

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

**АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРОМ ТЯГИ  
РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*Аннотация. Для программного управления полетом ступени ракеты необходимы, как правило, значительные управляющие усилия. При стабилизации полета, как правило, необходимо парировать возмущения высокой частоты и малой амплитуды, то есть необходимо обеспечить высокое быстродействие системы управления вектором тяги. В этом случае малая амплитуда осцилляций (относительно программного управляющего усилия) не требует больших управляющих усилий на их парирование, а значит больших потерь удельного импульса двигателя на парирование высокочастотной составляющей возмущающих воздействий на ступень ракеты.*

*Цель работы – исследование характеристик входных сигналов системы управления вектором тяги рулевых двигателей применительно к комбинированной системе управления РД и построение оптимального алгоритма ее функционирования.*

*Разработан алгоритм функционирования комбинированной (механической и газодинамической) системы управления вектором тяги ракетного двигателя. Проанализированы возможные методы определения существования тренда входного сигнала. Исследована типичная зависимость выходных управляющих воздействий для рулевого РД от входных сигналов на различных временных интервалах его работы. Представленный алгоритм предусматривает обработку входного сигнала СУВТ с выделением детерминированной составляющей (тренда) и высокочастотных осцилляций сигнала, а также учет вида тренда фиксированных возмущений угла отклонения вектора тяги РД. Разработанный алгоритм позволяет оптимальным образом разделять функции подсистем (МСУВТ и ГСУВТ) комбинированной системы управления, повысить качество и надежность системы управления полетом ступени ракеты.*

*Ключевые слова: ракетный двигатель, вектор тяги, комбинированная (бифункциональная) система управления, тренд.*

**Введение.** Новая концепция комбинированной системы управления ракетным двигателем (РД) заключается в сочетании различных систем управления (механической (МСУВТ) и газодинамической (ГСУВТ)) в рамках одной бифункциональной (БСУВТ) системы управления вектором тяги (СУВТ), выпол-

няющей функции управления и стабилизации полета ступени ракеты. БСУВТ позволяет реализовать новые подходы (декомпозицию задачи управления полетом ступени) к функционированию системы управления вектором тяги ракетного двигателя [1]. Однако в связи с сочетанием двух подсистем в системе управления с различными конструктивными и динамическими характеристиками появляется проблема согласования их функционирования. В частности, возникают задачи рационального распределения функций между подсистемами в составе системы управления полетом ступени ракеты в условиях штатных и нештатных ситуаций.

**Постановка проблемы.** Для программного управления полетом ступени ракеты необходимы, как правило, значительные управляющие усилия. При стабилизации полета, как правило, необходимо парировать возмущения высокой частоты и малой амплитуды, то есть необходимо обеспечить высокое быстродействие системы управления вектором тяги. В этом случае малая амплитуда осцилляций (относительно программного управляющего усилия) не требует больших управляющих усилий на их парирование, а значит больших потерь удельного импульса двигателя на парирование высокочастотной составляющей возмущающих воздействий на ступень ракеты. Вышеизложенное показывает необходимость разработки оптимального алгоритма одновременного функционирования МСУВТ и ГСУВТ в составе БСУВТ. Такой алгоритм предусматривает обработку командного (управляющего) сигнала СУВТ с целью выделения детерминированной (статической) составляющей – тренда и высокочастотных осцилляций (отклонения от тренда) [2].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для автоматического управления вектором тяги РД используются измеренные датчиками отклонения по углу  $\varphi$  в определенной плоскости, например, в плоскости тангажа, которые характеризуют нарушения в направлении движения установки. Эти данные телеметрической информации являются входными данными СУВТ. Вычислительные устройства цифровых контроллеров, реализующие алгоритм распределения управляющих усилий между составляющими БСУВТ на основе анализа входного сигнала, являются дискретными системами, оперирующими с дискретными сигналами, т.е. сигналами, принимающими определенные значения только в дискретные равноотстоящие моменты времени через интервал повторения. Поэтому при разработке алгоритма комбинированной СУВТ удобно применить принятое в технике управления технологическими процессами квантование временных функций, т.е. преобразование непрерывных функций

входного сигнала  $X(t)$  и управляющего воздействия  $Y(t)$  в соответствующие дискретные  $X[nT]$  и  $Y[nT]$ , где  $T$  – интервал квантования, с помощью импульсного элемента. Дискретные сигналы представляют собой последовательности распределенных по времени чисел, поэтому при исследовании применяется математический аппарат анализа временных рядов. Таким образом, входные сигналы представляют собой последовательность случайных величин – одномерный случайный сигнал  $X(1), X(2), X(3), \dots, X(n)$  или последовательность случайных векторов  $[X(1)], [X(2)], \dots, [X(n)]$  – многомерный дискретный случайный сигнал. Свойства дискретных сигналов и их использование для решения задач прогнозирования и управления рассмотрены в работе [3].

