

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В РЕГУЛЯТОРЕ ИНДИКАТОРНОГО ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА

В.Д. Соломенцев

vlad_soloma@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

С развитием навигационных систем и оптических приборов растет необходимость в использовании стабилизированного основания для поддержания заданной ориентации системы в пространстве. При повышении точности и быстродействия проектируемых гироскопических стабилизаторов возникает проблема устойчивости из-за наличия в системе с линейным регулятором неучтенных звеньев, которые оказывают значительное влияние при повышении частоты среза системы. В данной работе описан принцип организации канала обратной связи с использованием нелинейного регулятора на базе нечеткой логики, построена нелинейная модель подобной системы и исследована возможность ее применения на практике.

Ключевые слова

Системы стабилизации, индикаторный гиростабилизатор, линейный регулятор, нечеткая логика, устойчивость системы, математическое моделирование

Поступила в редакцию 22.11.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. Предназначение гиростабилизаторов заключается в компенсации действующих на объект стабилизации внешних моментов. Точность и быстродействие работы индикаторного гиростабилизатора во многом определяются конфигурацией цепи отрицательной обратной связи системы стабилизации. Однако при увеличении коэффициента усиления для повышения точности индикаторного гиростабилизатора растет и частота среза системы, что приводит к влиянию неучтенных высокочастотных звеньев (например, жесткости конструкции и шумов) на качество стабилизации [1–3].

В данной работе исследована возможность применения регулятора на базе нечеткой логики в контуре обратной связи одноосного индикаторного гиростабилизатора с трехступенным гироскопом.

Математическая модель индикаторного гиростабилизатора. Структурная схема модели показана на рис. 1, где M_X^{BH} , $M_X^{o.c}$ — внешний возмущающий момент и момент стабилизации, развиваемый контуром обратной связи [4, 5].

В данном случае объектом стабилизации выступает платформа, поведение которой описывается передаточной функцией следующего вида:

$$W_{\text{платф}}(s) = \frac{1}{J_X s^2 + D_X s},$$

где J_x — момент инерции платформы, D_x — коэффициент демпфирования по оси поворота платформы.

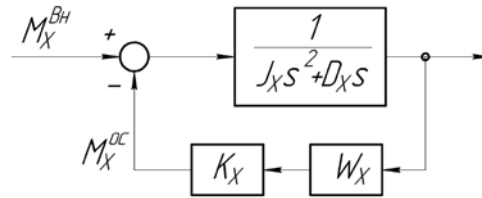


Рис. 1. Структурная схема индикаторного гиросtabilизатора

Канал обратной связи гиросtabilизатора состоит из усилительного звена с коэффициентом K_x и корректирующего звена с передаточной функцией W_x , вводимого для обеспечения требуемого качества регулирования [6, 7].

$$W_x(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1},$$

где T_1, T_2 — постоянные времени, определяющие запасы устойчивости системы.

О качестве регулирования полученной системы судят по характеру изменения угла отклонения платформы от начального нулевого положения при действии ступенчатого возмущающего момента. Характерный вид переходного процесса при классическом способе организации обратной связи индикаторного гиросtabilизатора представлен на рис. 2.

