, введенных для формирования условия селективного регулирования. Результаты синтеза корректирующих звеньев  $W_{K1}(p)$  и  $W_{K2}(p)$  приведены в работе [1]. Для условия селективного регулирования  $E_1(t) = E_2(t)$  получаем

$$\begin{aligned} W_{K1}(p) &= \frac{W_1(p) - 1}{W_2(p)}; \\ W_{K2}(p) &= \frac{1 - W_2(p)}{W_2(p)}. \end{aligned} \tag{9}$$

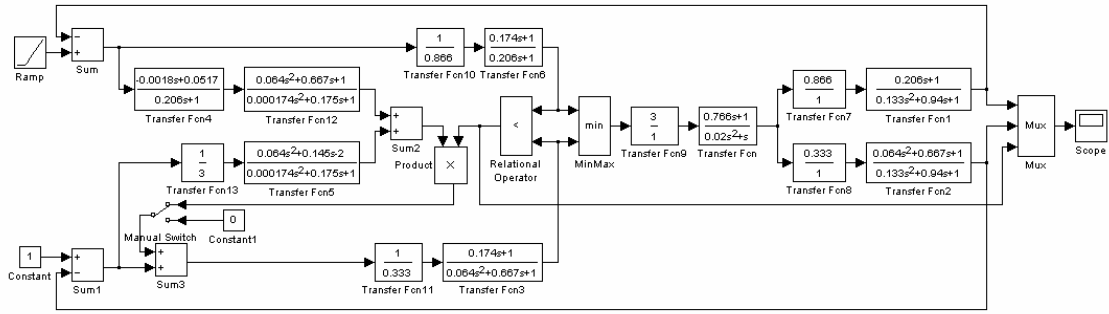


Рис. 5. Схема моделирования САУ с регуляторами каналов до селектора

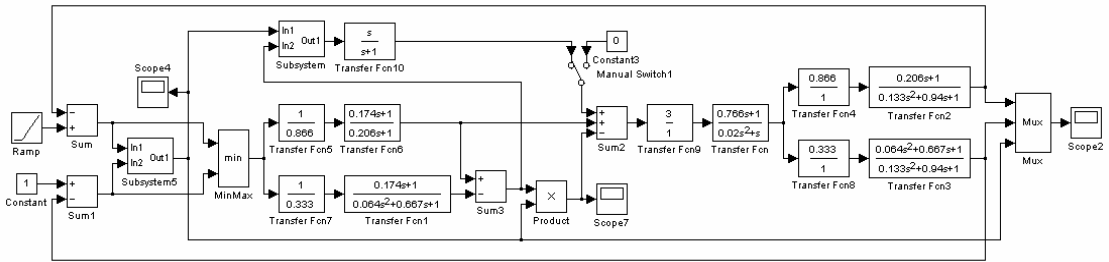


Рис. 6. Схема моделирования САУ с регуляторами каналов после селектора

Тогда для рассмотренного одновального ГТД получаем следующие выражения передаточных функций этих звеньев:

$$W_{K1}(p) = 0,428(0,829p + 1) = 0,355p + 0,428;$$

$$W_{K2}(p) = 0,35(0,829p - 1,857) = 0,29p - 0,65.$$

Для рассмотренного двухвального ГТД получаем следующие выражения передаточных функций этих звеньев:

$$W_{K1}(p) = \frac{-0,0018p + 0,0517}{0,206p + 1} \times \frac{0,064p^2 + 0,667p + 1}{0,174p + 1};$$

$$W_{K2}(p) = 0,333 \frac{0,064p^2 + 0,145p - 2}{0,174p + 1}.$$

Для САУ ГТД, структурная схема которой представлена на рис. 2, 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

$$W_{\Delta}(p) = W_1(p) - W_2(p) \quad (10)$$

по выходному логическому сигналу селектора  $L$  [3].