На первом этапе анализа входящих сигналов необходимо разделить сигналы для создания управляющих усилий разными системами управления комбинированной СУВТ. В работе [2] показано, что быстродействие МСУВТ имеет оптимум, т.к. с повышением ее быстродействия возрастает чувствительность к высокочастотным случайным возмущениям и, следовательно, увеличиваются случайные ошибки. Кроме того, повышение быстродействия системы приводит к существенному усложнению ее элементов и, в частности, к повышению мощности, а также массы и габаритов рулевого привода качания двигателя (камеры). Важным преимуществом БСУВТ является значительно меньшая инерционность одного контура (ГСУВТ) по сравнению с другим (МСУВТ). Таким образом, переходные процессы в малоинерционном контуре СУ практически затухают до того, как они возникнут в инерционном контуре. Таким образом, ГСУВТ обеспечивает любые заданные требования по быстродействию, а МСУВТ – максимальные управляющие усилия при минимальной мощности приводов и максимальной простоте элементов системы управления вектором тяги в целом.

**Цель работы** – исследование характеристик входных сигналов системы управления вектором тяги рулевых двигателей применительно к комбинированной системе управления РД и построение оптимального алгоритма ее функционирования.

Согласно [1], из общего распределения входного сигнала (угла  $\varphi$  поворота камеры) следует выделить низкочастотные сигналы большой амплитуды, для которых можно определить среднестатистический тренд (основную тенденцию изменения значений сигнала), и высокочастотные осцилляции малой амплитуды (отклонения от тренда). Эти разные по характеру возмущения (сигналы) предлагается подавлять управляющими усилиями разных СУВТ: низкочастот-

ные (отклонения угла до 5 град) МСУВТ, высокочастотные осцилляции – ГСУВТ. На рис. 1 представлены результаты Фурье-анализа отклонений угла  $\varphi$  на  $0 - 15^\circ$ .

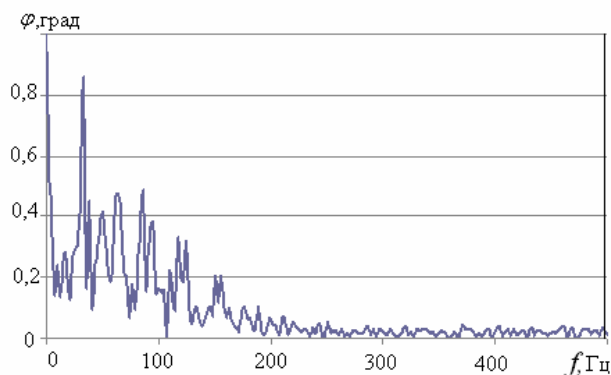


Рисунок 1 – Амплитудно-частотные характеристики отклонений угла вектора тяги РД

**Основная часть.** В данной работе основное внимание будет уделено анализу низкочастотных сигналов. На рис. 2 показаны данные телеметрической информации по углу отклонения в плоскости тангажа первой камеры сгорания ДУ 11Д520 (двигателя 1-й ступени ракеты «Зенит-2S») [2]. Рассмотрим характерные временные интервалы 1-4 для данной записи данных: (0 с; 4 с), (4 с; 6,5 с), (6,5 с; 12 с) и (12 с; 16 с).

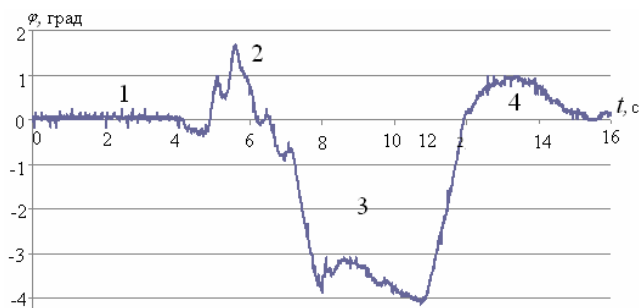


Рисунок 2 – Запись входных сигналов МСУВТ

Записанные датчиками отклонения по углу вектора тяги в некоторой области представляют собой временной ряд. Анализ временных рядов предполагает, что данные содержат систематическую составляющую (обычно включающую несколько компонент) и случайный шум (ошибку), который затрудняет обнаружение регулярных компонент. Динамический ряд теоретически может быть представлен в виде составляющих [3]: тренд – основная тенденция развития динамического ряда (к увеличению либо снижению его уровней); циклические (периодические) колебания; случайные колебания.

