

УДК 62-52

## **Управление переходными процессами авиационного газотурбинного двигателя. Распределение расходов топлива по коллекторам основной камеры сгорания**

**Королев В. В.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,  
Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*e-mail: my.lime.life@gmail.com*

### **Аннотация**

Рассмотрена задача управления расходом топлива в основную камеру сгорания (ОКС) авиационного газотурбинного (ГТД) на переходных режимах работы ГТД. Предложены программы управления и реализующая их структура системы автоматического управления (САУ). Проанализированы результаты использования предложенных программ управления.

**Ключевые слова:** гтд, переходный процесс, многосвязное управление, расход топлива в окс

### **Введение**

С развитием технологий к современным маневренным самолетам предъявляются нормы, требующие оптимизации динамических параметров силовой установки и ее системы управления в целом. В частности современные маневренные самолеты должны обладать показателем тяговооруженности на 20..40% выше чем истребители четвертого поколения.

Высокий показатель тяговооруженности означает лучшую динамику летательного аппарата, меньшую постоянную времени набора продольной скорости при увеличении тяги двигателя. Поэтому предъявляются более жесткие требования к системе автоматического управления (САУ) двигателя по времени приемистости. Для перспективного двигателя пятого поколения время приемистости не должно превышать 3 секунд. Обеспечить данный показатель времени приемистости двигателя без создания многосвязной САУ не представляется невозможным.

### **Постановка задачи**

Рассматривается двухвальный ГТД с регулируемыми направляющими аппаратами (НА) компрессора высокого давления (КВД) и входными направляющими аппаратами (ВНА)

компрессора низкого давления (КНД) и регулируемой площадью реактивного сопла (РС). Особенности топливной системы являются:

- применение насоса с регулируемой производительностью,
- применение 2-х независимых дозаторов топлива для распределения топлива по коллекторам ОКС.

Предъявляются следующие основные требования к переходному процессу двигателя и САУ:

- Время приемистости не более 3 с при обеспечении заданных ограничений по запасам газодинамической устойчивости (ГДУ) и нагрузок на узлы изделия с целью обеспечения его ресурса. В первую очередь – ограничение продольного усилия на подшипники валов КВД и КНД, которые существенно возрастают на максимальных режимах при непрогретом двигателе и раскрытых створках РС.
- Обеспечение заданной минимальной тяги на режиме малого газа (МГ) на земле и в полете.
- Ограничение забросов параметров при выходе на заданный режим (не более 0.5% по частотам вращения роторов)
- Управляемость: плавное изменение тяги двигателя при перемещении рычага управления двигателя (РУД) с различной скоростью.
- Исключение индивидуальных настроек для конкретного двигателя и агрегатов системы топливопитания. При этом разброс времени приемистости должен укладываться в заданный допуск.
- Стабилизация времени приемистости при изменении условий полета летательного аппарата (ЛА).

Основными факторами, ограничивающими минимизацию времени приемистости являются запасы ГДУ компрессоров, максимальная температура газов перед турбиной высокого давления (ТВД) и, в меньшей степени, заброс по частотам вращения роторов при выходе на максимальный режим работы. При снижении времени приемистости ниже 4..5 с существенным фактором становятся также прочностные ограничения для ряда узлов, усиливается влияние начального теплового состояния двигателя. Эти факторы достоверно оцениваются в переходных режимах преимущественно экспериментально. В силу ряда указанных причин расчетные исследования и методы синтеза систем управления позволяют решать только отдельные частные задачи.

Задача управления переходными режимами сводится к задачам управления следующими контурами двигателя [1]:

1. Расхода топлива в ОКС
2. Положения НА КВД
3. Положения ВНА КНД
4. Управления критическим сечением РС
5. Поддержанием заданного давления перед дозаторами топлива в ОКС.

Изменение в допустимых пределах положения ВНА КНД дает существенно меньший эффект. Учитывая требования по осевым усилиям и незаметности ЛА, необходимо обеспечить минимальную площадь РС на дроссельных и переходных режимах работы ГТД. Поэтому управление этими контурами не рассматривается. На рисунке 1 представлена структура управления переходными режимами ГТД.