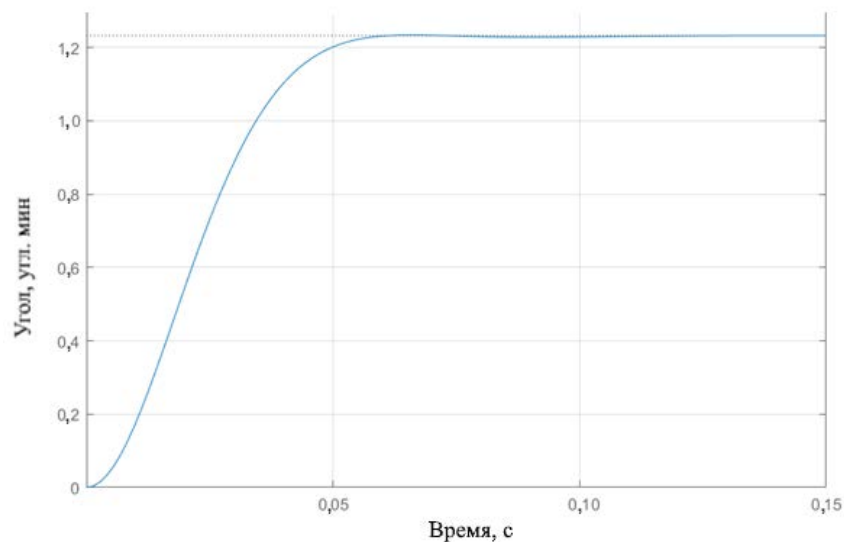


Рис. 2. Переходный процесс устойчивой системы с корректирующим звеном

Регулятор на базе нечеткой логики. Нечеткая логика (англ. *fuzzy logic*) — раздел математики, являющийся обобщением классической логики и теории множеств, базирующийся на понятии нечеткого множества, впервые введенного Лотфи Заде в 1965 г. как объекта с функцией принадлежности элемента множеству, принимающей любые значения в интервале $[0, 1]$, а не только 0 или 1 [8]. На основе этого понятия вводятся различные логические операции над нечеткими множествами.

Предметом нечеткой логики считается исследование рассуждений в условиях нечеткости, размытости, сходных с рассуждениями в обычном смысле и их применение в вычислительных системах.

Проведем синтез нелинейного регулятора на нечеткой логике, для решения проблемы потери устойчивости при наличии в системе неучтенных звеньев. Для исследования устойчивости такой системы будем оценивать характер изменения угла отклонения платформы за время переходного процесса.

Принцип работы такого канала управления системой упрощенно представляет собой изменение крутизны канала в зависимости от угловой скорости и угла поворота платформы.

Работу регулятора можно разбить на три этапа: этап фазификации, вычисление значений логических функций, этап дефазификации и формирование управляющего воздействия. Подробное описание всех этапов будет приведено далее.

Этап фазификации. Для решения задачи регулирования необходимо получить набор переменных, определяющих динамику движения системы, этап вычисления таких переменных будем называть этапом фазификации.

Разобьем диапазон изменения угла отклонения платформы на 3 интервала и на каждом из них зададим кусочно-линейные функции принадлежности, изменяющиеся от нуля до единицы. При этом нулевое значение функции свидетельствует о непринадлежности угла данному диапазону.

Функции принадлежности малым, средним и большим углам — $A_{\text{малый}}$, $A_{\text{средн}}$, $A_{\text{большой}}$, соответственно, можно описать следующим образом [9]:

$$A_{\text{малый}} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{A_{\text{min}}} X, & X \in [0; A_{\text{min}}]; \\ 0, & X \in (A_{\text{min}}; \infty). \end{cases}$$

$$A_{\text{средн}} = \begin{cases} 1 - \left| \frac{1}{A_{\text{max}} + \Delta A} X - 1 \right|, & X \in [0; A_{\text{max}}]; \\ 0, & X \in (A_{\text{max}}; \infty). \end{cases}$$

$$A_{\text{большой}} = \begin{cases} 0, & X \in [0; A_{\text{max}} - \Delta A]; \\ \frac{1}{A_{\text{max}}} (X - A_{\text{max}} + \Delta A), & X \in [A_{\text{max}} - \Delta A; A_{\text{max}}]; \\ 1, & X \in (A_{\text{max}}; \infty). \end{cases}$$

$A_{\min} = 0,2$ угл.с; $A_{\max} = 1,3$ угл.с; X — угол отклонения платформы;
 $\Delta A = 0,5$ угл.с — поправочный коэффициент.

Аналогичным способом введем функции принадлежности малых, средних и больших скоростей — $V_{\text{малая}}$, $V_{\text{средн}}$, $V_{\text{большая}}$:

$$V_{\text{малый}} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{V_{\min}} X, & X \in [0; V_{\min}]; \\ 0, & X \in (V_{\min}; \infty). \end{cases}$$

$$V_{\text{средн}} = \begin{cases} 1 - \left| \frac{1}{V_{\max} + \Delta V} X - 1 \right|, & X \in [0; V_{\max}]; \\ 0, & X \in (V_{\max}; \infty). \end{cases}$$

$$V_{\text{большой}} = \begin{cases} 0, & X \in [0; V_{\max} - \Delta V]; \\ \frac{1}{V_{\max}} (X - V_{\max} + \Delta V), & X \in [V_{\max} - \Delta V; V_{\max}]; \\ 1, & X \in (V_{\max}; \infty). \end{cases}$$

$V_{\min} = 8$ угл.с/с; $V_{\max} = 60$ угл.с/с; X — угол отклонения платформы;
 $\Delta V = 10$ угл.с/с — поправочный коэффициент.