Изучение тренда включает два основных этапа: динамический ряд проверяется на наличие тренда; производится выравнивание временного ряда и непосредственное выделение тренда с экстраполяцией полученных результатов.

Проверка на наличие тренда в динамическом ряду может быть осуществлена по нескольким критериям.

В методе *средних* изучаемый ряд динамики разбивается на несколько интервалов (обычно на два), для каждого из которых определяется средняя величина. Выдвигается гипотеза о существенном различии средних. Если эта гипотеза принимается, то признается наличие тренда.

Суть *фазочастотного* критерия знаков первой разности заключается в следующем: наличие тренда в динамическом ряду утверждается в том случае, если этот ряд не содержит, либо содержит в приемлемом количестве фазы - изменение знака разности первого порядка.

Применяется критерий, при котором анализируемый ряд разбивают на три равные по числу уровней группы (в том случае, если количество уровней ряда не делится на три, недостающие уровни нужно добавить) и сравнивают между собой уровни первой и последней групп (*критерий Кокса и Стюарта*).

Так как в нашем случае имеющиеся данные входного сигнала по углу отклонения вектора тяги могут иметь различные функции распределения, то целесообразно принимать решение о наличии тренда на основе использования свободных от распределений или непараметрических методов, в которых не делается никаких предположений относительно функции распределения полученных данных. Эти методы также используются, если данных настолько мало, что невозможно корректно проверить гипотезу о наличии конкретного распределения. Наиболее известными не зависящих от формы распределения методами, которые применяются для оценки наличия тренда в совокупности данных, являются: критерий серий и критерий инверсий.

По *методу серий* каждый конкретный уровень временного ряда считается принадлежащим к одному из двух типов: например, если уровень ряда меньше медианного значения, то считается, что он имеет тип А, в противном случае – тип В. В образовавшейся последовательности типов определяется число серий. Серией называется любая последовательность элементов одинакового типа, граничащая с элементами другого типа.

Не существует «автоматического» способа обнаружения тренда во временном ряду. Если временные ряды содержат значительную ошибку, то первым шагом выделения тренда является сглаживание. Однако если тренд является монотонным, то моделью таких процессов может служить линейный тренд. Медленные изменения контролируемых параметров могут перерасти

в быстрые с появлением осцилляций. В этом случае тренд может описываться квадратичным уравнением. Обработка измерений таких контролируемых процессов, искаженных шумовыми помехами, состоит в том, чтобы обнаружить момент начала линейного или квадратичного тренда и оценить его параметры [4].

Для анализа данных отклонений угла вектора тяги РД был выбран фазочастотный метод. После доказательства существования тренда на выделенных четырех временных интервалах (см. рис. 2) были проанализированы данные и определены характеры трендов на них. В кратковременных диапазонах работы двигателя из общего распределения входного сигнала (угла поворота камеры) выделены низкочастотные среднестатистические тренды и высокочастотные осцилляции малой амплитуды (отклонения от тренда). В частности, для 4 интервала (с 12 с по 16 с) кривая тренда показана штриховой линией на рис. 3.

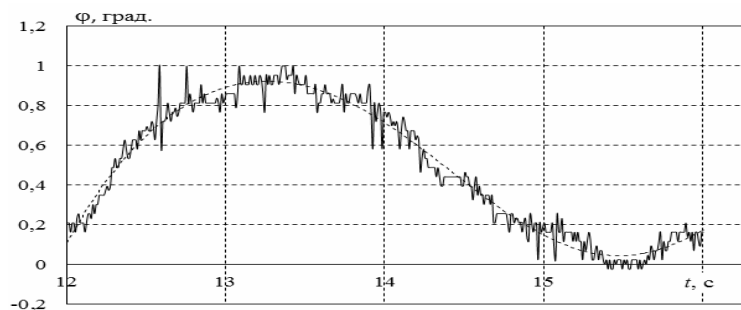


Рисунок 3 – Телеметрическая информация по углу отклонения камеры РД с выделенным трендом

Проведенное исследование выходных усилий на соответствующие отклонения угла  $\varphi$  показало, что при линейном тренде входных сигналов процесс быстро стабилизируется (см. рис. 4), зависимость входных и выходных сигналов носит монотонный квадратичный характер.