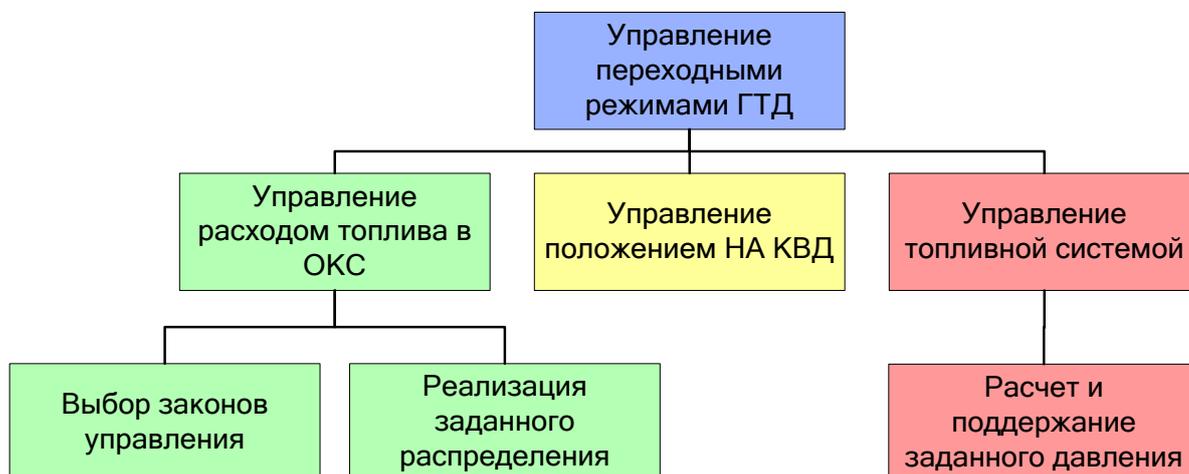


Рис. 1. Структура управления переходными режимами ГТД

Традиционный подход, реализованный в эксплуатируемых системах, состоит в декомпозиции многомерной САУ, при котором она разделяется на несколько автономно функционирующих подсистем [2], то есть синтезе автономных регуляторов, каждый из которых, формирует управляющее воздействие по заданной программе регулирования или поддерживает один из регулируемых параметров. Вместе с тем, обеспечение главного требования – минимального времени приемистости, достигается согласованной работой всех контуров многомерной САУ.

## Решение задачи

Кратность изменения расхода (от расхода на запуске до расхода в ОКС на максимальном режиме работы) современных военных двигателей около 50. Обеспечение подобной кратности без использования двух коллекторов ОКС невозможно. Процесс подключения второго коллектора ОКС существенно влияет на характер приемистости двигателя:

- Отборы топлива на заполнение второго коллектора могут достигать 30% текущего расхода топлива в КС ГТД.
- В момент заполнения коллектора происходит резкое изменение условий горения топлива в КС ГТД и уменьшение запасов ГДУ компрессора, что может привести к помпажу двигателя.
- Неравномерность поля температур при работе с частично заполненным коллектором.

В двигателях эксплуатируемых в настоящий момент российских маневренных самолетах для распределения топлива по коллекторам ОКС используется агрегат РТ. При превышении суммарного расхода топлива установленной величины (около 5% от максимального расхода топлива в ГТД) РТ подключает 2 коллектор форсунок ОКС. При этом расход топлива в 1 коллектор сохраняется на постоянном уровне, а оставшийся расход дозируется во второй коллектор ОКС [3]. На рис. 2 показан процесс подключения второго коллектора ОКС при использовании агрегата РТ.

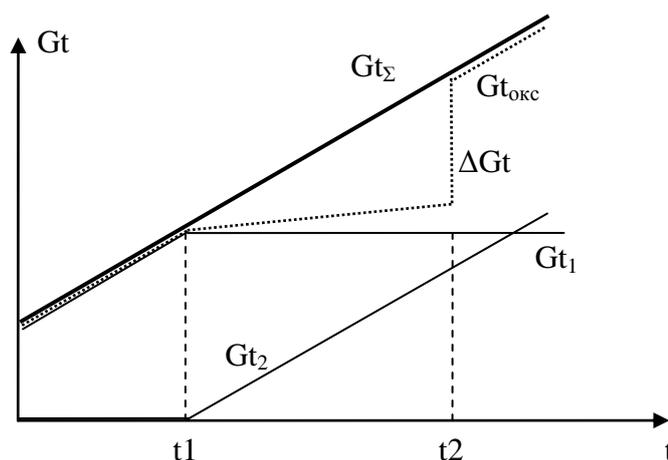


Рис. 2. Характер распределения топлива в ОКС при подключении 2 коллектора с использованием агрегата РТ

Здесь:

