

Динамические свойства жидкостного газогенератора как объекта регулирования жидкостного ракетного двигателя и анализ переходного процесса

12, декабрь 2015

Шацкий О. Е.¹, Кобрин А. А.^{1,*}

УДК: 62-91

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[*kobrinANA@gmail.com](mailto:kobrinANA@gmail.com)

Использованная аббревиатура (Abbreviations used):

ЖГГ – жидкостный газогенератор (*liquid gas generator*);

ЖРД – жидкостный ракетный двигатель (*liquid rocket engine*);

ПГС – пневмогидравлическая схема (*gas-liquid scheme*);

ТНА – турбонасосный агрегат (*turbopump assembly*);

ДУ – двигательная установка (*powerplant*);

АТ – азотный тетраоксид (*nitrogen tetroxide*);

НДМГ – несимметричный диметилгидразин (*unsymmetrical dimethyl, heptyl*);

САУ – система автоматического управления (*automatic control system*).

Введение

Двигательная установка с жидкостным ракетным двигателем является сложным динамическим комплексом. Составляющие элементы - камера сгорания, ТНА, газогенератор, система топливоподачи - сами по себе являются сложными активными динамическими звеньями [2, 8].

На рисунке 1 приведена ПГС с насосной системой подачи и питанием газогенератора ТНА основными компонентами.

Перечислим преимущества приведенной ПГС:

- 1) Надежность, которая достигается благодаря простоте конструкции.
- 2) Быстрота запуска, которая достигается благодаря сокращению всех подготовительных работ.

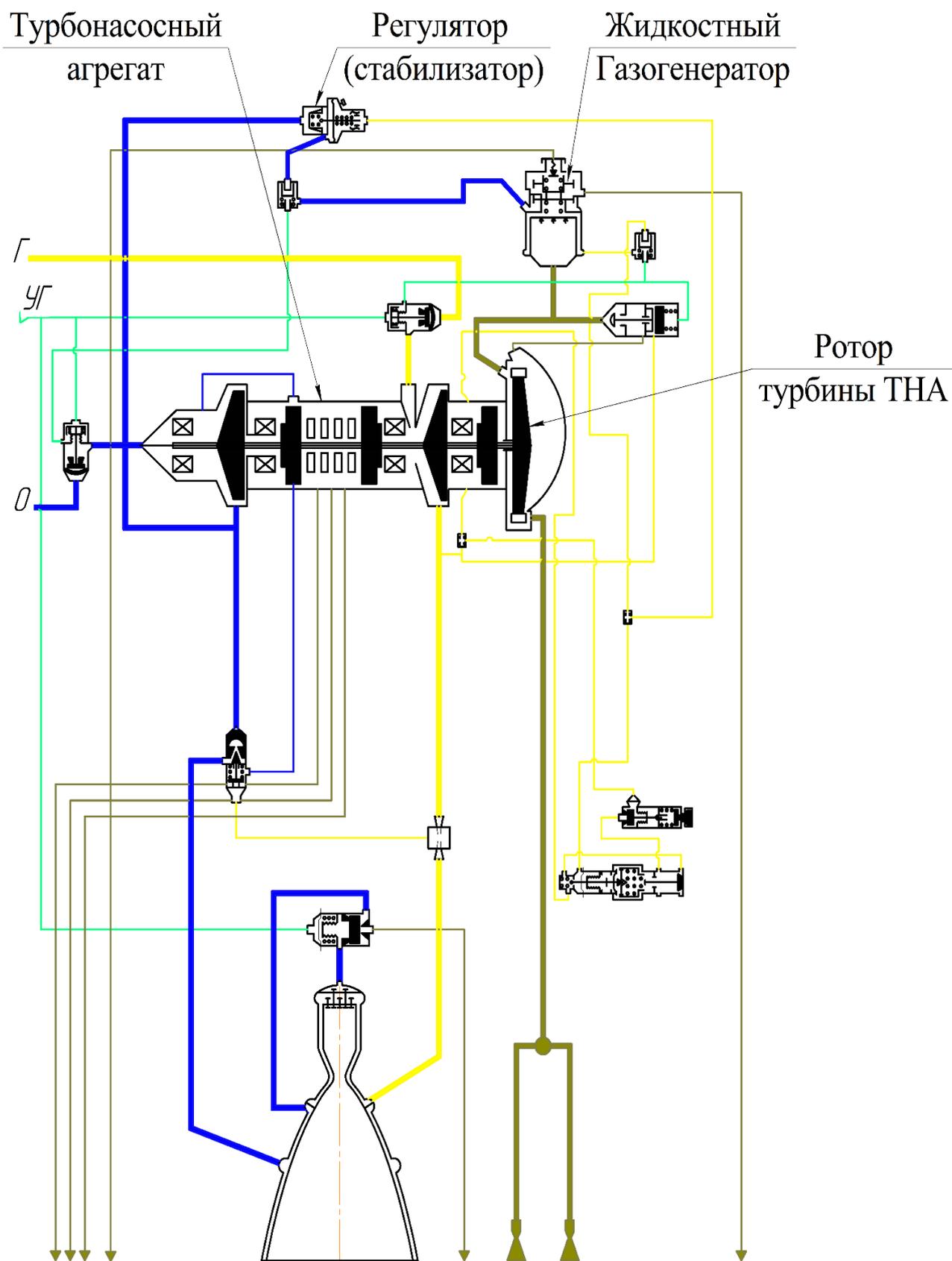


Рис. 1. Пневмогидравлическая схема двигателя:

