УДК 629.78.533.6.013:621.45 https://doi.org/10.15407/itm2019.03.016

Е. Л. ТОКАРЕВА, Н. С. ПРЯДКО, Е. В. ТЕРНОВАЯ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРОМ ТЯГИ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, Днепр, Украина, 49005; e-mail: tokel@ukr.net

Високе енергонапруження рідинного ракетного двигуна (РРД) та його агрегатів істотно позначається на динаміці перехідних процесів, що протікають в них та виникають при зміні положення керуючих органів. Для аналізу стійкості процесу керування й оцінки точності керування РРД необхідно знати динамічні частотні характеристики виконавчих органів системи керування (СК). Визначення якості перехідних процесів, рішення задачі вибору оптимального варіанту СК і аналіз її особливостей вимагають дослідження динамічних характеристик при різних значеннях динамічних параметрів (передавальних коефіцієнтів регуляторів, постійних часу і коефіцієнтів підсилення передавальних функцій окремих агрегатів РРД).

Для космічних ступенів ракет (КСР), з урахуванням специфіки їх функціонування, розглядається задача керування вектором тяги маршового РРД з використанням комбінованої системи керування вектором тяги (КСКВТ). КСКВТ для КСР складається з великогабаритної інтерцепторної газодинамічної системи керування вектором тяги (ГСКВТ) і системи керуючих реактивних сопел. Така комбінація виконавчих органів СК здатна ефективно виконувати програму польоту і парирувати нештатні збурення, що виникають при польоті КСР.

Мета роботи – розробка структурної схеми та розрахунок комплексної передавальної функції інтерцепторної ГСКВТ у складі КСКВТ, побудова частотних характеристик за попередніми оцінними значеннями динамічних параметрів для подальшого аналізу стійкості і якості КСУВТ.

Розроблено функціональну схему комбінованої системи керування маршового двигуна, що складається з інтерцепторного вузла вприскування (ІВВ) компонента палива як виконавчого органу ГСКВТ по каналу наведення та системи керуючих сопел як виконавчого органу каналу стабілізації КСР. Розроблено структурну схему ГСКВТ з ІВВ. За первинними оцінними значеннями динамічних параметрів розраховано перехідну функцію та амплітудно-фазові частотні характеристики комплексної передавальної функції ГСКВТ. Аналіз результатів числових досліджень дозволив виділити режим функціонування, що відповідає якісному процесу керування. Подальші дослідження спрямовані на аналіз якості (стійкості) ГСКВТ і пошук оптимальних комбінацій значень динамічних параметрів з метою підвищення ефективності КСКВТ для маршових двигунів КСР.

Ключові слова: *космічний ступінь ракети, ракетний двигун, система керування вектором тяги, динамічні характеристики, газодинамічна система, комбінована система керування.*

Высокая энергонапряженность жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) и его агрегатов существенно сказывается на динамике протекающих в них переходных процессов, которые возникают при изменении положения управляющих органов. Для анализа устойчивости и оценки точности процесса управления ЖРД необходимо знать динамические частотные характеристики исполнительных органов системы управления (СУ). Определение качества переходных процессов, решение задачи выбора оптимального варианта СУ и анализ ее особенностей требуют исследования динамических характеристик при различных значениях динамических параметров (передаточных коэффициентов регуляторов, постоянных времени и коэффициентов усиления передаточных функций отдельных агрегатов ЖРД).

Для космических ступеней ракет (КСР), с учетом специфики их функционирования, рассматривается задача управления вектором тяги маршевого ЖРД с использованием комбинированной системы управления вектором тяги (КСУВТ). КСУВТ для КСР состоит из крупногабаритной интерцепторной газодинамической системы управления вектором тяги (ГСУВТ) и системы управляющих реактивных сопел. Такая комбинация исполнительных органов СУ способна эффективно выполнять программу полета и парировать нештатные возмущения, возникающие при полете КСР.

Цель работы – разработка структурной схемы и расчет комплексной передаточной функции интерцепторной ГСУВТ в составе КСУВТ, построение частотных характеристик по предварительным оценочным значениям динамических параметров для дальнейшего анализа устойчивости и качества КСУВТ.

Разработана функциональная схема комбинированной системы управления маршевого двигателя, которая состоит из интерцепторного узла впрыска (ИУВ) компонента топлива как исполнительного органа ГСУВТ по каналу наведения и системы управляющих сопел как исполнительного органа канала стабилизации КСР. Разработана структурная схема ГСУВТ с ИУВ. По первоначальным оценочным значениям динамических параметров рассчитаны переходная функции и амплитудно-фазовые частотные характеристики комплексной передаточной функции ГСУВТ. Анализ результатов численных исследований позволил выделить режим функционирования, соответствующий качественному процессу управления. Дальнейшие исследования направлены на анализ качества (устойчивости) ГСУВТ и поиск оптимальных комбинаций значений динамических параметров с целью повышения эффективности КСУВТ для маршевых

© Е. Л. Токарева, Н. С. Прядко, Е. В. Терновая, 2019

двигателей КСР.

Ключевые слова: *космическая ступень ракеты, ракетный двигатель, система управления вектором тяги, динамические характеристики, газодинамическая система, комбинированная система управления.*

The high energy intensity of a liquid-propellant rocket engine (LPRE) and its units significantly affects the dynamics of transients caused by changes in control positions. To analyze the stability of the LPRE control process and to assess its accuracy, one has to know the dynamic frequency characteristics of the LPRE control system (CS) actuators. The determination of transient quality, the solution of the problem of choice of the optimum CS, and the analysis of its features call for studying the dynamic characteristics at different values of the dynamic parameters (the regulator transfer coefficients and the time constants and gains of the transfer functions of individual LPRE units).

For rocket space stages (RSSs), with account for the features of their operation, the problem of sustainer LPRE thrust vector control using a combined thrust vector control system (CTVCS) is considered. The RSS CTVCS consists of a large-size interceptor gas-dynamic trust vector control system (GDTVCS) and a system of control nozzles. This combination of CS actuators allows one to efficiently implement the flight program and counteract off-normal disturbances in the RSS flight.

The aim of this work is to develop a structural schematic for and to calculate the complex transfer function of an interceptor GDTVCS as a part of a CTVCS and to construct frequency characteristics from estimated dynamic parameters for further analysis of CTVCS stability and quality.

