
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-10-804-809

НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИЛОВЫМ ГИРОСКОПИЧЕСКИМ ПРИБОРОМ

М. В. БУРАКОВ¹, О. Б. ЯКОВЕЦ²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: bmv@sknt.ru

² НИИ командных приборов, 198216, Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается задача улучшения динамических характеристик силовых гироскопических приборов, обеспечивающих в качестве исполнительных органов управление пространственным движением космических аппаратов относительно центра масс, путем внедрения в систему исполнительного электропривода силовых гироскопических приборов нелинейных законов управления. Рассмотрена структура цифрового исполнительного электропривода современного гироскопа, построенная на основе классических линейных регуляторов. Приведен универсальный алгоритм замены линейного ПИД-регулятора на нелинейный нечеткий логический регулятор ПИД-типа. Представлены результаты математического моделирования, подтверждающие повышение точности и быстродействия гироскопа при использовании нечеткого управления.

Ключевые слова: силовые гироскопические комплексы, гироскопы, нечеткое управление.

На сегодняшний день силовые гироскопические приборы (СГП) являются основными исполнительными органами систем управления ориентацией и стабилизацией космических аппаратов, в первую очередь, спутников наблюдения [1, 2]. Они предназначены для создания управляющих моментов, обеспечивающих требуемые параметры движения космического аппарата (КА) относительно центра масс.

Применение СГП обусловлено следующими обстоятельствами:

— СГП позволяет осуществлять программное угловое движение лишь за счет электроэнергии без затрат, подобно жидкостным или газореактивным двигателям, специального рабочего тела — топлива или газа;

— реализуемое СГП линейное широкодиапазонное управление моментом позволяет обеспечить одновременно высокие динамические характеристики и точность ориентации, требуемые для спутников наблюдения;

— возможность создать вокруг КА „чистую среду“, необходимую для длительного функционирования его оптических средств.

Создание современных высокодинамичных КА требует все более высокого качества управления СГП; возникает необходимость исследовать характеристики приборов по быстродействию и точности отработки управляющих воздействий и определить возможные пути их улучшения.

Рассматриваемый СГП представляет собой так называемый двухступенной гироскоп (гиродин), т.е. силовой гироскоп (СГ), помещенный в одноосный подвес, вокруг оси которого исполнительным электроприводом обеспечивается вращение силового гироскопа с задаваемой скоростью относительно корпуса КА.

Управляющий момент, действующий на КА, создается за счет гироскопического эффекта, возникающего при вращении СГ с кинетическим моментом ротора \mathbf{H} относительно оси подвеса с угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}$, задаваемой системой управления. При этом возникает гироскопический момент \mathbf{M}_g , направленный ортогонально оси вращения ротора и оси подвеса гироскопа. Величина этого момента пропорциональна величине кинетического момента гироскопа и величине угловой скорости, она определяется формулой $|\mathbf{M}_g| = |\mathbf{H}| \cdot |\boldsymbol{\omega}|$. Изменяя значение $\boldsymbol{\omega}$, изменяют величину управляющего момента.

Так как модуль кинетического момента достаточно стабилен, точность создаваемого управляющего момента в значительной мере определяется характеристиками исполнительного электропривода.

К исполнительным электроприводам гиродинов предъявляются следующие требования: точность отработки скорости $\boldsymbol{\omega}$, быстродействие, минимальные пульсации угловой скорости, минимальные массогабаритные характеристики элементов привода, устойчивость к ионизирующим излучениям космического пространства, минимальные энергопотребление и длительный ресурс.

Задача исследования динамических характеристик СГП с целью их улучшения решалась методом математического моделирования.

Математическая модель механической части СГП разработана в виде системы дифференциальных уравнений, описывающей движение составных частей СГП с учетом линеаризации по малым величинам углов, соответствующих упругим деформациям элементов конструкции силового гироскопического прибора, а также с учетом малых величин соответствующих угловых скоростей [3].