$G_{t\Sigma}$  – суммарный расход топлива, дозируемый через дозаторы в ОКС

$G_{t1}$  – расход топлива, дозируемый через первый коллектор форсунок ОКС

$G_{t2}$  – расход топлива, дозируемый через второй коллектор форсунок ОКС

$G_{t_{окс}}$  – расход топлива непосредственно сгорающий в ОКС

В момент времени  $t_1$  суммарный расход топлива превышает пороговое значение и РТ подключает второй коллектор форсунок ОКС. С момента времени  $t_1$  расход топлива в первый коллектор ОКС остается неизменным, а расход во второй коллектор изменяется пропорционально суммарному расходу топлива. С момента времени  $t_1$  и по момент времени  $t_2$  расход, дозируемый во второй коллектор, в основном расходуется на заполнение коллектора, и лишь частично поступает в общую зону горения коллекторов. В момент времени  $t_2$  происходит окончание заполнения второго коллектора топливом, расход в зону горения возрастает на величину отбора топлива для заполнения, так как весь расход через 2-ой коллектор поступает в зону горения. Как следствие, возникает скачкообразное возмущение по расходу топлива в зону горения ( $\Delta G_t$ ) в сторону снижения запасов ГДУ компрессора.

Стоит отметить следующие недостатки использования РТ в качестве распределителя топлива:

1. На время заполнения второго коллектора форсунок ОКС расход заполнения не компенсируется, что приводит к прямым потерям времени приемистости двигателя. При этом время заполнения коллектора может достигать 0.8...1.2с.
2. Переход коллектора из незаполненного состояния в заполненное сопровождается резким изменением характеристики суммарного горящего топлива. При этом возможны изменения параметров работы двигателя, срывы пламени в ОКС, потеря устойчивости газогенератора.
3. Подключение второго коллектора форсунок ОКС происходит в зависимости от суммарного расхода топлива и не учитывает изменения параметров работы ОКС, таким образом, переходный процесс, связанный с подключением второго коллектора, может протекать почти без, так и со значительными возмущениями в газо-воздушном тракте. РТ принципиально не может управлять моментом подключения второго коллектора форсунок ОКС.
4. Невозможность динамического распределения топлива по коллекторам ОКС в зависимости от режима работы ГТД.

При применении гидромеханического распределителя расхода топлива по коллекторам корректно учесть эти эффекты в программах дозирования топлива невозможно.

Применение двух независимых дозаторов топлива в коллекторы ОКС позволяет частично скомпенсировать негативные факторы за счет динамического распределения расходов топлива по коллекторам ОКС в зависимости от режима работы ГТД.

При переходе к электронному управлению из системы исключается агрегат НР, дозирующий топливо в ОКС на всех режимах работы ГТД. На запуске топливо в ОКС дозируется посредством плунжерного насоса, производительности которого недостаточно для дозирования топлива в ОКС на максимальном режиме работы ГТД, поэтому используется второй насос. При переключении насосов следует кратковременное падение давления перед дозаторами топлива, что приводит к снижению расхода в КС ГТД при том же положении дозирующего крана. При приемистости двигателя момент переключения насосов может прийтись на момент подключения и заполнения второго коллектора ОКС, что негативно скажется на времени приемистости. Таким образом, момент переключения питающих ОКС насосов должен быть точно синхронизован по времени с режимом работы КС.

На рис. 3 показана реализованная структура взаимодействия модулей распределения расхода топлива по коллекторам ОКС и переключения насосов топливопитания.