A functional diagram was developed for a sustainer engine CTVCS that consists of an interceptor unit (IU) for propellant component injection as a guidance actuator and a system of control nozzles as a stabilization actuator. A structural schematic for a GDTVCS with an IU was developed. The GDTVCS transition function and the amplitude-phase-frequency characteristics of the GDTVCS complex transfer function were calculated from estimated dynamic parameters. The analysis of the numerical results made it possible to identify GDTVCS operational conditions with dynamic characteristics that correspond to a high-quality control process. Further investigations will be aimed to analyzing GDTVCS quality (stability) and searching for optimal combinations of dynamic parameter values with the aim to increase RSS sustainer engine CTVCS efficiency.

Keywords: *rocket space stage, rocket engine, thrust vector control system, dynamic characteristics, gas-dynamic system, combined control system.*

Введение. Ракетные двигательные установки резко отличаются от других тепловых двигателей высокой энергонапряженностью процессов во всех основных агрегатах. Это существенно сказывается на динамике протекающих в них переходных процессов, которые возникают при изменении положения управляющих органов и характеризуются изменением во времени параметров двигателя. К переходным процессам жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) относятся его запуск, переход с режима на режим, останов, а также процессы, возникающие при несанкционированных изменениях характеристик отдельных агрегатов, связанных с нарушением их нормальной работы.

Для решения задач регулирования большое значение имеют динамические и статические характеристики ЖРД. Методики выбора параметров систем и расчета статических характеристик агрегатов и ЖРД в целом достаточно отработаны [1 – 5]. При создании новых схем ЖРД часто возникают проблемы с обеспечением устойчивости пневмогидравлических систем и показателей качества регулирования.

Система управления ЖРД включает в себя двигатель как объект регулирования и управляющие устройства (регуляторы, клапаны, дроссели и т. д.). Для оценки точности (статической и динамической) регулирования и анализа устойчивости этого процесса необходимо знать динамические характеристики обеих частей СУ. Определение качества переходных процессов, решение задачи выбора оптимального варианта системы управления (СУ) и анализ ее особенностей требуют исследования динамических характеристик при различных значениях динамических параметров (передаточных коэффициентов регуляторов, постоянных времени и коэффициентов усиления передаточных функций отдельных агрегатов ЖРД). Динамические частотные характери-

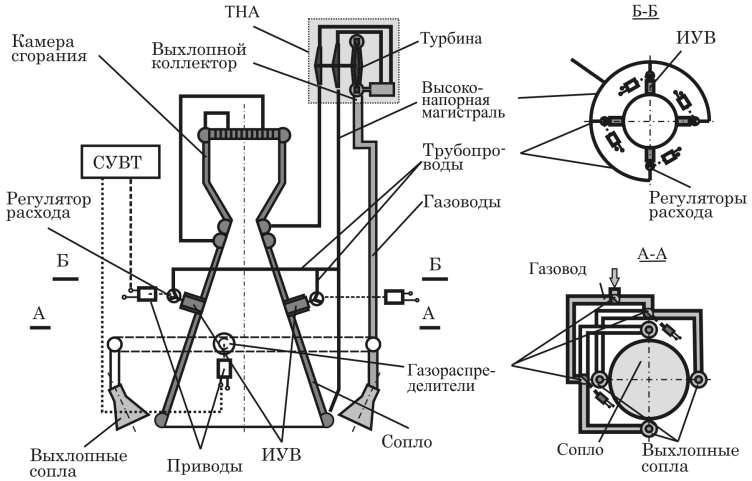
стики ЖРД используются также при разработке систем управления летательных аппаратов, для которых ЖРД является исполнительным органом.

Состояние вопроса. Специфика функционирования маршевых ракетных двигателей космических ступеней ракет (КСР) рассмотрена в [6, 7] и сводится к следующему:

– при периодически возникающей в полете ступени массовой асимметрии усложняется алгоритм работы системы управления КСР, расширяется необходимый диапазон регулирования ВТ, возрастают потери энергетики двигателя на управление полетом ступени;

– известные способы регулирования ВТ двигателя становятся неспособными с достаточной надежностью выполнять дополнительные функциональные задачи.

Для маршевых жидкостных двигателей КСР предложен и обоснован вариант комбинированной системы управления вектором тяги (КСУВТ) с крупногабаритной интерцепторной газодинамической системой управления вектором тяги (ГСУВТ) и системой управляющих реактивных сопел. Такая СУ способна эффективно выполнять программу полета и парировать возмущения, возникающие при полете КСР [7]. Схема КСУВТ для маршевых ЖРД КСР показана на рис. 1.



ИУВ – интерцепторный узел впрыска; СУВТ – система управления вектором тяги; ТНА – турбонасосный агрегат

Рис.1 – КСУВТ с интерцепторной ГСУВТ и системой управляющих реактивных сопел

Основной вклад в создание боковых и осевых управляющих усилий вносят выдвигаемые в сверхзвуковой поток сопла твердые интерцепторы (препятствия различной конфигурации на стенке сопла). Жидкий компонент топлива подается в сопло через интерцептор для его тепловой защиты. Интерцепторные ГСУВТ в состоянии парировать большие возмущения от массовой асимметрии ступени. Управляющие сопла решают задачу управления и стабилизации движения КСР.

При разработке динамической модели системы управления вектором тяги ЖРД сложная модель объекта составляется из автономных моделей отдельных его узлов (динамических звеньев). Такой подход упрощает задачу

составления модели и позволяет автономно исследовать свойства отдельных агрегатов, например с целью экспериментального уточнения каких-либо величин, закладываемых в расчетную модель агрегатов автомата. При составлении моделей динамических звеньев применяются аналитический и логический подходы. Аналитический подход применяется к объектам, при рассмотрении рабочих процессов в которых можно выделить какой-либо физический закон. В ином случае модель создается на основании анализа принципа работы объекта и логики формирования переменных.