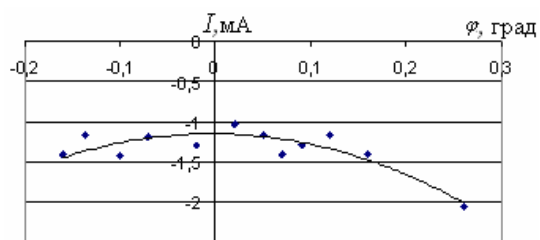


Рисунок 4 – Зависимость выходных импульсов от входных данных с линейным трендом

При формировании отклика без учета тренда либо в случае, когда тренд является квадратичной или более сложной функцией, выходные сигналы носят хаотичный характер, подавление осцилляций осуществляется не оптимальным образом. На рис. 5 а) показана зависимость выходных сигналов от входных осцилляций на 3 временном интервале при квадратичном тренде. После выделе-

ния трендов на конкретных временных интервалах возможно реализовать воздействие ступенчато, согласно малым линейным трендам, составляющим общий тренд на интервале (см. рис. 5 б). Такой подход упрощает задачу органам управления и позволяет оптимизировать алгоритм функционирования комплексной СУВТ.

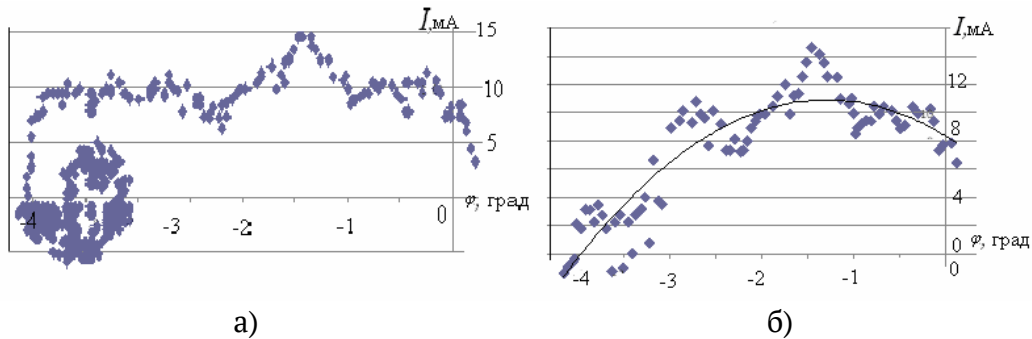


Рисунок 5 – Зависимость выходных импульсов от входных данных с квадратичным трендом

В дальнейшем следует продолжить работу по уточнению алгоритма работы комбинированной СУВТ. Необходимо выбрать быстродействующий метод экстраполяции данных согласно трендам и позволяющий использовать преимущества каждой подсистемы БСУВТ.

**Выводы.** Проанализирована типичная зависимость входных сигналов и выходных управляющих воздействий для рулевого ракетного двигателя на различных временных интервалах его работы. Предложена методика выделения и использования тренда входного сигнала на характерных интервалах работы РД, позволившая разработать алгоритм функционирования СУВТ. Алгоритм предусматривает обработку исходного поступающего сигнала СУВТ с выделением детерминированной (статической) составляющей (тренда) и высокочастотных осцилляций сигнала (отклонения от тренда). Разработанный алгоритм позволяет оптимальным образом (по энергозатратам на создание управляющих усилий) разделять функции подсистем (МСУВТ и ГСУВТ) комбинированной системы управления вектором тяги ракетного двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Стрельников Г.А. Разработка структурной схемы бифункциональной системы управления вектором тяги ракетного двигателя / Г.А. Стрельников, Е.Л. Токарева, Н.С.Прядко, А.Д.Игнатъев//Техническая механика, 2018.–№4.–С.57– 67.
2. Kovalenko N.D. The new concept of Trust vector control for rocket engine / N.D. Kovalenko, U.D. Sheptun, T.A. Kovalenko, G.A. Strelnikov // Системные технологии, 2016. – №6 (107). – С. 120 – 127.
3. Бокс Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир, 1974. – 406 с.

4. Петренко А.Н. Алгоритмы автоматического контроля параметров электрических ракетных двигательных установок / А.Н. Петренко, В.П. Малайчук // Вісник Дніпропетровського університету. Серія “Ракетно-космічна техніка”, 2017. – Вип. 20. – С. 62 – 70.

5. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / М. Бассавиль, А. Вилски и др. – М. : Мир, 1989. – 278 с.

#### REFERENCES

1. Strelnikov G.A. Razrabotka strukturnoy shemy bifunktsionalnoy sistemy upravleniya vektorom tyagi raketnogo dvigatelya / G.A. Strelnikov, E.L. Tokareva, N.S. Pryadko, A.D. Ignatev // Tehnicheskaya mehanika, 2018. – №4. – P. 57 – 67.