О – вход окислителя (магистральи синего цвета), Г – вход горючего (магистральи желтого цвета),
 УГ – вход управляющего газа (магистральи зеленого)

Представленная схема (ПГС) относится к ЖРД [1, 6, 9], использующих в качестве топлива самовоспламеняющиеся компоненты (АТ+НДМГ). Их особенностью [10] является, то что

- они не криогенны
- относятся к самовоспламеняющиеся компонентам.

Недостатком подобных компонентов является то, что они отрицательно влияют на окружающую среду [3], включая обслуживающий персонал. Работа с данными компонентами требует специальной одежды и специальных мер предосторожности. Эти компоненты с успехом используются в настоящее время на таких ракетносителях как, «Протон-М».

Представленная ПГС не имеет систем электроприводов, что делает ее проще, а, следовательно, надежнее, поэтому представленный двигатель широко используется для разгонных блоков «Бриз-М» и «Фрегат».

Динамическими свойствами двигательной установки и ее узлов в дальнейшем будем считать способность каждого из входящих в двигательную установку узлов (звеньев) преобразовывать проходящие через них сигналы [2, 7].

От динамических свойств элементов САУ и характера связи между ними зависит успешное выполнение целевых задач управления [4, 5].

Возникновению неустойчивой работы двигательной установки способствуют сложные внешние и внутренние связи между ее отдельными узлами, приводящие к возникновению замкнутых колебательных контуров, что может вызвать резонансные явления.

Динамические свойства объекта регулирования

Динамические свойства объекта регулирования, как элемента системы, определяют выбор типа и характеристик системы автоматического управления.

В качестве примера рассмотрим динамические характеристики звеньев ДУ автономной системы подачи рабочего тела для работы турбины ТНА по каналу управления тягой.

Целью изучения динамических свойств ДУ, как объекта регулирования, является выявление зависимости регулируемой величины от времени, при воздействии на ДУ сигналов со стороны регулятора(стабилизатора) или внешних возмущений.

Далее рассмотрим процесс регулирования представленной схемы. На схеме происходит два взаимосвязанных процесса: стабилизация соотношения компонентов и регулирование тяги.

В тех случаях, когда желательно следить за величиной давления в камере и поддерживать соотношение компонентов на соответствующем уровне, регулируемой величиной можно выбрать давление перед форсунками окислителя и горючего.

$$\dot{m}_\phi = \mu_\phi \cdot F_c \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p_\phi}.$$

Поэлементная структурная схема ЖГГ по каналу управления тягой, совпадает с пневмогидравлической схемой ДУ только лишь схемой соединения прямых каналов подачи

сигналов. Основным преимуществом структурной схемы ЖГГ является восстановление физической величины взаимодействия объекта регулирования и самого регулятора(стабилизатора).

Кроме этого, графическое изображение соединений звеньев предпочтительнее их формальной записи тем, что позволяет наглядно увидеть порядок свертывания этих уравнений в одном уравнении динамики ЖГГ в целом. Кроме этого, структурная схема, приведенная на рисунке 2, позволяет разработчику оценить возможные виды переходных процессов по характеру соединения звеньев. Для этого для объекта регулирования и регулятора(стабилизатора) предварительно записывается общая замкнутая передаточная функция с отрицательной обратной связью:

$$W_{\text{замкн}}(s) = \frac{\text{Прямая связь}}{1 - \text{Разомкнутая связь}};$$

$$W_{\text{замкн}}(s) = \frac{W_1(s)}{1 - W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot (-1)};$$

$$W_{\text{замкн}}(s) = \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s) \cdot W_2(s)}.$$

Здесь $W_1(s)$ – передаточная функция ЖГГ, а $W_2(s)$ – передаточная функция гидравлического регулятора (стабилизатора).