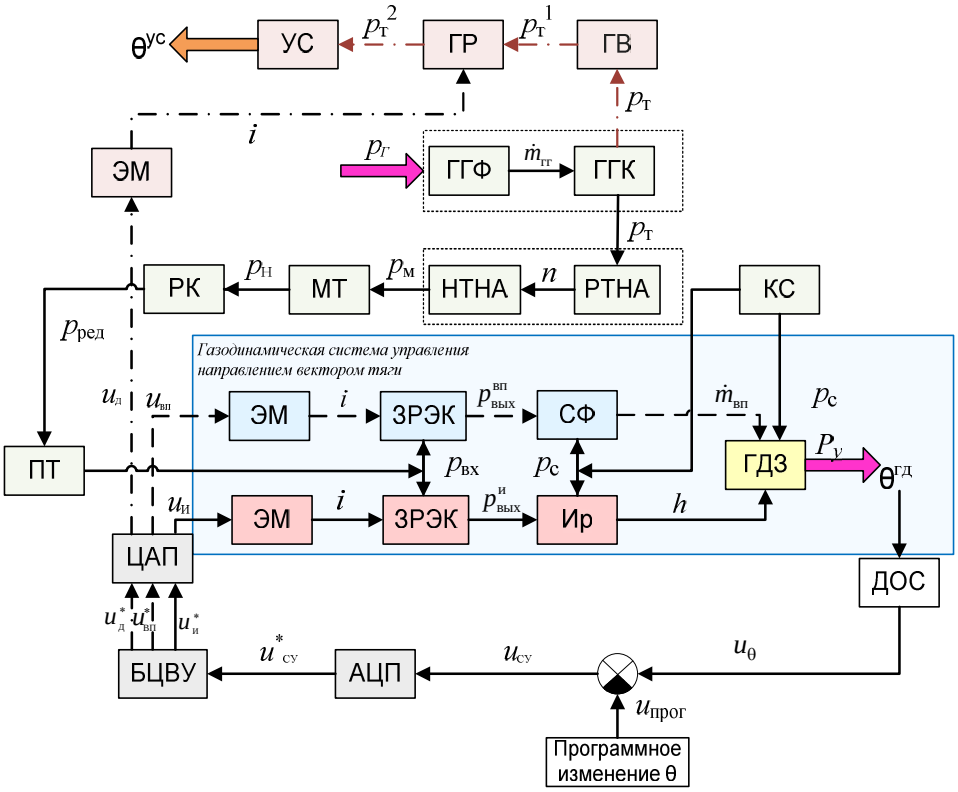
При решении различных задач динамики ЖРД требуемая степень приближения в описании процесса в том или ином узле различна. Так, при моделировании переходных процессов низкочастотных колебаний можно обойтись гораздо более простыми исходными уравнениями, описывающими движение в элементе СУ. И, наоборот, с увеличением характерных частот или с уменьшением постоянных времени процессов (например, при анализе аварийной ситуации) такие приближения становятся очень грубыми. Это приводит к необходимости усложнения модели за счет, например, учета распределенности параметров, учета нелинейности зависимостей переменных и др.

Цель работы заключается в разработке структурной схемы и расчете комплексной передаточной функции интерцепторной ГСУВТ в составе КСУВТ для КСР, построении частотных характеристик по предварительным оценочным значениям динамических параметров для дальнейшего анализа устойчивости и качества КСУВТ.

Материалы исследования Функциональная схема работы КСУВТ, состоящей из интерцепторного узла с впрыском компонента топлива как исполнительного органа ГСУВТ по каналу наведения КРС и системы управляющих сопел как исполнительного органа (ИО) канала стабилизации показана на рис. 2.

На выходе из цифрового аналогового преобразователя (ЦАП) сплошная линия на рис. 2 отображает сигнал по каналу наведения, относящийся к выдвижению интерцептора; штриховая линия – по каналу наведения, относящийся к впрыску окислителя; штрих-пунктирная – по каналу стабилизации, относящийся к работе управляющих сопел

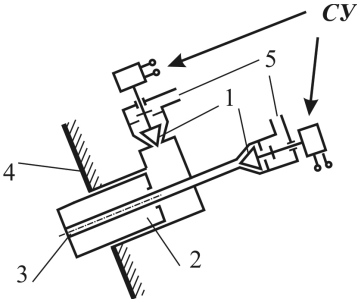
Рисунок отображает внутренние связи между составляющими СУВТ и агрегатами, обеспечивающими подвод компонента к исполнительным органам. Входным параметром на рис. 2 является давление $p_г$ в топливных магистралях перед газогенератором, куда компоненты топлива поступают после срабатывания открывающих клапанов. Газогенератор (ГГ) предназначен для выработки рабочего тела турбины турбонасосного агрегата (ТНА). Исходя из физики процессов в элементах газогенератора, его конструкция разделена на два динамических звена: форсуночную головку и камеру (куда входит также сопловой аппарат турбины) (на рис. 2 ГГФ и ГГК, соответственно). ТНА предназначен для обеспечения систем двигателя компонентами топлива и обеспечивает подачу рабочего тела с заданным расходом и давлением $p_м$. ТНА состоит из двух насосов, приводимых от газовой турбины, работающей на продуктах сгорания основных компонентов топлива. При проектировании динамики КСУВТ конструкция ТНА делится на два динамических звена: роторная часть (РТНА) и насосный агрегат (НТНА). К ИО ГСУВТ компонент топлива подается давлением $p_{вх}$, предварительно пониженным до $p_{ред}$ (по сравнению с давлением в напорной магистрали $p_н$) посредством установки редукционного клапана (РК).



АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; БЦВУ – бортовое цифровое вычислительное устройство; ГВ – газовод; ГГК – камера газогенератора; ГГФ – форсунки газогенератора; ГДЗ – газодинамическое звено; ДОС – датчик обратной связи; ЗРЭК – запорно-регулирующий электромагнитный клапан; Ир – интерцептор; КС – камера сгорания; РК – редукционный клапан; МТ – магистральные трубопроводы; НТНА – насосы турбонасосного аппарата; ПТ – подводящий трубопровод; РТНА – роторная часть турбонасосного аппарата; УС – управляющие сопла; ЦАП – цифрово-аналоговый преобразователь; СФ – струйная форсунка; ЭМ – электромагнит; ЭМП – электромагнитный преобразователь

Рис. 2 – Функциональная схема БСУВТ по одному каналу управления (тангаж или рыскание) маршевого двигателя

Интерцепторный узел впрыска (ИУВ) представляет собой электрогидравлический клапан, регулирующий давления для перемещения интерцептора и впрыска жидкого компонента топлива. Принципиальная схема ИУВ показана на рис. 3.