Структура цифрового исполнительного электропривода гиродина (ЦИЭП) приведена на рис. 1, где приняты следующие обозначения [4]: СУ — система управления; ЭМУ — электронный модуль управления и контроля; И — интегратор; УС (1, 2, 3) — устройство сравнения; ПИД РУ — ПИД-регулятор угла; ПИ РТ — ПИ-регулятор тока; ШИМ — широтно-импульсная модуляция; БВУ — блок вычисления угла; БПК — блок преобразования координат; БВП — блок вычисления проекций; ИУП — измеритель углового положения; СГ — силовой гироскоп; Р — редуктор; БМД ПТ — бесконтактный моментный двигатель постоянного тока.

На рисунке приведены следующие обозначения сигналов: $N^{\text{зад}}$ — код заданной скорости; $N_{\alpha}^{\text{зад}}$ — код заданного угла поворота оси подвеса СГ; $N_{\phi}^{\text{СГ}}$ — код фактического угла поворота оси подвеса СГ; ϕ — угол поворота оси подвеса СГ; $\alpha_{\text{дв}}$ — угол поворота ротора БМД ПТ; $N_{\alpha}^{\text{дв}}$ — код угла поворота ротора БМД ПТ; $\Delta N_{\text{вх}}$ — код углового рассогласования; $\Delta N_{\text{вых}}$ — выходной код ПИД РУ; $I_{1\phi}$, $I_{2\phi}$ — токи в 1-й и 2-й фазах БМД ПТ; I_x , I_y — проекции вектора тока БМД ПТ на оси неподвижной, связанной со статором, системы координат; I_q , I_d — проекции вектора тока БМД ПТ на оси вращающейся, связанной с ротором, системы координат; U_q , U_d — проекции результирующего вектора напряжения на оси вращающейся системы; T_{i1} , T_{i2} , T_{i3} — управляющие ШИМ-сигналы; $U_{1\phi}$, $U_{2\phi}$, $U_{3\phi}$ — напряжения, подаваемые из ключевого усилителя мощности (КУМ) на фазы БМД ПТ; $\mathbf{M}_{\text{ред}}$ — момент редуктора.

В ЦИЭП реализована система регулирования скорости, которая содержит основной контур регулирования угла и подчиненный ему контур регулирования тока. Для работы привода используется один ИУП.

Управление ЦИЭП производится по следующему алгоритму: на каждом такте управления определяется величина углового рассогласования между расчетным и фактическим углами поворота оси подвеса СГ, вычисляется выходной параметр контура регулирования угла, который поступает в контур регулирования тока, где используется для задания поперечной составляющей вектора тока.