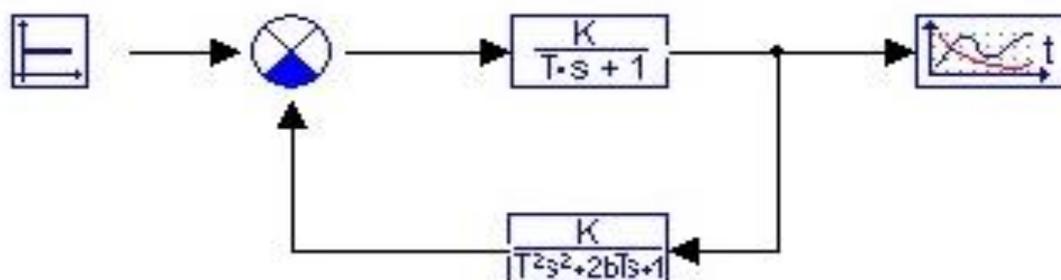


Рис. 2. Структурная схема регулирования ЖГГ

Критерии оценки переходных процессов в САУ ЖГГ (ЖРД)

Использование программного комплекса «Моделирование в технических устройствах» (ПК «МВТУ»), созданного в МГТУ имени Н.Э. Баумана на кафедре «Ядерные реакторы и установки», позволяет варьировать коэффициенты уравнений соответствующих звеньев для решения задачи синтеза необходимого вида переходных процессов и их временных показателей. На основании такой постановки задачи могут быть даны рекомендации по коррекции характеристик элементов замкнутой схемы ЖГГ, изменение которых обеспечивает выполнение требуемого динамического качества основного процесса регулирования (стабилизации).

На рисунке 3 представлены зависимости переходных процессов от времени САУ при различных коэффициентах усиления объекта регулирования (камера сгорания ЖГГ): $K_{\text{ус.кс}} = (0,9 \dots 1,1)$; показаны режимы недорегулирования (линия фиолетового цвета), перерегулирования (линия зеленого цвета) и номинального регулирования (линия красного цвета).

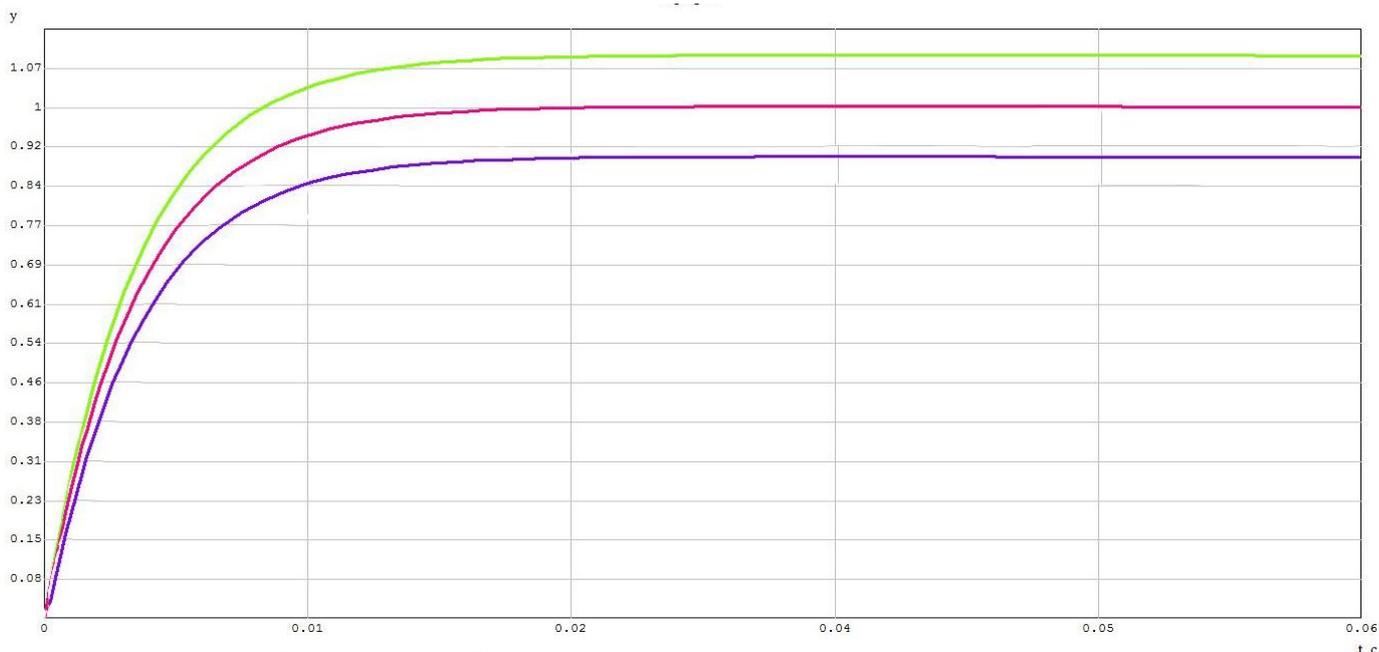


Рис. 3. Переходные процессы с параметром $K_{уст.кк} = (0,9 \dots 1,1)$

На рисунке 4 показаны возможные критерии оценки переходных процессов в САУ ЖТГ.