1 – запорно-регулирующие электромагнитные клапаны; 2 – интерцептор; 3 – форсунка впрыска; 4 – сопло; 5 – каналы подачи жидкого компонента топлива

Рис. 3 – Принципиальная схема интерцепторного узла впрыска

В состав ИУВ входят:

– запорно-регулирующие электромагнитные клапаны (ЗРЭК) 1, перекрывающие и регулирующие поступающий по каналам 5 расход компонента в зависимости от напряжения, подаваемого СУ на электромагнитный привод (ЭМП). Принцип действия электромагнитного привода основан на взаимодействии нескольких магнитных потоков. ЭМП воспринимает электрический сигнал и

преобразует его в пропорциональное поступательное или угловое перемещение подвижной части преобразователя – якоря, жестко связанного с управляемым элементом (запорным органом). В конструкции ЗРЭК предусмотрена возвратная пружина, сопротивление которой преодолевается при открытии клапана;

– выдвигаемый в сопло 4 интерцептор 2 с внутренней (внутри штока) форсункой впрыска компонента топлива 3. Интерцептор выдвигается под действием разности давлений, создаваемых напором через ЗРЭК и пружиной (механической или пневматической), предусмотренной в конструкции интерцепторного клапана. Компонент топлива впрыскивается под действием разности давлений, создаваемых напором через дроссель, и давлением в сопле.

Поскольку предусматривается, что выдвижение интерцептора и впрыск компонента могут функционировать автономно, эти процессы регулируют различные приводы.

Для наглядности отображения динамических связей на схеме (рис. 2) интерцепторный узел впрыска (ИУВ) разбит на четыре динамических звена: электромагнитное звено (ЭМ), запорно-регулирующий клапан (ЗРК), интерцептор (Ир) и струйная форсунка впрыска (СФ).

Динамическая цепочка подвода генераторного газа к управляющим соплам состоит из газоводов (ГВ на рис. 2), газовых редукторов и газораспределителя (ГР) с ЭМП.

Функционирование КСУВТ происходит следующим образом. При отклонении оси ракеты от положения, заданного программой полета, система управления фиксирует это отклонение $\Delta\theta$ и генерирует напряжение u_θ, пропорциональное отклонению. В результате сравнения этого напряжения с программным $u_{\text{прог}}$, на выходе из суммирующего устройства формируется сигнал системы управления $u_{\text{су}} = u_{\text{прог}} - u_\theta$. Входной непрерывный сигнал $u_{\text{су}}(t)$ в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) преобразуется в дискретную последовательность чисел $u^*_{\text{су}}[nT]$ (T – период квантования), которая поступает на вход бортового цифрового вычислительного устройства (БЦВУ). Здесь входной сигнал, в соответствии с заложенным в БЦВУ алгоритмом, распределяется между каналами СУ синхронной последовательностью чисел $u^*_{\text{д}}[nT], u^*_{\text{и}}[nT], u^*_{\text{вп}}[nT]$. Дискретные сигналы в цифро-аналоговом преобразователе (ЦАП) преобразуются в непрерывный сигнал $u_{\text{д}}$ на привод исполнительных органов канала стабилизации, $u_{\text{и}}$ на привод интерцептора и $u_{\text{ф}}$ на привод впрыска компонента. Напряжение по каждому каналу (для краткости обозначенное *u* без индексов) генерирует электрический ток *i* в обмотке индуктора электромагнита. Электродвижущая сила перемещает на величину *x* якорь ЭМП, регулируя параметры проходного сечения дроссельной части ЗРК или газораспределителя для управляющих сопел. В газодинамической СУВТ расход компонента, поступающего из ЗРК, регулирует соотношение сил, действующих на интерцептор, и обеспечивает его выдвижение в сверхзвуковую часть сопла на величину *h*. Препятствие, создаваемое интерцептором, реализует скачок уплотнения. За скачком уплотнения образуется область повышенного давления, где происходит отклонение газовой струи (на угол $\theta^{\text{гд}}$) в сторону оси сопла, которое вызывает отклонение всего газового потока и создает тем самым эксцентриситет тяги сопла с направлением, противоположным отклонению газового потока. Управление впрыском происходит автономно от управления движением интерцептора, расширяя функциональные возможности системы управления. При впрыске

компонента топлива через канал в интерцепторе (форсунку впрыска) жидкий компонент (с расходом $\dot{m}_{\text{вп}}$) поступает с избыточным давлением в сверхзвуковую часть сопла. Расход компонента регулируется в зависимости от цели впрыска. Основная цель впрыска компонента – это охлаждение поверхности интерцептора. Для создания дополнительного бокового усилия необходим больший расход компонента, тогда на границе сверхзвукового потока и паровой фазы жидкости реализуется дополнительный скачок уплотнения, создающий дополнительное боковое усилие $P_{\text{у}}$. Зависимости боковой силы от параметров интерцептора и впрыска составляют газодинамическое звено (ГДЗ).

Стабилизация полета КСР (угол $\theta^{\text{ус}}$) происходит за счет перераспределения генераторного газа между управляющими соплами. Напряжение, подаваемое на ЭМП газораспределителя, регулирует расход газа в управляющие сопла.

Датчик обратной связи (ДОС), представляющий собой индуктивный преобразователь угла поворота (потенциометр), отслеживает угол отклонения вектора тяги.

Структурная схема СУВТ составлена на основе функциональной схемы на рис. 2 по следующей последовательности выполненных работ:

– на основе анализа физических процессов в динамических звеньях в рамках линейной теории получены уравнения связи объекта управления и элементов управляющего устройства;

– полученные уравнения преобразованы в уравнения связи в форме преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях;

– каждое уравнение решено относительно изображения выходной величины, и рассчитаны передаточные функции для каждого динамического звена.

Динамика агрегатов ЖРД, осуществляющих подвод рабочих тел к исполнительным органам СУВТ, изложена в [2, 4]. Динамика ГСУВТ описывается следующей системой уравнений, записанных в изображениях по Лапласу, где $p = d/dt$:

– уравнение динамики электромагнитного привода, реализующего передачу управляющего сигнала – напряжения u – в выходной сигнал – силу тока i (u –> i)

$$\left(T_i^{\text{ЭМ}} p + 1\right)\overline{\Delta i} = \overline{\Delta u} - T_x^{\text{ЭМ}} p\,\overline{\Delta x}, \qquad (1)$$

с динамическими параметрами: $T_i^{\text{ЭМ}} = \dfrac{L}{R}$, $T_x^{\text{ЭМ}} = \dfrac{k_{Px} x_{\max}}{R i_{\max}}$, где x – перемещение якоря ЭМП; $k_{Px} = \left|\dfrac{\partial P_{\text{я}}}{\partial x}\right|_{\substack{i=0 \\ x=0}}$ – «жесткость» привода по перемещению (крутизна нагрузочной характеристики электромагнита); $P_{\text{я}}$ – сила тяги электромагнита; $i_{\text{мах}}$ – максимальная сила тока в катушке электромагнита; $x_{\text{мах}}$ – максимальное перемещение якоря ЭМП; L – индуктивность обмотки электромагнита; R – омическое сопротивление цепи обмотки управления.