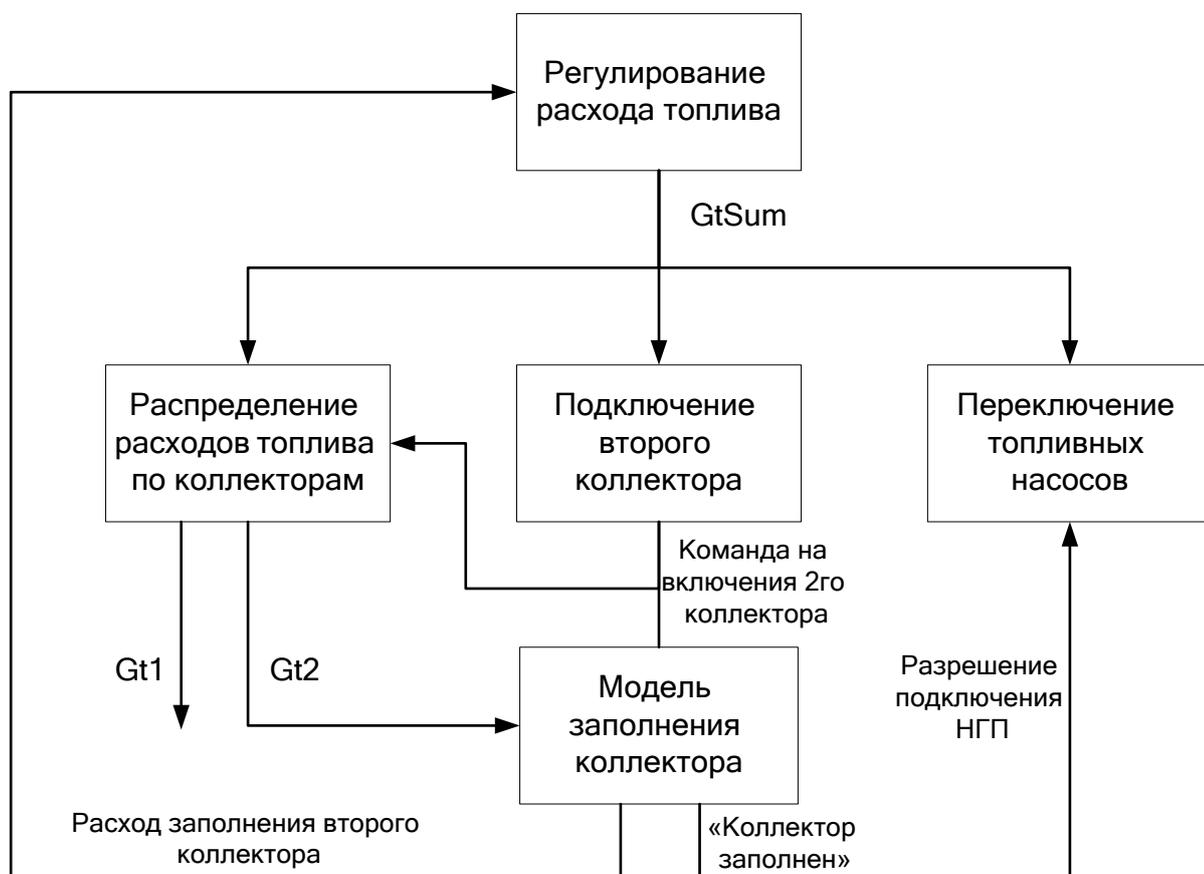


Рис. 3. Структура взаимодействия модулей управления расходом топлива в ОКС

Регуляторы режима работы ГТД ( $n_2$ ,  $n_1$ ,  $T_g$  и др.) формируют суммарный расход топлива в ОКС. На определенном режиме работы ГТД подается сигнал на подключение второго коллектора форсунок ОКС, при этом включается в работу модель заполнения коллектора. Модель заполнения коллектора рассчитывает расход, отбираемый на заполнение второго коллектора и прогнозирует момент, когда коллектор заполнится. Расход, сформированный регуляторами основного контура, корректируется расходом заполнения. После заполнения второго коллектора форсунок ОКС происходит переключение топливных насосов.

Анализ результатов летных испытаний серийной системы показал, что при разработке новой логики распределения топлива по коллекторам ОКС следует учесть следующие аспекты:

1. Во время приемистости на время заполнения второго коллектора форсунок ОКС расход топлива в первый коллектор следует сохранять близким к максимальной пропускной способности коллектора.
2. Следует компенсировать расход заполнения второго коллектора ОКС для ускорения процесса заполнения коллектора и минимизации времени приемистости
3. Расход во второй коллектор во время его заполнения следует ограничивать расчетной величиной для минимизации влияния режима истечения топлива из коллектора в момент его полного заполнения.
4. На статических режимах работы для обеспечения равномерности поля температур в ОКС и уменьшения удельных расходов топлива целесообразно снижать расход топлива в первый коллектор ОКС при работе от двух коллекторов.
5. Момент подключения второго коллектора ОКС в работу следует согласовывать с режимом работы газогенератора и ОКС.

Для снижения частоты переключений дозаторов и топливных насосов подключение выполняется при выполнении условий (по логическому ИЛИ):

- Давление за компрессором ВД выше выбранного порога,
- Прогноз расхода топлива для заданного РУД режима работы двигателя выше порога включения. Прогноз выполняется по встроенной модели двигателя.

По первому условию второй дозатор подключается при плавном повышении режима. По второму условию подключение происходит при приемистости практически сразу после начала перемещения РУД.