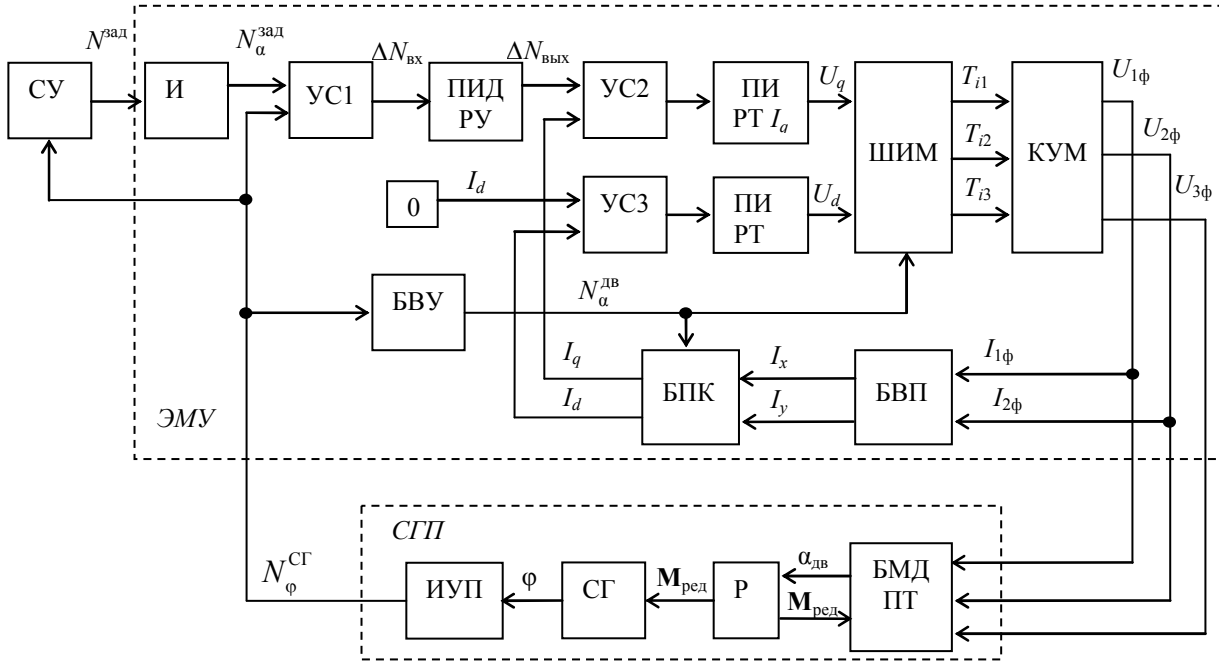


Рис. 1.

В структуре ЦИЭП (рис. 1) используются классические линейные регуляторы. Повышение точности работы системы может быть достигнуто путем замены штатных регуляторов на нечеткие логические регуляторы (НЛР), реализующие нелинейный закон управления [5].

Процедура перехода от линейного ПИД-регулятора к нелинейному НЛР описана в работе [6]. Она предполагает декомпозицию НЛР в трехканальную структуру (рис. 2, здесь F и DF — операции фаззификации и дефаззификации, Δ — элемент задержки, $e(t)$ и $u(t)$ — ошибка управления и сигнал управления, e^* и u^* — их лингвистическое описание, ТЛП — таблица лингвистических правил).

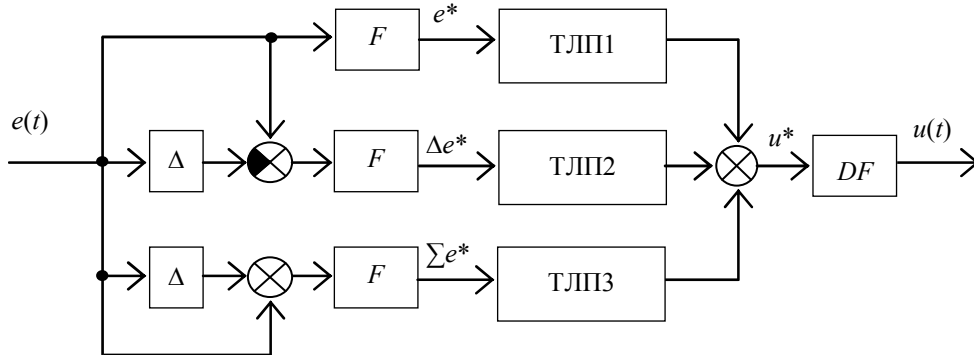


Рис. 2.

Преимущество использования трехканальной структуры заключается в том, что каждая ТЛП может настраиваться независимо, так как, подобно классическому ПИД-регулятору, здесь ТЛП1 отвечает в основном за время переходного процесса, ТЛП2 — за перерегулирование, ТЛП3 — за статическую ошибку. При этом в целом настройка носит итеративный характер, что обеспечивает учет взаимовлияния каналов. Выбирая различные комбинации каналов, можно получить из НЛР ПИД-типа нечеткие регуляторы ПД- и ПИ-типа.

Поскольку НЛР заменяет собой линейный регулятор, можно принять, что на вход НЛР поступает нормализованное значение $e(t)$, а коэффициенты заменяемого ПИД-регулятора будут выполнять роль коэффициентов денормализации по каждому из трех каналов.

Рассмотрим закон управления по одному каналу НЛР ПИД-типа. Здесь возможное количество правил соответствует числу термов, используемых для описания входа. Закон управления описывается некоторой плоской кривой, пример которой для канала ошибки приведен на рис. 3 (где обозначены термы: ОБ — отрицательное большое, ОМ — отрицательное малое, Н — нулевое, ПМ — положительное малое, ПБ — положительное большое; $\mu(e)$, $\mu(u)$ — функции принадлежности к термам ошибки управления и сигнала управления).