2. Kovalenko N.D. The new concept of Trust vector control for rocket engine / N.D. Kovalenko, U.D. Sheptun, T.A. Kovalenko, G.A. Strelnikov // Sistemnyie tehnologii, 2016. – №6 (107). – P. 120 – 127.

3. Boks Dzh. Analiz vremennyih ryadov, prognoz i upravlenie / Dzh. Boks, G. Dzhenkins. – М.: Mir, 1974. – 406 p.

4. Petrenko A.N. Algoritmy avtomaticheskogo kontrolya parametrov elektricheskikh raketnykh dvigatelnykh ustanovok / A.N. Petrenko, V.P. Malaychuk // Вісник Дніпропетровського університету. Серія “Ракетно-космічна техніка”, 2017. – Вип. 20. – С. 62 – 70.

5. Obnaruzhenie izmeneniya svoystv signalov i dinamicheskikh sistem / M. Bas-savil, A. Vilski i dr. – М. : Mir, 1989. – 278 p.

Received 27.02.2019.

Accepted 04.03.2019.

#### **Алгоритм функционирования комбинированной системы управления вектором тяги ракетного двигателя измельчения**

*Разработан алгоритм функционирования комбинированной (механической и газодинамической) системы управления вектором тяги ракетного двигателя. Проанализированы возможные методы определения существования тренда входного сигнала. Исследована типичная зависимость выходных управляющих воздействий для рулевого РД от входных сигналов на различных временных интервалах его работы. Представленный алгоритм предусматривает обработку входного сигнала СУВТ с выделением детерминированной составляющей (тренда) и высокочастотных осцилляций сигнала, а также учет вида тренда фиксированных возмущений угла отклонения вектора тяги РД. Разработанный алгоритм позволяет оптимальным образом разделять функции подсистем (МСУВТ и ГСУВТ) комбинированной системы управления, повысить качество и надежность системы управления полетом ступени ракеты.*

#### **An operation algorithm for the combined thrust vector control system of a rocket engine**

*The new combined rocket engine (RE) control system consists of combining various control systems - mechanical thrust vector control system (MTVCS) and gas-dynamic one (GDTVCS) within one bifunctional system that performs the functions of controlling and stabilizing the rocket stage flight. Previously it was shown that the MTVCS speed has limit, since with its speed increase the sensitivity to high-frequency random disturbances rises, which increases random errors. In addition, the system performance rise leads to an increase in the mass and dimensions of the steering drive of the engine swing. As part of the combined system, GDTVCS supplies any given speed requirements, and MTVCS provides maximum control efforts with minimum drive power and maximum element simplicity of the thrust vector control system as a whole. However, there is a problem of rational function distribution between subsystems and coordination of their functioning. For automatic*



*control of the RE thrust vector, the input data are angle deviations in a certain plane, which characterize the direction violations of the installation.*

*The purpose of the work is to study the input signal characteristics of the thrust vector system of steering engines applied to the combined RE control system and the design of an optimal algorithm for its operation.*

*There were analyzed possible determining methods for the trend existence of the input signal on the characteristic RE operation intervals and method was proposed for selected trend using. This made it possible to develop an algorithm for the functioning of the combined (mechanical and gas-dynamic) thrust vector control system of the rocket engine. The created algorithm provides the processing of the TVCS input signal with the selection of the deterministic (static) component (trend) and high-frequency signal oscillations (deviations from the trend). The trend type of the deviation angle perturbation of the RE thrust vector is also taken into account. The typical dependence of the output control actions for the steering RE on the input signals at different operation time intervals is investigated.*

*The developed algorithm allows optimal separating (in terms of energy consumption for creating control efforts) the subsystem functions of the combined RE thrust vector control system, to improve the quality and reliability of the flight control system of the rocket stage.*

**Токарева Е.Л.** - младший научный сотрудник Института технической механики НАН Украины и ГКА Украины.

**Прядко Н.С.** - старший научный сотрудник Института технической механики НАН Украины и ГКА Украины.

**Терновая Е.В.** - научный сотрудник Института технической механики НАН Украины и ГКА Украины.

**Токарева О.Л.** - молодший науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України.

**Прядко Н.С.** - старший науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України.

**Тернова К.В.** - науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України.

**Tokareva O.L.** - junior researcher of the Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine and DKA of Ukraine.

**Pryadko N.S.** - senior researcher of the Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine and DKA of Ukraine.

**Ternova K.V.** - researcher of the Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine and DKA of Ukraine.