Выключение 2-го дозатора выполняется при снижении расхода ниже порога выключения с задержкой 3с. За счет выбора величины гистерезиса по расходу топлива и задержки приоритет – работа с включенным вторым дозатором. Это сокращает время частичной приемистости и снижает частоту переключений. Реализация описанной логики практически исключила выключение 2-го дозатора при заходе на посадку.

Во всех режимах работы ограничиваются:

- Максимальное и минимальное значения расхода в первый дозатор.
- Минимальное значение расхода во второй дозатор 300кг/час.

На рис. 4. представлена реализованная структура распределения расхода топлива по коллекторам ОКС.

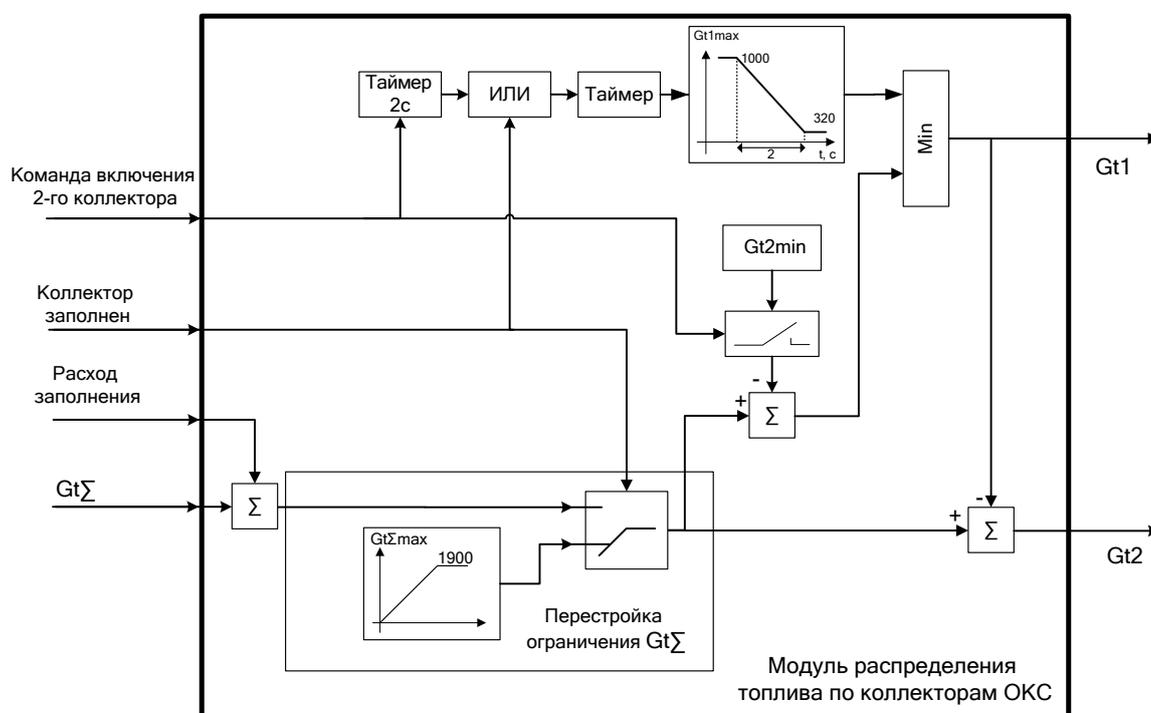


Рис. 4. Структура распределения расхода топлива по коллекторам ОКС

В распределении топлива по коллекторам участвуют блоки:

- Регуляторы режима работы ГТД, формирующие суммарный расход в ОКС ГТД.
- Модуль перестройки ограничения  $Gt_{\Sigma}$  на время пока коллектор не заполнен.
- Ограничитель максимального расхода в первый коллектор ОКС с таймером, определяющим величину ограничения
- Модули логики подключения второго коллектора форсунок ОКС и модель его заполнения, описанные выше

- Формирователь начального расхода топлива во второй коллектор форсунок ОКС

Предложенная схема расчета распределения топлива по коллекторам ОКС обеспечивает динамическое распределение расходов в зависимости от режима работы ГТД.

Характер изменения расхода топлива в коллекторах ОКС представлен на рис. 4, 5, на которых  $t_0$  – момент подключения коллектора,  $t_1$  - момент начала,  $t_2$  – момент окончания перехода на номинальное распределение расхода по коллекторам.