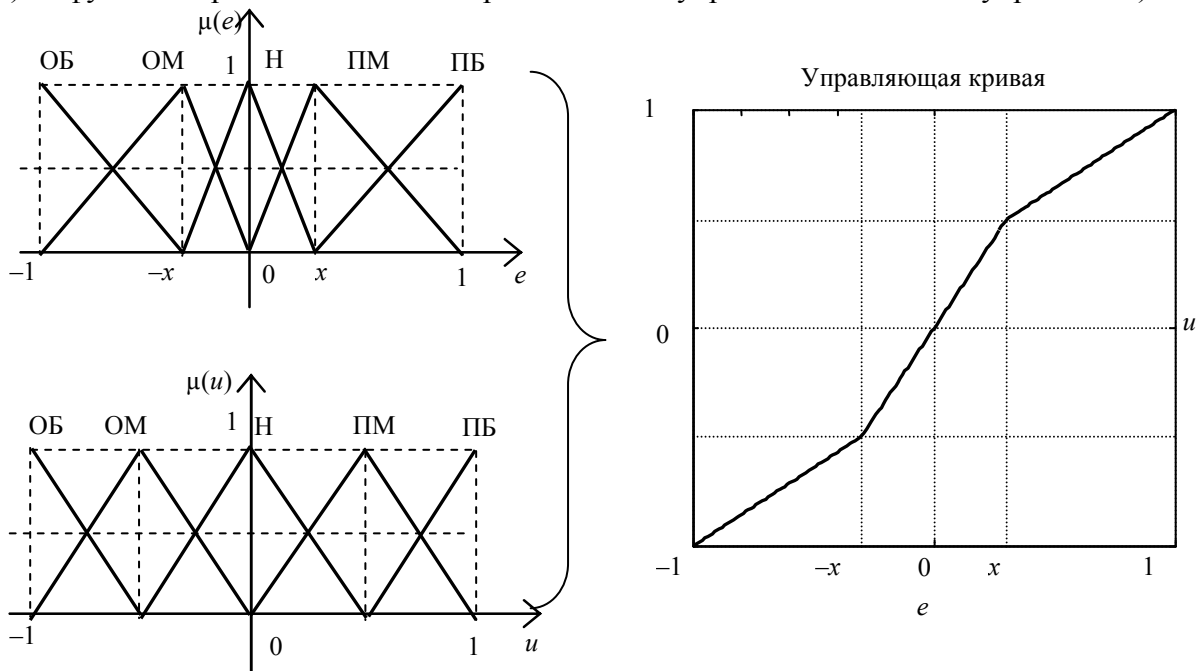


Рис. 3.

Как видно из рис. 3, меняя положение центров промежуточных термов (x на рис. 3), описывающих ошибку управления, можно добиться желаемой формы управляющей кривой. Задача оптимизации закона управления при семи и более термах является достаточно сложной и требует использования методов глобальной оптимизации, таких как генетический алгоритм (ГА). Принципы настройки регуляторов с помощью ГА в MatLab описаны, например, в работе [7].

Качество ЦИЭП может быть определено по точности и быстродействию отработки скорости вращения подвеса гироскопа ω , которая задавалась в виде ступенчатой функции (рис. 4, здесь 1 — система с линейными регуляторами, 2 — с нелинейными НЛР).

Как показывают результаты вычислительного эксперимента, приведенные на рис. 4, использование нечеткого логического управления позволяет значительно сократить перерегулирование и время переходного процесса в системе. Это дает возможность судить о перспективности замены штатных ПИД-регуляторов в структуре ЦИЭП на НЛР.

Приведенный алгоритм замены линейного ПИД-регулятора на нелинейный НЛР ПИД-типа заключается в использовании коэффициентов линейного регулятора для денормализации в каналах НЛР и генетической настройке