– уравнение динамики механического звена запорно-регулирующего клапана, в котором реализуется цепочка преобразований по управляющему воздействию i –> x –> $p_{\text{вых}}$ ($p_{\text{вых}}^{\text{и}}$ или $p_{\text{вых}}^{\text{ф}}$), где $p_{\text{вых}}^{\text{и}}$ (или $p_{\text{вых}}^{\text{ф}}$) – давление в выходном канале ЗРЭК перед интерцептором (или форсункой впрыска)

$$(T_2^{\text{ЗРК}} p^2 + T_1^{\text{ЗРК}} p + 1)\overline{\Delta x} = K_i^{\text{ЗРК}}\,\overline{\Delta i} + K_p^{\text{ЗРК}}(\overline{\Delta p_{\text{вх}}} - \overline{\Delta p_{\text{вых}}}), \qquad (2)$$

с динамическими параметрами: $\psi = k_{Pi} + c_{\text{д}} + \dfrac{P_{\text{гд max}}}{x_{\text{max}}}$, $T_2^{\text{ЗРК}} = M_{\text{я}} / \psi$,

$T_1^{\text{ЗРК}} = k_{\text{тр д}} / \psi$, $K_i^{\text{ЗРК}} = k_{Pi} i_{\text{max}} / x_{\text{max}} \psi$, $K_p^{\text{ЗРК}} = F_{\text{м}} p_{\text{вх max}} / x_{\text{max}} \psi$,

где $k_{Pi} = \left| \dfrac{\partial P_{\text{я}}}{\partial i} \right|_{\substack{i=0 \\ x=0}}$ – «жесткость» ЭМП клапана по току управления; $M_{\text{я}}$ – приведенная к якорю масса всех взаимодействующих с ним частей; $k_{\text{тр д}}$ – коэффициент вязкого трения; $F_{\text{м}}$ – площадь миделя запорного органа (дросселя); $p_{\text{вх max}}$, $p_{\text{вых max}}$ – максимальное давление со стороны подвода рабочей жидкости и ее отвода соответственно; $c_{\text{д}}$ – жесткость возвратной пружины клапана, $P_{\text{гд max}}$ – максимальная гидродинамическая сила, возникающая при течении компонента через дроссель.

– динамическое уравнение для давления $p_{\text{вых}}$, подаваемого к управляющим органам, относительно перемещения x регулирующего органа ЗРК имеет вид

$$\overline{\Delta p}_{\text{вых}} = K_1^{\text{ЗРК}} \overline{\Delta p_{\text{вх}}} + K_2^{\text{ЗРК}} \overline{\Delta x}, \qquad (3)$$

с динамическими параметрами:

$$K_1^{\text{ЗРК}} = \frac{p_{\text{вх max}}}{p_{\text{вых max}}}; \quad K_2^{\text{ЗРК}} = 2 \frac{p_{\text{вых max}} - p_{\text{вх max}}}{p_{\text{вх max}}} \left(\mu \frac{x_{\text{max}}}{F_{\text{max}}} k_{fx} - \frac{x_{\text{max}}}{\dot{m}_{\text{max}}} k_{mx} \right),$$

где $\dot{m}_{\text{max}}$ – максимальный расход через клапан; k_{fx} – коэффициент линейной зависимости площади проходного сечения дросселя от хода якоря (коэффициент передачи клапана по площади проходного сечения); k_{mx} – коэффициент передачи клапана по расходу; μ – коэффициент расхода через проходное сечения дросселя; F_{max} – максимальная площадь проходного сечения.

– уравнение динамики интерцептора с динамической связью $p^{\text{и}}_{\text{вых}}$ –> h, где h – ход интерцептора

$$(T_2^{\text{И}} p^2 + T_1^{\text{И}} p + 1) \overline{\Delta h} = K_1^{\text{И}} \overline{\Delta p}_{\text{вых}}, \qquad (4)$$

с динамическими параметрами: $K_1^{\text{И}} = F_{\text{и}} \dfrac{p^{\text{и}}_{\text{вых max}}}{h_{\text{max}} c_{\text{и}}}$, $T_2^{\text{И}} = \dfrac{M_{\text{и}} h_{\text{max}}}{c_{\text{и}}}$, $T_1^{\text{И}} = \dfrac{k_{\text{тр и}}}{c_{\text{и}}}$,

где h_{max} – максимальный ход интерцептора; $M_{\text{и}}$ – масса движущихся частей интерцепторного клапана; $c_{\text{и}}$ – жесткость возвратной пружины (механической или пневматической); $k_{\text{тр и}}$ – коэффициент трения поверхностей подвижных элементов интерцептора со стенками втулки; $p^{\text{и}}_{\text{вых max}}$ – давление перед интерцептором; $F_{\text{и}}$ – площадь поверхности торца поршня, жестко связанного с интерцептором, со стороны выходного канала регулирующего клапана.

– уравнение динамики струйной форсунки впрыска (в предположении, что струйная форсунка впрыска представляет собой трубку постоянного се-

чения с гладкими внутренними стенками) с динамической управляющей связью $p^{вп}_{вых}$ –> $\dot{m}_{вп}$, где $\dot{m}_{вп}$ – расход впрыскиваемой жидкости

$$\overline{\Delta\dot{m}_{вп}} = K_1^{СФ}\overline{\Delta p^{вп}_{вых}} + K_2^{СФ}\overline{\Delta p_c}, \qquad (5)$$

с динамическими параметрами: $K_1^{СФ} = \frac{1}{2}\frac{p^{вп}_{вых\ мах}}{p^{вп}_{вых\ мах} - p_{с\ ном}}$, $K_2^{СФ} = \frac{1}{2}\frac{p_{с\ ном}}{p_{с\ ном} - p^{вп}_{вых\ мах}}$,

где $p^{вп}_{вых\,мах}$ – давление на входе в струйную форсунку, оно же выходное давление регулятора впрыска; $p_{с\,ном}$ – давление на поверхности сверхзвуковой части сопла в месте установки узла впрыска.