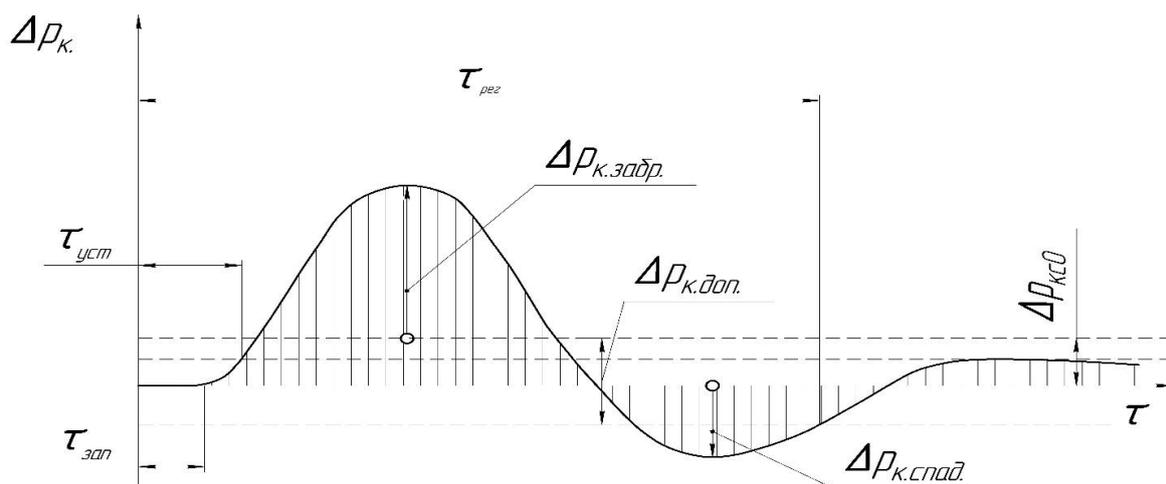


Рис. 4. Переходная динамическая ошибка

Две экспериментальные координаты переходного процесса $\Delta p_{к.забр.}$ и $\Delta p_{к.спад.}$ характеризуют максимальный заброс параметра (давление в камере сгорания ЖТГ, перерегулирование) и спад (минимальную величину, недорегулирование). Эти величины ограничиваются из условий обеспечения прочности конструкции оболочки камеры сгорания ЖТГ. Разность уровней между «новыми» и «старыми» значениями установившегося режима, физически, является статистической ошибкой, присущей рассматриваемой САУ. Установившееся значение этой ошибки характеризует отклонение от «старого» уровня – критерии $\Delta p_{к.сд.}$. Естественно, что величина статистической ошибки САУ должна лежать в пределах допустимых отклонения от назначенного режима $\Delta p_{к.доп.}$.

Временные критерии качества переходного процесса характеризуют его следующие особенности: $\tau_{пер.}$ — время регулирования характеризует пребывание переходного процес-

са вне поля допускаемых отклонений, а так же быстродействие системы; $\tau_{\text{зап.}}$ — время чистого запаздывания.

На рисунке 5 представлен комплексный показатель переходного процесса. Время регулирования $\tau_{\text{рег.}}$ целиком определяется назначением поля допускаемых отклонений. При жестком ограничении забросов и спадов, последние вообще лежат внутри поля допусков. В этом случае время регулирования практически вырождается во время установления режима, которое отсчитывается от начала подачи возмущающего сигнала до момента первого пересечения с уровнем нового номинала, обусловленного величиной статистической ошибки.

Время установления $\tau_{\text{уст.}}$ оценивает "полезную" часть переходного процесса реальной САУ, включающую лишь участок до момента установления первого значения, которое принимает система после окончания переходного процесса. Остальная часть переходного процесса, хотя и неизбежна, но является "не полезной", так как несет в себе лишь динамические погрешности. По временам установления $\tau_{\text{уст.}}$ можно сравнивать между собой быстродействие различных САУ, имеющих аperiodические переходные процессы.

Для колебательных переходных процессов, кроме статистической ошибки $\Delta p_{\text{ксо}}$, максимальных забросов и спадов кривой переходного процесса, во временные критерии дополнительно входят период T или частота колебаний ω , число колебаний N и декремент затухания колебаний D (показатель степени экспонент, огибающих колебания).