Тогда для рассмотренного одновального ГТД получаем следующее выражение передаточной функции этого разностного звена:

$$W_{\Delta}(p) = \frac{1,842p - 0,653}{0,829p + 1}.$$

Для рассмотренного двухвального ГТД получаем следующее выражение передаточной функции этого разностного звена:

$$W_{\Delta}(p) = \frac{0,174p + 1}{0,206p + 1} \cdot \frac{0,0739p^2 + 0,152p - 1,845}{0,064p^2 + 0,667p + 1}.$$

## 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ ДВУХВАЛЬНОГО ГТД С СЕЛЕКТОРОМ КАНАЛОВ

Исследование рассмотренных САУ с селектором каналов для одновального ГТД было приведено в работах [1, 3]. В данной работе проведен анализ этих САУ применительно к двухвальному ГТД.

Цифровое моделирование переходных процессов, происходящих в САУ, соответствующих рис. 1 и рис. 2, производится с использованием пакета Simulink системы MATLAB. Схемы моделирования приведены соответственно на рис. 5 и рис. 6.

Входными сигналами САУ являются линейно-нарастающий сигнал в канале частоты вращения  $Y_{10} = Y_{n20}$  и постоянный сигнал

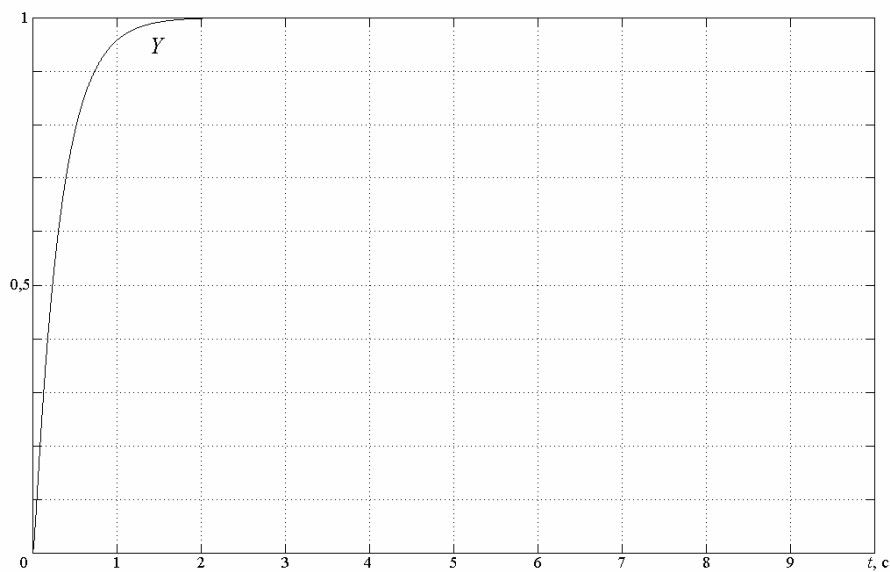


Рис. 7. Переходный процесс желаемой САУ

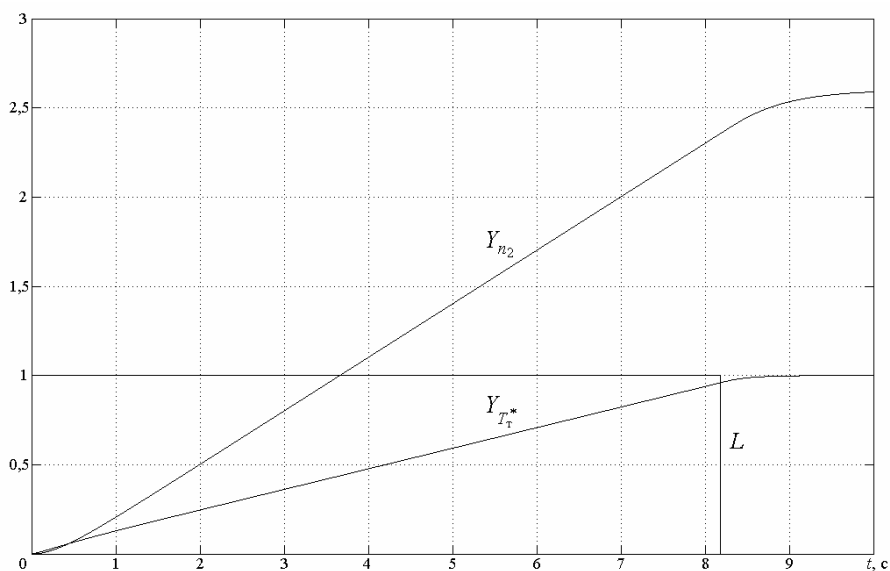


Рис. 8. Переходные процессы в САУ с регуляторами каналов до селектора

в канале температуры газа  $Y_{20} = Y_{T_r^*0}$ . При этом моделируется переходный процесс переключения с канала управления по частоте вращения на канал ограничения по температуре газа.

Результат моделирования переходного процесса по ступенчатому задающему воздействию в одном из каналов приведен на рис. 7. Результаты моделирования переходных процессов в рассмотренных САУ ГТД с селектором каналов приведены на рис. 8 и 9, соответственно.