При плавном перемещении РУД (рис. 4) регулятор частоты вращения плавно повышает заданный расход топлива. В течение интервала времени ( $t_0.. t_1$ ) заполняется топливом второй коллектор и стабилизируется процесс горения в ОКС. До момента времени  $t_1$  режим двигателя поддерживается изменением расхода топлива через первый дозатор, далее – изменением расхода топлива во второй коллектор. В течение интервала времени ( $t_1.. t_2$ ) выполняется переход к номинальному распределению расходов путем снижения с постоянной скоростью расхода в первый коллектор. В момент времени  $t_2$  процесс включения в работу второго коллектора закончен.

При резком перемещении РУД (рис.5) регулятор частоты вращения быстро увеличивает расход топлива. В момент времени  $t_{01}$  расход через первый дозатор достигает максимальной величины  $G_{t1max1}$ , и дальнейшее увеличение режима работы ГТД происходит за счет увеличения расхода через второй дозатор. До момента времени  $t_{01}$  режим двигателя поддерживается изменением расхода топлива через первый дозатор, далее - изменением расхода топлива во второй дозатор коллектор. В момент времени  $t_1$  максимальный расход через первый коллектор КС ГТД начинает плавно снижаться до величины  $G_{t1max2}$ . К моменту  $t_2$  процесс включения в работу второго коллектора закончен.

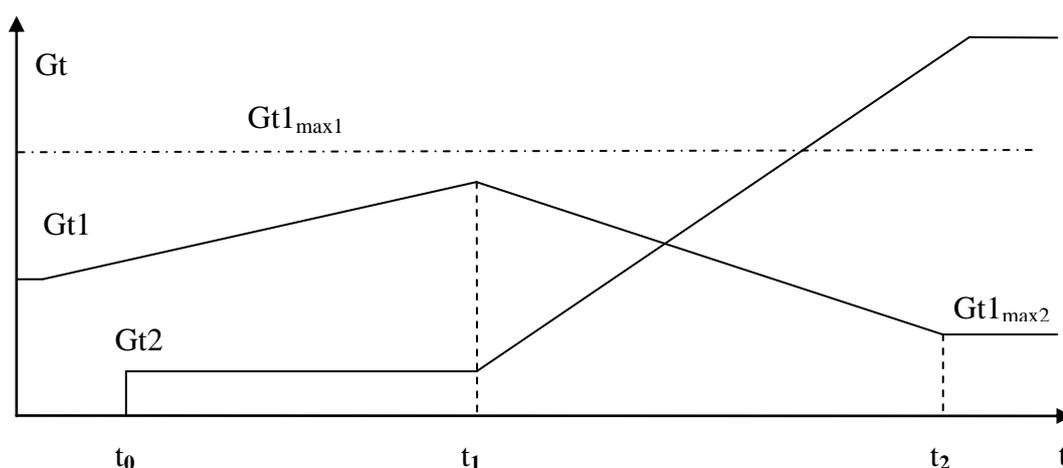


Рис. 4. Характер распределения расхода топлива по коллекторам ОКС при плавном выходе

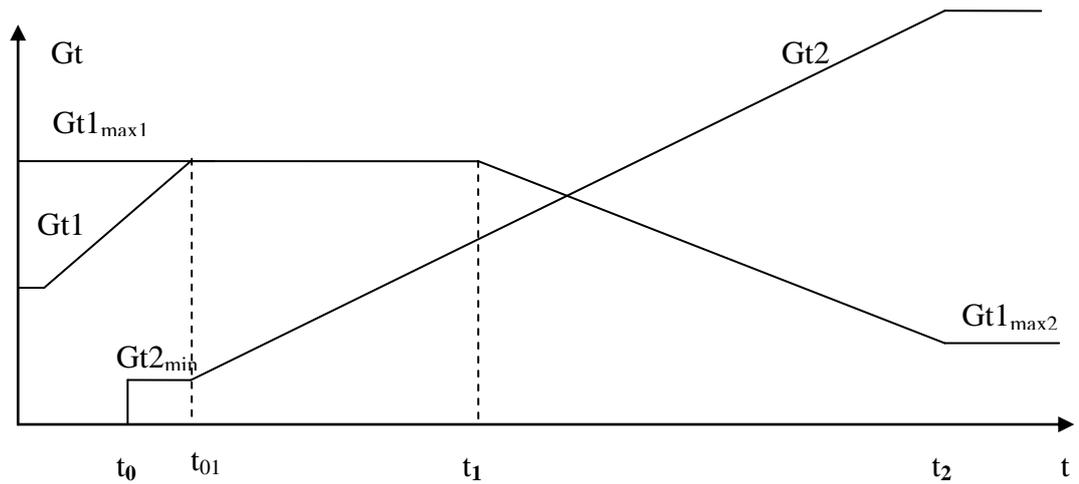


Рис. 5. Характер распределения расхода топлива по коллекторам ОКС при приемистости ГТД

### Результаты и выводы

Сравнительные графики переходных процессов по частотам вращения роторов штатной САУ и предлагаемой САУ с независимым распределением топлива по коллекторам ОКС представлены на рис. 6 и 7.