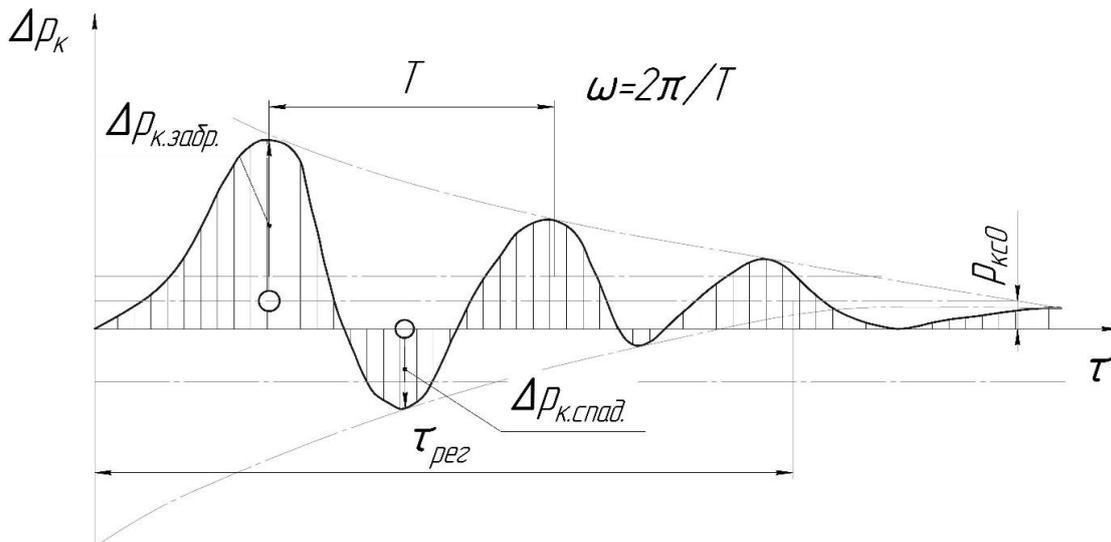


Рис. 5. Комплексный показатель переходного процесса

Выявленные закономерности

С помощью ПК «МВТУ» были проведены теоретические исследования и выявлены некоторые закономерности. Варьировались следующие параметры:

- D (декремент затухания) $D = \frac{1}{N}$;
- $T_{рег}$ (постоянная времени регулятора) $T_{рег} = \sqrt{\frac{m}{c}}$ (m - колеблющаяся масса, c - коэффициент жесткости упругого элемента);

- $K_{\text{ус.рег.}}$ (коэффициент усиления регулятора) $K_{\text{ус.рег.}} = \frac{\Phi(t)}{C}$ (C – некоторая константа).

На рисунке 6 представлены результаты, полученные при изменении декремента затухания D . Были проведены следующие изменения:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\text{рег}} = 1; \\ T_{\text{рег}} = 0,0385 \text{ с}; \\ D = \frac{1}{4}; \end{array} \right. \quad \text{(линия на графике обозначена красным цветом)}$$

– основной график;

Коэффициент $K_{\text{ус.рег}}$ был принят равным 1 для большей наглядности графиков.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\text{рег}} = 1; \\ T_{\text{рег}} = 0,0385 \text{ с}; \\ D = \frac{1}{8}; \end{array} \right. \quad \text{(линия на графике обозначена фиолетовым цветом)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\text{рег}} = 1; \\ T_{\text{рег}} = 0,0385 \text{ с}; \\ D = \frac{1}{2}; \end{array} \right. \quad \text{(линия на графике обозначена зеленым цветом)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\text{рег}} = 1; \\ T_{\text{рег}} = 0,0385 \text{ с}; \\ D = \frac{3}{4}; \end{array} \right. \quad \text{(линия на графике обозначена оранжевым цветом)}$$