– уравнения динамики газодинамического звена при выдвижении интерцептора и впрыске компонента с динамическими связями h –> $\overline{P^{и}_{у}}$ и $\dot{m}_{вп}$ –> $\overline{P^{вп}_{у}}$ соответственно, где $\overline{P^{и}_{у}}$ и $\overline{P^{вп}_{у}}$ – отнесенные к тяге сопла боковые силы, генерируемые вводом интерцептора и впрыском компонента

$$\overline{P^{и}_{у}} = K_{и}^{ГДЗ}\overline{h}, \quad \overline{P^{ф}_{у}} = K_{вп}^{ГДЗ}\overline{\dot{m}}_{вп}, \qquad (6)$$

с динамическими параметрами: $K_{и}^{ГДЗ} = f(p^{и}_{вых\,мах})$, $K_{вп}^{ГДЗ} = f(p^{вп}_{вых\,мах})$, которые зависят от управляющих давлений и определяются на основании экспериментальных исследований [11, 12].

При выводе динамических уравнений принимались допущения о линейной зависимости входящих в уравнения переменных величин. Допущения оправданы тем, что при проектировании и отработке реальных двигателей, одновременно с применением модели для решения различных задач, проводят идентификацию модели, используя результаты испытаний двигателей. По результатам испытаний могут уточняться значения эмпирических коэффициентов и меняться конструктивные решения регуляторов для достижения оптимальных передаточных коэффициентов.

Структурная схема интерцепторной ГСУВТ, соответствующая функциональной схеме, приведенной на рис. 2 (в части, характеризующей газодинамический канал управления), показана на рис. 4. На схеме отображены передаточные функции исполнительных органов системы управления, полученные из уравнений (1) – (6). Схема иллюстрирует последовательность прохождения основного управляющего и возмущающих сигналов до выходного значения – угла поворота оси сопла. Сплошная линия отображает последовательность преобразований управляющего входного сигнала – напряжения, подаваемого КСУВТ на приводы регуляторов выдвижения интерцептора и впрыска компонента (процессы прохождения сигналов параллельны); штриховые линии – сигналов по возмущениям. Возмущающими сигналами являются редуцированное давление – штриховая линия на рис. 4 – и давление на стенке сверхзвуковой части сопла в месте установки интерцепторного узла – штрихпунктирная линия на рис. 4.

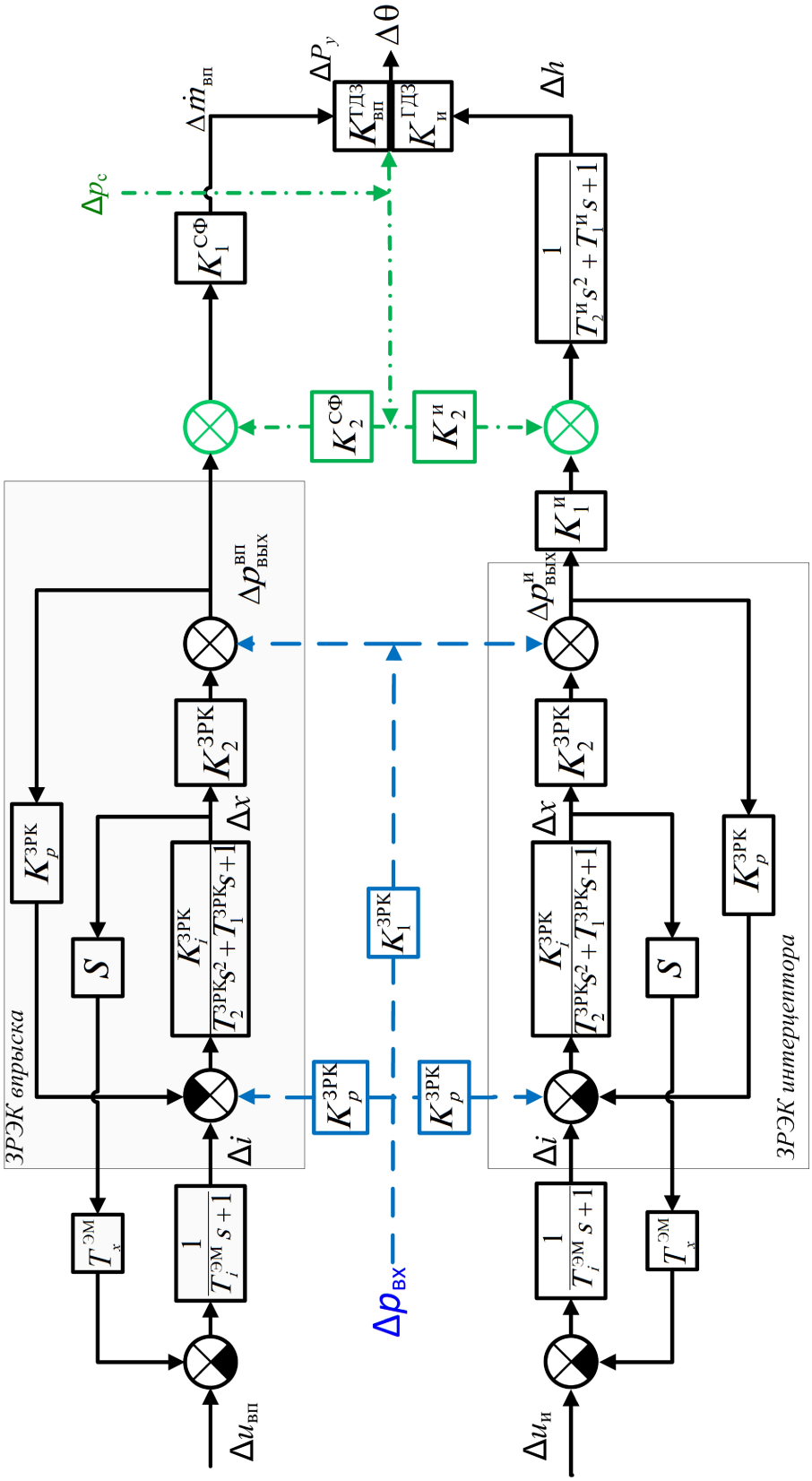


Рис. 4 – Структурная схема интерцепторной ГСУВТ с впрыском компонента топлива

Динамическая система на рис. 4 разомкнута, обратная связь на данном этапе исследований не рассматривается. Это оправдано тем, что частотный критерий устойчивости динамической системы (критерий Найквиста) позволяет оценивать устойчивость (или неустойчивость) замкнутой линейной регулирующей системы с единичной главной обратной связью по динамическим характеристикам разомкнутой системы [8].