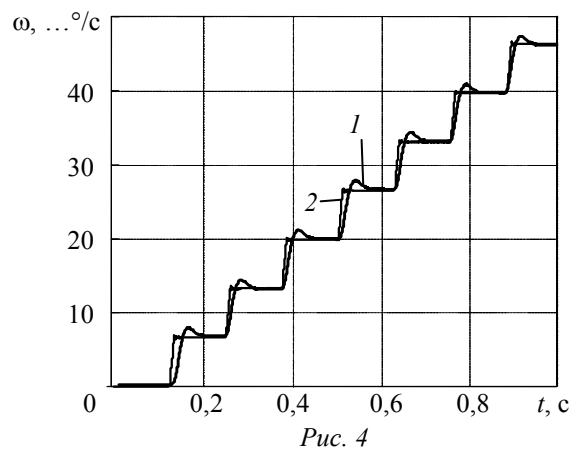


Рис. 4

закона управления по каждому из трех каналов путем выбора положения промежуточных термов. Этот подход является универсальным, чем выгодно отличается, например, от использования кусочно-линейных функций [8] и нелинейностей степенного вида для модернизации линейных ПИД-регуляторов [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин А. В. и др. Электромеханические исполнительные органы для систем ориентации малых космических аппаратов // Гироскопия и навигация. 1998. № 4. С. 81—88.
2. Арефьев В. П., Сорокин А. В., Башкеев Н. И., Кондратьев О. А. Инерционные исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов // Гироскопия и навигация. 1995. № 2(9). С. 7—11.
3. Яковец О. Б. Математическое моделирование процессов управления силовыми гироскопическими приборами // Сб. докл. науч.-техн. конф. „Завалишинские чтения“. СПб, 2009. С. 196—201.
4. Акашев Д. И., Яковец О. Б. Перспективный силовой гироскопический комплекс для высокоманевренных космических аппаратов // VI науч.-техн. конф. молодых специалистов „Ракетно-космическая техника“. Екатеринбург: ФГУП „НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова“, 2013. Вып. 1. С. 34—38.
5. Бураков М. В. Нечеткие регуляторы. СПб: ГУАП, 2010. 237 с.
6. Бураков М. В., Кирпичников А. П. Нечеткий регулятор ПИД-типа для нелинейного объекта // Вестн. Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 4. С. 242—244.
7. Бураков М. В. Генетический алгоритм: теория и практика. СПб: ГУАП, 2008. 164 с.
8. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Применение в ПИД-законе регулирования нелинейных функций преобразования ошибки // Тр. БГТУ. 2013. № 6. С. 95—98.
9. Ишимцев Р. Ю., Воевода А. А., Жмудь В. А., Семибаламут В. М. Оптимизация нелинейных ПИД-регуляторов // Сб. науч. тр. НГТУ. 2008. № 3(53). С. 13—16.

Сведения об авторах

- Михаил Владимирович Бураков** — канд. техн. наук, доцент; СПбГУАП, кафедра управления в технических системах; E-mail: bmv@sknt.ru
- Ольга Борисовна Яковец** — НИИ командных приборов; ведущий инженер; E-mail: myachik@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
управления в технических системах

Поступила в редакцию
22.06.15 г.

Ссылка для цитирования: Бураков М. В., Яковец О. Б. Нечеткое управление силовым гироскопическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 10. С. 804—809.

FUZZY LOGIC CONTROL OVER A POWER GYROSCOPIC SYSTEM

M. V. Burakov¹, O. B. Yakovets²

¹ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
190000, St. Petersburg, Russia
E-mail: bmv@sknt.ru

² Command Devices Research Institute, 198216, St. Petersburg, Russia

The problem of improvement of dynamic characteristics of power gyroscopic instruments is considered, the instruments serve as executive organs providing control over spatial movement of spacecraft relative to its mass center. The proposed approach is based on introduction to the system of executive electric drive a nonlinear control laws. For a modern gyrodine, the structure of digital executive electric drive build on the basis of classic linear controllers is analyzed. A universal algorithm of replacement of linear PID controller (proportional-integral-derivative controller) with a non-linear fuzzy-logic controller of PID-type is presented. An increase in accuracy and speed of operation of the gyrodine with fuzzy control is demonstrated by presented results of mathematical simulation.

Keywords: power gyroscopic complex, gyrodyne, fuzzy control.

Data on authors

- Mikhail V. Burakov** — PhD, Associate Professor; Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Control in Technical Systems;
E-mail: bmv@sknt.ru
- Olga B. Yakovets** — Command Devices Research Institute, Senior Engineer;
E-mail: myachik@yandex.ru

For citation: *Burakov M.V., Yakovets O.B.* Fuzzy logic control over a power gyroscopic system // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 10. P. 804—809 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-10-804-809