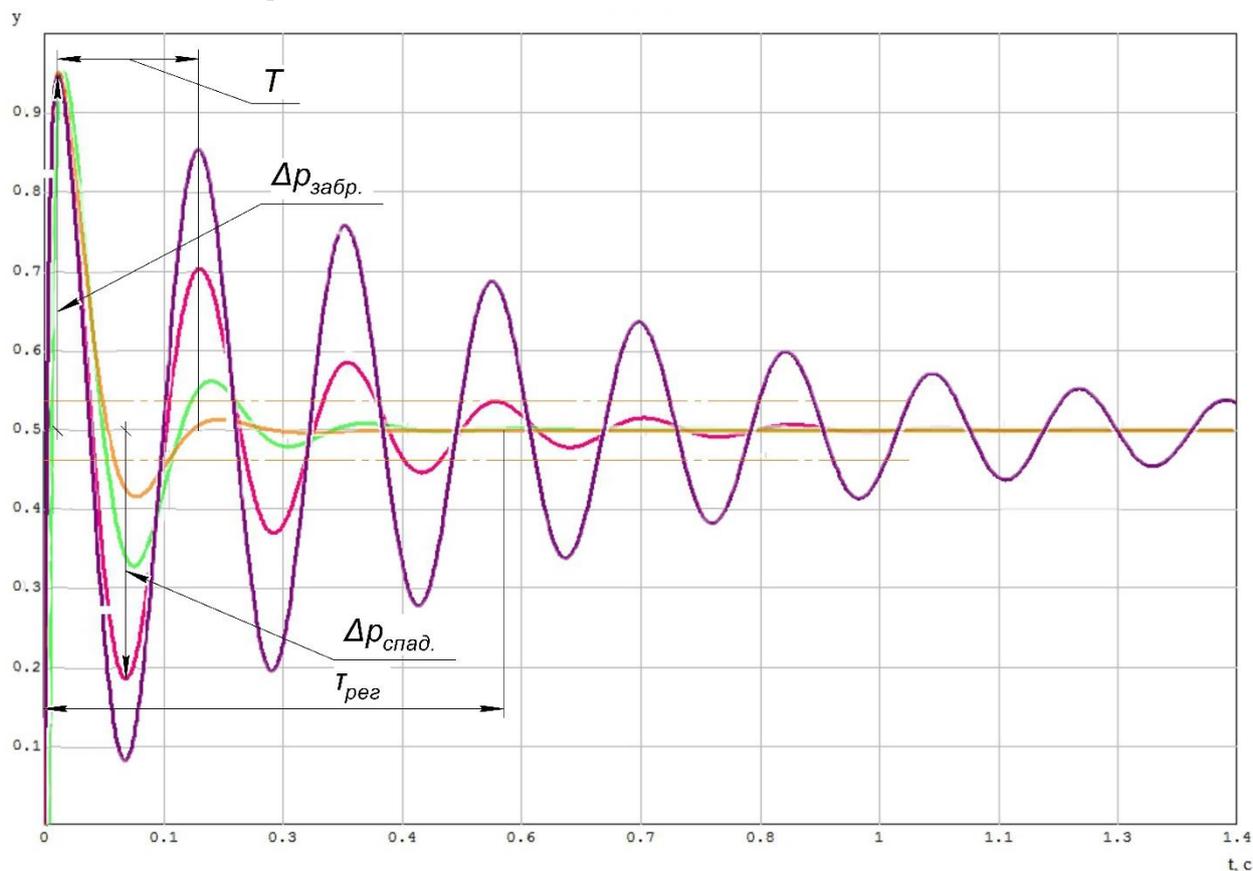


Рис. 6. Исследования логарифмического декремента затухания

Закономерности:

- 1) при уменьшении декремента затухания в два раза, мы наблюдаем увеличение времени регулирования и амплитуды колебаний;
- 2) при увеличении декремента затухания, так же в два и три раза, мы наблюдаем уменьшение времени регулирования и амплитуды колебаний;
- 3) изменение декремента затухания не влияет на период колебаний, а как следствие и на частоту.

На рисунке 7 приведены результаты, полученные при изменении постоянной времени регулятора $T_{рег.}$. Были проведены следующие изменения:

$$\begin{cases} K_{рег} = 1; \\ T_{рег} = 0,0385 \text{ с}; \\ D = \frac{1}{4}; \end{cases} \quad (\text{линия на графике обозначена красным цветом})$$

– основной график;

Коэффициент $K_{ус.рег}$ был принят равным 1 для большей наглядности графиков.

$$\begin{cases} K_{рег} = 1; \\ T_{рег} = 0,0192 \text{ с}; \\ D = \frac{1}{4}; \end{cases} \quad (\text{линия на графике обозначена фиолетовым цветом})$$

$$\begin{cases} K_{рег} = 1; \\ T_{рег} = 0,077 \text{ с}; \\ D = \frac{1}{4}; \end{cases} \quad (\text{линия на графике обозначена зеленым цветом})$$