Графики функций принадлежности показаны на рис. 3 и 4.

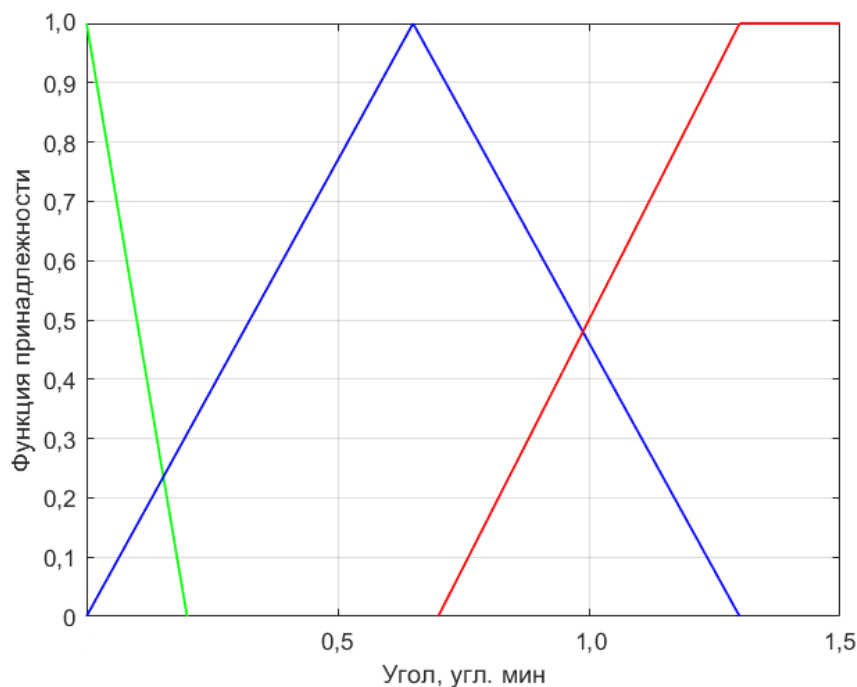


Рис. 3. Функции принадлежности угла:

зеленая линия — $A_{\text{малый}}$; синяя линия — $A_{\text{средн}}$; красная линия — $A_{\text{большой}}$

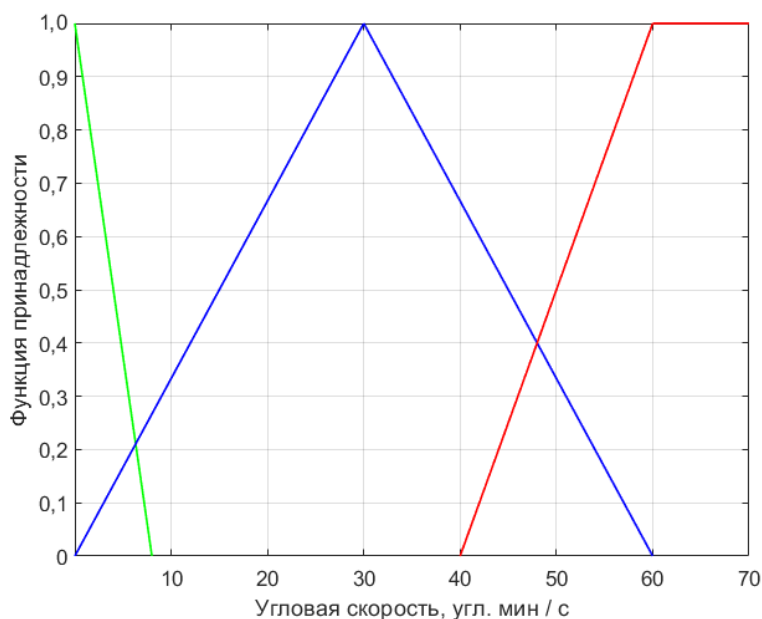


Рис. 4. Функции принадлежности угловой скорости:
зеленая линия — $A_{\text{малый}}$; синяя линия — $A_{\text{средн}}$; красная линия — $A_{\text{большой}}$