В рамках линейной модели все звенья динамической цепочки ГСУВТ относятся к типовым динамическим звеньям с соответствующими типами передаточных функций и переходными процессами. Входной управляющий сигнал (вводом интерцептора и впрыском компонента) сначала проходит через последовательное соединение инерционного динамического звена, соответствующего электромагниту, и колебательного звена, соответствующего ЗРЭК, с отрицательными обратными связями по перемещению якоря и выходному давлению. Далее, по цепочке динамических звеньев управлением впрыском компонента, сигнал только меняет свой уровень, а по цепочке управления выдвижением интерцептора имеет характерный переходной процесс, соответствующий клапану, управляющему выдвижением интерцептора.

Комплексная передаточная функция ГСУВТ $W(s)$ (где $s = j\omega$ – комплексная величина, ω – частота сигнала), соответствующая приведенной структурной схеме, получена с использованием функционального аппарата среды МАТЛАБ. Коэффициенты комплексной передаточной функции зависят от динамических параметров отдельных исполнительных органов. Динамические параметры зависят от конструктивных решений органов управления, рабочих процессов внутри агрегатов ЖРД и, в некоторых случаях, определяются по результатам экспериментальных исследований.

При исследовании динамических характеристик комплексной передаточной функции и построении соответствующих графиков, значения динамических параметров рассчитываются исходя из многих факторов, в частности номинальных (или максимально возможных) значений параметров функционирования реального двигателя; данных экспериментов; физики процессов, отражающих принцип работы органов управления; размеров исполнительных органов; свойств рабочего тела; параметров нормирования переменных величин при выводе динамических уравнений и других факторов. Также учитывается, что из-за высокой энергонапряженности постоянные времени отдельных агрегатов ЖРД малы – порядка сотых или тысячных долей секунды, и только в отдельных случаях они составляют десятые доли секунды [9]. Поскольку при выводе динамического уравнения для интерцептора принята линейная зависимость для силы сухого трения, учитывается тот факт, что трение металлических поверхностей в вакууме сопровождается большим коэффициентом трения [10].

На данном этапе исследований динамики интерцепторной ГСУВТ с впрыском компонента топлива, впрыск используется только для охлаждения интерцептора и не вносит дополнительного вклада в создание управляющего усилия. Поэтому характеристики строятся для динамической системы, состоящей из цепочки звеньев, управляющих выдвижением интерцептора. При численных расчетах значения динамических параметров варьировались в допустимых пределах с целью выбора оптимального, с точки зрения качества процесса, сочетания значений как самих параметров, так и характеристик регуляторов, определяющих эти параметры. Проведенные численные иссле-

дования показали существенное влияние значений динамических параметров на характер переходного процесса и его частотные характеристики. На рисунках ниже приведены динамические характеристики при следующих значениях динамических параметров:

$$T_i^{\text{ЭМ}} = 0{,}026,\ T_x^{\text{ЭМ}} = 0{,}0003,\ K_i^{\text{ЗРК}} = 0{,}1,$$
$$T_2^{\text{ЗРК}} = 0{,}00002,\ T_1^{\text{ЗРК}} = 0{,}01,\ K_p^{\text{ЗРК}} = 6,\ K_2^{\text{ЗРК}} = 2, \qquad (7)$$
$$K_1^{\text{И}} = 1{,}25\ T_2^{\text{И}} = 0{,}001,\ T_1^{\text{И}} = 0{,}011,\ K_{ГДЗ}^{\text{и}} = 0{,}007.$$

Состояние динамической системы оценивается на основании анализа ее переходного процесса при некотором типовом входном воздействии. Обычно в качестве такого воздействия используется единичный скачок 1(t), при этом кривая переходного процесса для регулируемой величины представляет собой переходную характеристику системы $h(t)$. Переходная характеристика ГСУВТ с интерцепторным узлом впрыска для регулируемой величины θ(t) по управляющему воздействию, построенная по предварительным оценочным значениям динамических параметров (7), показана на рис. 5.

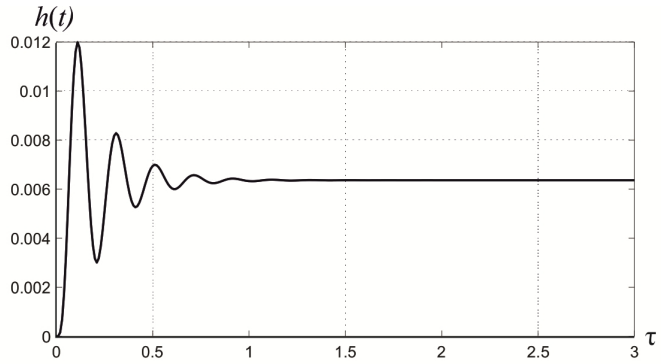


Рис. 5 – Переходная функция интерцепторной ГСУВТ с впрыском

В качестве функции работоспособности СУ используется амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ), которая определяется как годограф (след движения конца) вектора $|W(s)|$, построенный на комплексной плоскости в зависимости от частоты ω. АФЧХ, соответствующая переходному процессу на рис. 5, построена в осях вещественной Re(ω) и мнимой Im(ω) составляющей комплексной передаточной функции и показана на рис. 6.

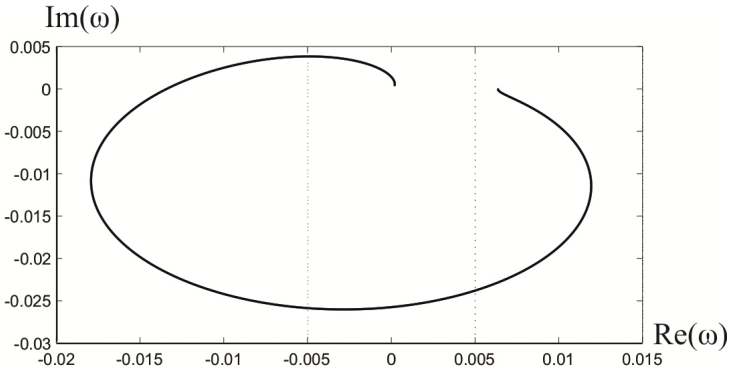
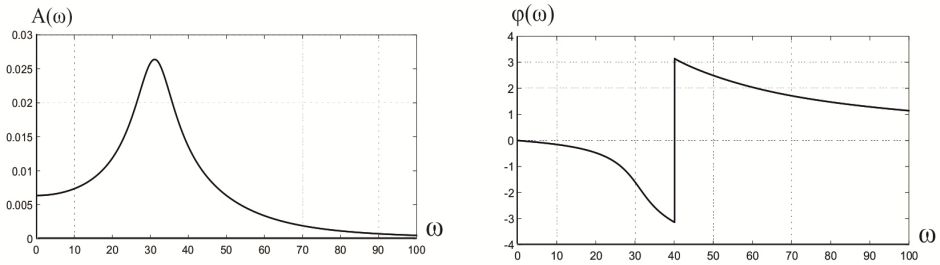