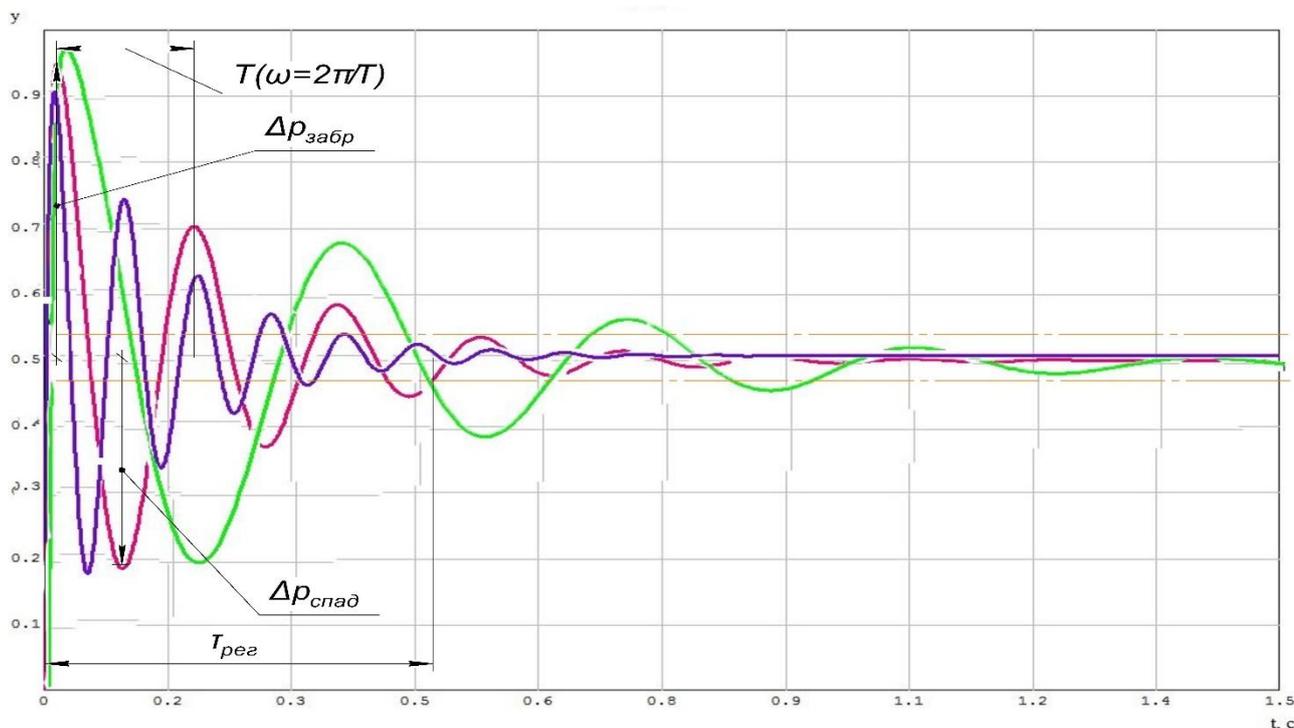


Рис. 7. Исследование постоянной времени регулятора

Закономерности:

1) при уменьшении постоянной времени регулятора, уменьшается время регулирования, амплитуда и период колебаний (как следствие и частота);

2) при увеличении постоянной времени регулятора, увеличивается время регулирования, амплитуда и период колебаний.

На рисунке 8 приведены рассмотрим результаты, полученные при изменении коэффициента усиления регулятора $K_{\text{ус.рег.}}$. Были проведены следующие изменения:

$$\begin{cases} K_{\text{рег}} = 0,001; \\ T_{\text{рег}} = 0,0385 \text{ с}; \\ D = \frac{1}{4}; \end{cases} \quad (\text{линия на графике обозначена красным цветом})$$

– основной график;

$$\begin{cases} K_{\text{рег}} = 0,1; \\ T_{\text{рег}} = 0,0385 \text{ с}; \\ D = \frac{1}{4}; \end{cases} \quad (\text{линия на графике обозначена фиолетовым цветом})$$

$$\begin{cases} K_{\text{рег}} = 1; \\ T_{\text{рег}} = 0,0385 \text{ с}; \\ D = \frac{1}{4}. \end{cases} \quad (\text{линия на графике обозначена зеленым цветом})$$