Логические правила регулирования. Управление системой будем осуществлять изменением крутизны отрицательной обратной связи в диапазоне $[K_{\min}; K_{\max}]$, где K_{\min} прямо пропорционально максимальному суммарному возмущающему моменту и обратно пропорционально углу статической ошибки. Такой K_{\min} обеспечивает точность на уровне системы с линейным регулятором, что удобно при сравнении.

$$K_{\min} = \frac{M_{\text{сум}}}{\alpha_{\text{стат}}} \approx 6 \cdot 10^5 \text{ сН} \cdot \text{см}, \quad K_{\max} \text{ примем равным } 10^8 \text{ сН} \cdot \text{см}.$$

Сформируем правила работы системы, учитывая, что поведение системы симметрично для положительных и отрицательных углов и угловых скоростей (см. таблицу).

Логическим операциям «И», «ИЛИ» применительно к системам на базе нечеткой логики соответствуют функции минимума и максимума, соответственно.

Совокупность блоков фазификации и логических правил приведена на рис. 5. Угол отклонения платформы и его производная поступают на блоки вычисления функций принадлежности. После логических преобразований с данной подсистемы выходит три логических сигнала f_1, f_2, f_3 , как и остальные логические переменные, могут принимать значения в диапазоне $[0; 1]$. Сигналы f_1, f_2, f_3 соответствуют воздействиям «Минимальное K », «Увеличенное K », «Максимальное K », указанным в таблице.

Правила регулирования

Угол, угл. мин	Угловая скорость, угл. мин/с	Воздействие
$[0; A_{\min}]$	$[0; V_{\min}]$	Минимальное K
	$(V_{\min}; V_{\max}]$	Увеличенное K
	$(V_{\max}; \infty)$	Максимальное K
$(A_{\min}; A_{\max}]$	$[0; V_{\min}]$	Минимальное K
	$(V_{\min}; V_{\max}]$	Увеличенное K
	$(V_{\max}; \infty)$	Максимальное K
$(A_{\max}; \infty)$	$[0; V_{\min}]$	Максимальное K
	$(V_{\min}; V_{\max}]$	Максимальное K
	$(V_{\max}; \infty)$	Максимальное K

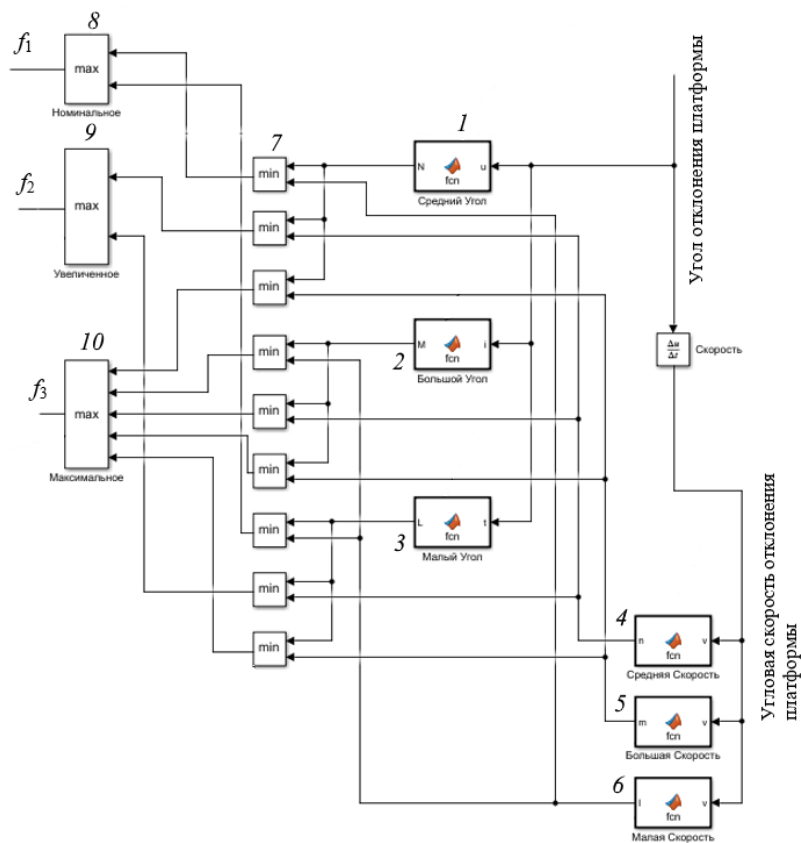


Рис. 5. Блоки фазификации и логические связи:
 1, 2, 3 — блоки фазификации угла; 4, 5, 6 — блоки фазификации угловой скорости;
 7 — логическая операция «И»; 8, 9, 10 — логическая операция «ИЛИ»