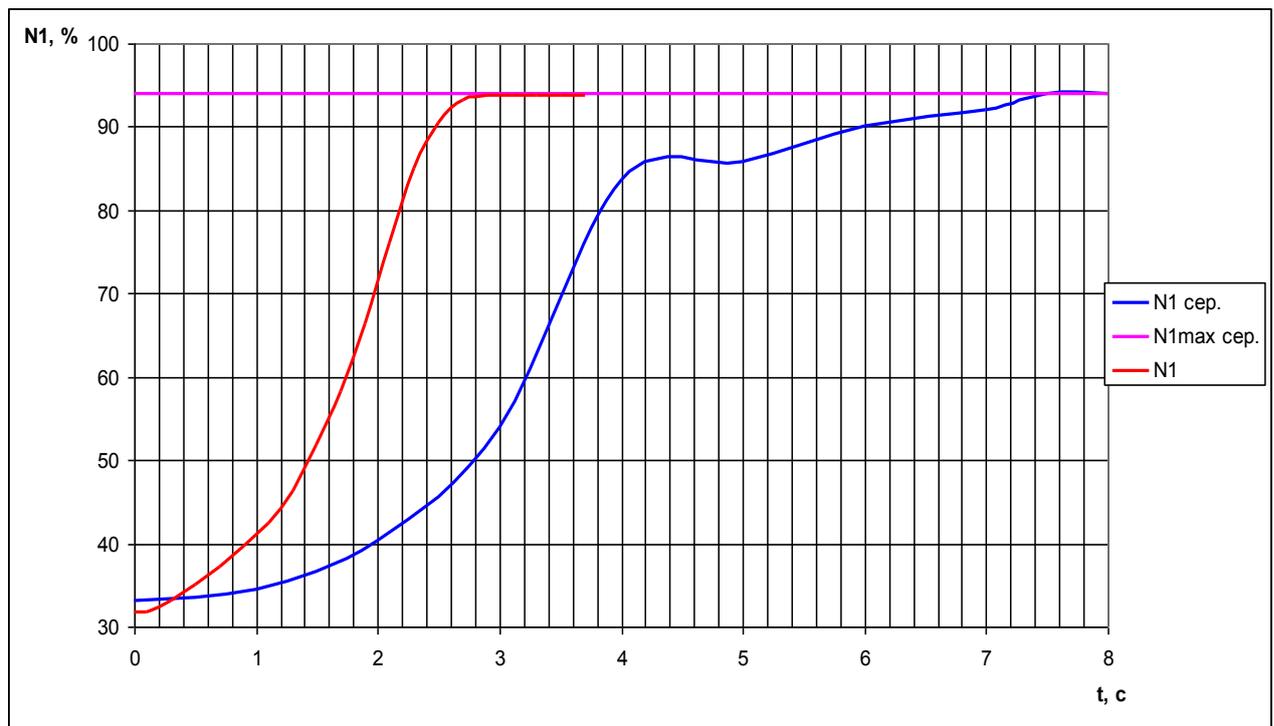


Рис. 6. Переходные процессы по частоте вращения РНД в серийной и новой САУ

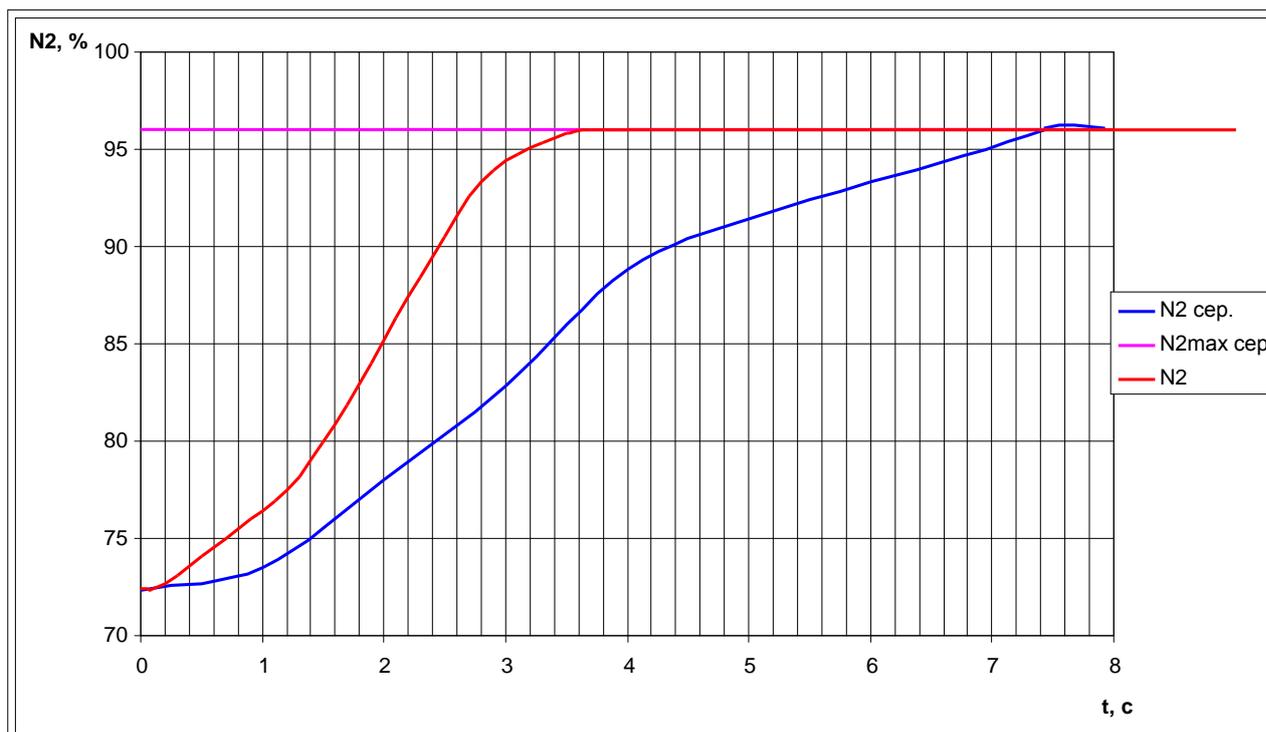


Рис. 7. Переходные процессы по частоте вращения РВД в серийной и новой САУ

Синим цветом обозначены переходные процессы в серийной системе, красным – в новой САУ, розовым – программное значение частот вращения роторов.

За момент окончания приемистости принимался момент достижения частотой вращения РВД 98% от программного значения. Результаты моделирования на поэлементной модели показывают, что этот момент совпадает с моментом достижения 95% значения тяги максимального режима работы ГТД.

Из графиков видно, что время переходного процесса в серийной системе составляет около 2.5 с против 6 секунд в серийной системе.

Применение данной структуры управления расходом топлива позволяет:

1. Избежать случая работы на незаполненном втором коллекторе.
2. Минимизировать негативное влияние изменения режима истечения топлива второго коллектора.
3. Обеспечить равномерность поля температур в ОКС и повысить полноту сгорания топлива на всех режимах работы ГТД.