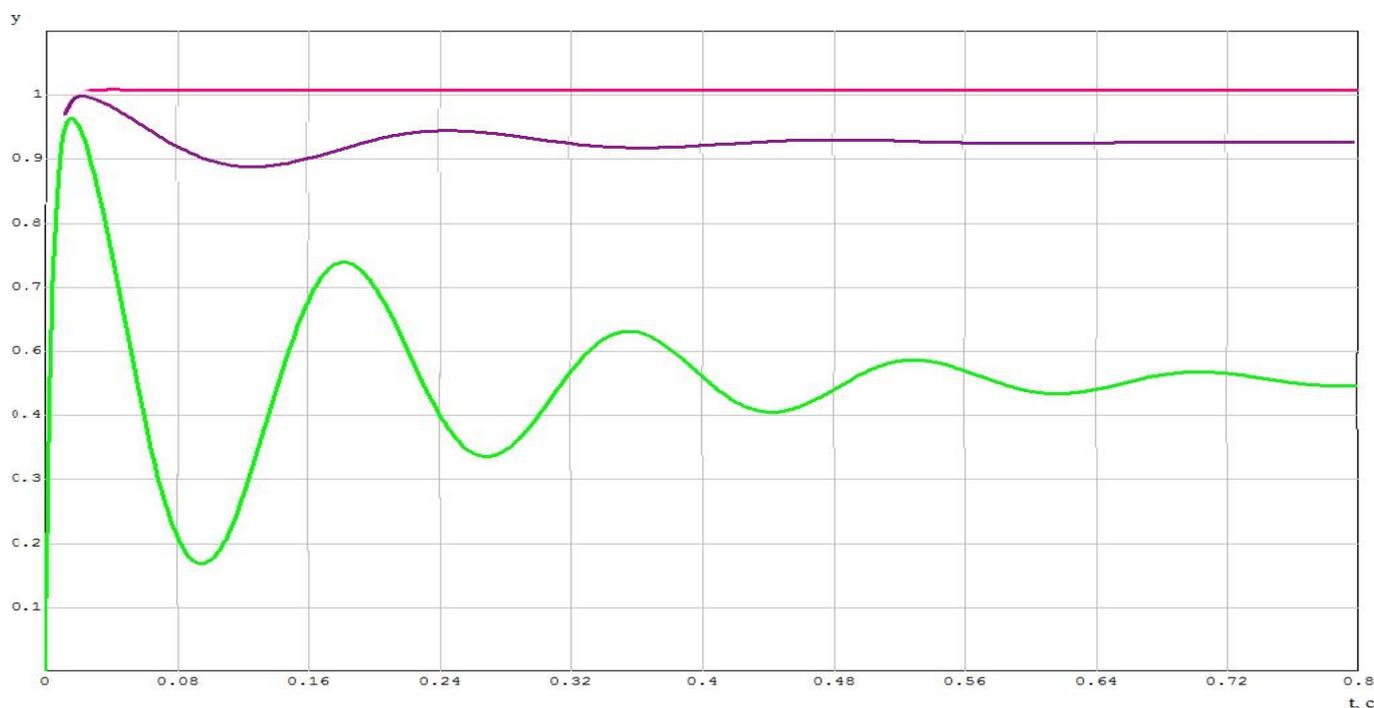


Рис. 8. Исследование коэффициента усиления регулятора

Чем меньше коэффициент усиления регулятора $K_{\text{ус.рег}}$ тем меньше время регулирования. Так как коэффициент усиления $K_{\text{ус.рег}}$ есть функция, зависящая от жесткости $F(s)$, чем больше общая жесткость системы, тем эффективнее работает регулятор.

Вывод: прямые оценки качества переходных процессов САУ принципиально могут быть сведены к комплексному показателю, запрещающему пребывание переходного процесса вне определённой области. Кроме прямых оценок качества переходных процессов применяются интегральные оценки, простейшей из которых может служить показатель

$$J_1 = \int_0^{\infty} y(t) dt,$$

где $y(t)$ – переходной процесс САУ (ординаты динамической ошибки).

Критерий J_1 , представляет собой алгебраическую сумму площадей под кривой переходного процесса.

В конечном итоге, чем меньше оценка J , тем быстрее затухает переходной процесс, тем меньше его динамическая ошибка, то есть выше качество системы.

Динамические свойства ЖГГ есть функция $F(D, T_{рег}, K_{ус.рег}, K_{ус.кк})$ совокупности следующих параметров: $D, T_{рег}, K_{ус.рег}, K_{ус.кк}$.

Заключение

Проведенный анализ указанных параметров показывает необходимость и значимость исследования их оптимальных значений.

Схемы современных ЖРД отличаются большой сложностью, при этом агрегаты связаны между собой. Вследствие этого при формировании математической модели ЖРД приходится использовать уравнения всех элементов и редко удается чем-то пренебречь. В результате математические модели оказываются довольно громоздкими: нелинейные модели содержат сотни уравнений (дифференциальных и алгебраических), а линейные – десятки.

Из-за недостаточной изученности ряда процессов (нестационарной кавитации в насосах, нестационарных течений в регулирующих устройствах, течений газа в каналах с отрывами потока и т.д.) многие модели являются приближенными и окончательное суждение о правомерности их использования можно сделать на основании экспериментальных данных.

Список литературы

- [1]. Васютин Ю.И., Смирнов И.А., Ягодников Д.А., Дерягин Ю.А., Гостев В.А. Агрегаты регулирования жидкостных ракетных двигательных установок: учебное пособие / под ред. Д. А. Ягодникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. 223 с.
- [2]. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. 656 с.
- [3]. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник / под ред. Д.А. Ягодникова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 496 с.

- [4]. Соломенцев Ю.М., Брюханов В.Н., Косов М.Г., Протопопов С.П. Теория автоматического управления. 3-е изд., стер. // Под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Высш.шк. 2000. 268 с.
- [5]. Гликман Б.Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. Изд.2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1989. 296 с.
- [6]. Кудрявцев В.М., Васильев А.П., Кузнецов В.А. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. Учебник. В 2 кн. Кн. 1. / Под ред. В.М. Кудрявцева. Изд. 4-е, перераб. и доп. М: Высшая школа. 1993. 383 с.
- [7]. Овсянников Б.В., Боровский Б.И. Теория и расчёт агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1986. 376 с.
- [8]. Деменков Н.П., Васильев Г.Н. Управление техническими системами. Учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. 399.
- [9]. Дорофеев А.А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. Теория, расчет и проектирование: учебник для вузов / Дорофеев А.А. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 571 с.
- [10]. Сухов А.В., Парыгин К.Э., Сергеев А. В., Гавриленко И.В. Топлива жидкостных ракетных двигателей: учеб. пособие по курсу "Топлива и рабочие процессы жидкостных ракетных двигателей" / ред. Сухов А.В. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. 37 с.