Рис. 6 – АФЧХ интерцепторной ГСУВТ с впрыском

На рис. 7, а) приведена амплитудная частотная характеристика (АЧХ) A(ω) – график, характеризующий усиление или ослабление входных гармонических сигналов различной фиксированной частоты в установившемся режиме. На рис. 7, б) приведена фазовая частотная характеристика (ФЧХ) φ(ω) – график, характеризующий сдвиг по фазе гармонических выходных сигналов относительно входных различной фиксированной частоты в установившемся режиме.



а) б)

а) АЧХ; б) ФЧХ

Рис. 7 – АЧХ и ФЧХ интерцепторной ГСУВТ с впрыском

Амплитудные и фазовые частотные характеристики обладают высокими информативными свойствами и служат основой для оценки устойчивости и качества динамической системы.

Численные исследования показали, что удовлетворительные (с точки зрения качества управления) динамические характеристики соответствуют режиму функционирования системы, при котором колебательному звену регулирующего клапана соответствует инерционный переходной процесс, а интерцепторному клапану – колебательный. За счет обратной связи по давлению в обоих колебательных звеньях устанавливается согласованный затухающий колебательный режим. Режим функционирования ГСУВТ, при котором колебательным звеньям регулирующего и интерцепторного клапана соответствует колебательный переходной процесс, требует дальнейших исследований по поиску устойчивых зависимостей для значений динамических параметров, согласующих уровень колебаний в этих звеньях. Возможно, что в рамках линейной теории не удастся избежать автоколебаний интерцепторного клапана и с целью коррекции динамических свойств (устойчивости) системы потребуется использование нелинейных характеристик.

Предварительные численные исследования устойчивого режима работы ГСУВТ позволили выделить следующие закономерности:

- При пропорциональном (относительно друг друга) увеличении значений динамических параметров передаточной функции интерцепторного клапана увеличивается время выхода сигнала на установившийся режим; переходной процесс при этом сопровождается увеличением амплитуды и уменьшением частоты колебаний системы. Увеличение значений параметров соответствует уменьшению жесткости возвратной пружины в конструкции клапана.
- Увеличение значения коэффициента усиления обратной связи по давлению, которое подводится от регулирующего давление клапана к интерцептору, уменьшает амплитуду колебаний, не меняя их частоту. Значение этого коэффициента в основном определяется величиной редуцированного давления в подводящей магистрали СУВТ ЖРД.

Увеличение значения коэффициента усиления обратной связи по давлению, которое подводится от регулирующего давление клапана к интерцептору, уменьшает амплитуду колебаний, не меняя их частоту. Значение этого коэффициента в основном определяется величиной редуцированного давления в подводящей магистрали СУВТ ЖРД.

Дальнейшие исследования направлены на анализ качества (устойчивости) ГСУВТ и поиск оптимальных сочетаний характеристик регуляторов, определяющих значения динамических параметров, с целью повышения эффективности схемы КСУВТ для маршевых двигателей КСР.

Выводы. Разработана функциональная схема комбинированной СУВТ маршевого двигателя по каналу управления (тангаж или рыскание). Система управления состоит из интерцепторного узла с впрыском компонента топлива как исполнительного органа газодинамической системы управления направлением вектором тяги по каналу наведения и системы управляющих сопел как исполнительного органа канала стабилизации. Разработана структурная схема и получена комплексная передаточная функция ГСУВТ с интерцепторным узлом впрыска. Для этой системы управления рассчитаны переходная функция и амплитудно-фазо-частотные характеристики передаточной функции. Анализ результатов численных исследований позволил выделить режим функционирования ГСУВТ с динамическими характеристиками, соответствующими качественному процессу управления. Дальнейшие исследования направлены на анализ устойчивости ГСУВТ. Для повышения эффективности комплексной СУВТ для маршевых двигателей КСР необходимо также найти оптимальные сочетания характеристик регуляторов, определяющих значения динамических параметров.

Исследования выполнены за счет финансирования по бюджетной программе “Поддержка развития приоритетных направлений научных исследований” (КПКВК 6541230).

1. *Гликман Б. Ф.* Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989. 296 с
2 *Бабкин А. И., Белов С. И., Рутковский Н. Б. и др.* Основы теории автоматического управления ракетными двигательными установками. М.: Машиностроение. 1989. 456 с.
3 *Махин В. А., Присняков В Ф., Белик Н. П.* Динамика жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение. 1969. 383 с.
4 *Мошкин Е. К.* Динамические процессы в ЖРД. М.: Машиностроение. 1964. 254 с..
5 *Попов Е. П.* Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука. 1989. 304 с.
6 *Kovalenko N. D., Sheptun U. D., Kovalenko T. A., Strelnikov G. A.* The new concept of thrust vector control for rocket engine. Системні технології. 2017. № 6 (107). С. 120–127.
7 *Коваленко Т. А., Коваленко Г. Н., Сироткина Н. П.* Управление вектором тяги ЖРД космической ступени ракеты-носителя при возникновении массовой асимметрии. Техническая механика. 2016. № 1. С 51–59.
8 *Зайцев Г. Ф.* Теория автоматического управления и регулирования. К.: Вища школа. 1989. 431 с.
9 *Мамонова М. В., Прудников В. В., Прудникова И. А.* Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы. Физмат лит. 2011. 400 с.
10 *Гимадиев А. Г.* Автоматика и регулирование двигательных установок ракетных и космических систем. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет. 2010. 201 с.
11 *Коваленко Н. Д.* Управление сверхзвуковыми газовыми потоками в реактивных соплах. Киев: Наукова думка. 1992. 208 с.
12 *Коваленко Н. Д.* Ракетный двигатель как исполнительный орган системы управления полетом ракет. Днепропетровск: Институт технической механики НАН и НКА Украины. 2004. 412 с.

Получено 10.08.2019,
в окончательном варианте 26.09.2019