Дефазификация. Так как выходные сигналы f_1, f_2, f_3 могут одновременно иметь любое значение из диапазона $[0; 1]$, для определения управляющего воздействия воспользуемся методом центра масс точек. Так, для системы материальных точек формула координаты центра масс:

$$X = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3}{m_1 + m_2 + m_3},$$

где m_i — масса i -й материальной точки; x_i — координата i -й материальной точки.

Для системы нечеткого регулирования в качестве массы материальной точки примем значение логического сигнала, а в качестве координаты — соответствующую крутизну усилительного звена, получим:

$$K = \frac{f_1 K_{\text{ном}} + f_2 K_{\text{повыш}} + f_3 K_{\text{max}}}{f_1 + f_2 + f_3}.$$

Используя полученную формулу, будем определять необходимую крутизну обратной связи канала стабилизации.

Исследование синтезированной модели. Полученная система приведена на рис. 6. Угол и скорость поворота платформы с выхода блока 2 поступает на блоки фазификации 3–7. Полученные значения функций принадлежности преобразуются логическими функциями (блок 9–12), реализующими законы управления (см. таблицу), после чего в блоке 13 вычисляется крутизна канала и формируется управляющее воздействие, подаваемое на сумматор цепи отрицательной обратной связи.

Настройка такого нелинейного регулятора (см. рис. 6) осложняется необходимостью подбора 9 правил и 10 коэффициентов функций принадлежности, причем их число растет с увеличением участков разбиения диапазона скоростей и углов.

О качестве регулирования будем судить по переходной характеристике угла отклонения платформы при подаче на вход системы ступенчатого возмущающего момента (блок 1). Вид неустойчивых переходных процессов представлен на рис. 7, переходные процессы с автоколебаниями показаны на рис. 8 и 9.

Неустойчивость переходных процессов, показанных на рис. 7, обусловлена неверным заданием логики работы регулятора, из-за чего при увеличении угла отклонения система снижала уровень момента стабилизации.

Автоколебания переходных процессов, показанных на рис. 7, возникают при малом демпфировании в области средних углов, как следствие, в системе не может быть получено установившееся значение.

При недостаточном уровне демпфирования малых угловых скоростей система колеблется около положения установившегося равновесия (рис. 9).