4. Учесть отборы топлива на заполнение второго коллектора ОКС, обеспечить разгон двигателя в момент подключения второго коллектора ОКС, тем самым сократить время приемистости.

5. Обеспечить заданные запасы ГДУ на протяжении всего процесса приемистости, что позволяет повысить расходы топлива в коллекторы и дополнительно уменьшить время приемистости.

Как следствие использование предложенной САУ позволяет сократить времени приемистости на (30...40)% по сравнению со штатной САУ. Номинальное время приемистости в условиях стенда с режима малого газа до максимального режима «У» составляет 3,0с, с режима захода на посадку  $n_{2пр}=(78...80)\%$  до максимального режима «У» - не более 2.0с.

### **Библиографический список**

1. *Гуревич О.С.* Управление авиационными газотурбинными двигателями. Учебное пособие - Москва: МАИ, 2001.- 100 с.
2. *А.А. Шевяков, Т.С. Мартьянова, В.Ю. Рутковский и др.* Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов. Системный подход - М.: Машиностроение, 1989. - 256 с.
3. Авиационный двигатель АЛ-31ФП. Руководство по технической эксплуатации - ОАО "НПО "Сатурн" Научно-технический центр им. А. Люльки, ОАО "Уфимское Моторостроительное производственное объединение" – 2005, 117 с.