Качество полученных переходных процессов соответствует заданным требованиям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный аналитический метод синтеза САУ ГТД с селектором каналов позволяет учесть особенности динамических характеристик объекта управления и в результате провести синтез управляющих устройств, обеспечивающих желаемое качество переходных процессов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петунин, В. И. Принципы построения логико-динамических систем автоматического управления газотурбинными двигателями // Вестник УГАТУ. 2003. Т. 4, № 1. С. 78–87.



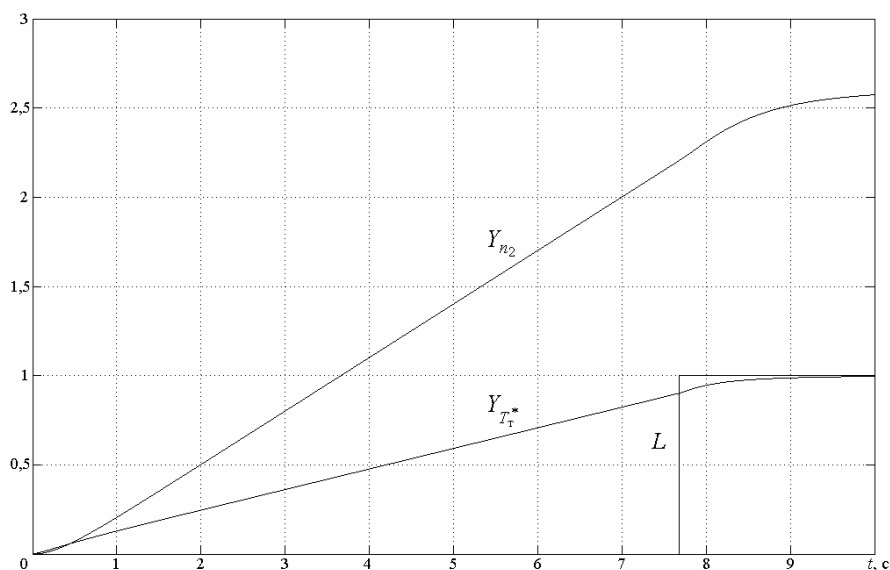


Рис. 9. Переходные процессы в САУ с регуляторами каналов после селектора

2. **Петунин, В. И.** Патент РФ № 2416 на полезную модель: МПК 6 F02C 9/28. Система автоматического регулирования газотурбинного двигателя / В. И. Петунин, А. И. Фрид, В. В. Васильев, Ф. А. Шаймарданов. Заявка № 95108046; Заявл. 18.05.95; Опубл. 16.07.96; Бюл. № 7.
3. **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.
4. **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.
5. **Шевяков, А. А.** Автоматика авиационных и ракетных силовых установок / А. А. Шевяков. М. : Машиностроение, 1970. 660 с.
6. **Черкасов, Б. А.** Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей : учеб. для вузов / Б. А. Черкасов. М. : Машиностроение, 1988. 360 с.
7. **Петунин, В. И.** Определение температуры газа ГТД с помощью косвенных измерений / В. И. Петунин // Изв. вузов. Авиационная техника. 2008. № 1. С. 51–55.

#### 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.