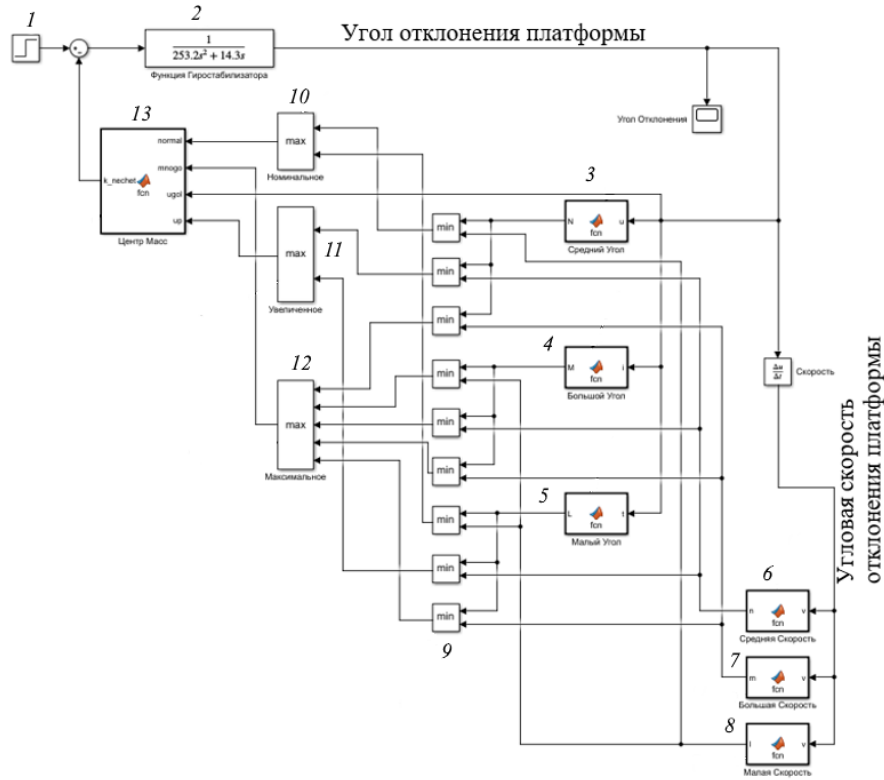


Рис. 6. Синтезированная система:

1 — входное ступенчатое воздействие; 2 — передаточная функция платформы гиросtabilизатора; 3–5 — блоки фазификации угла; 6–8 — блоки фазификации угловой скорости; 9 — логическая операция «И»; 10–12 — логическая операция «ИЛИ»; 13 — блок дефазификации

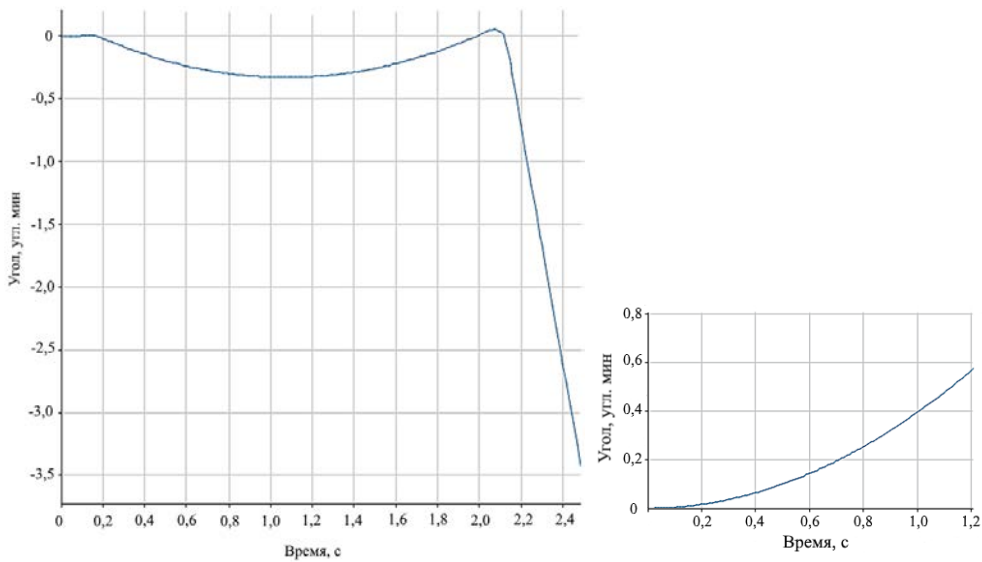


Рис. 7. Переходные процессы при неверном описании регулирования

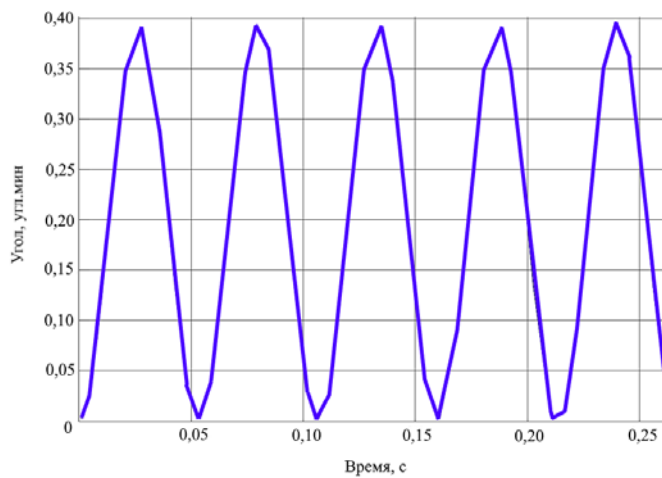


Рис. 8. Переходный процесс при недостаточном демпфировании в области средних углов

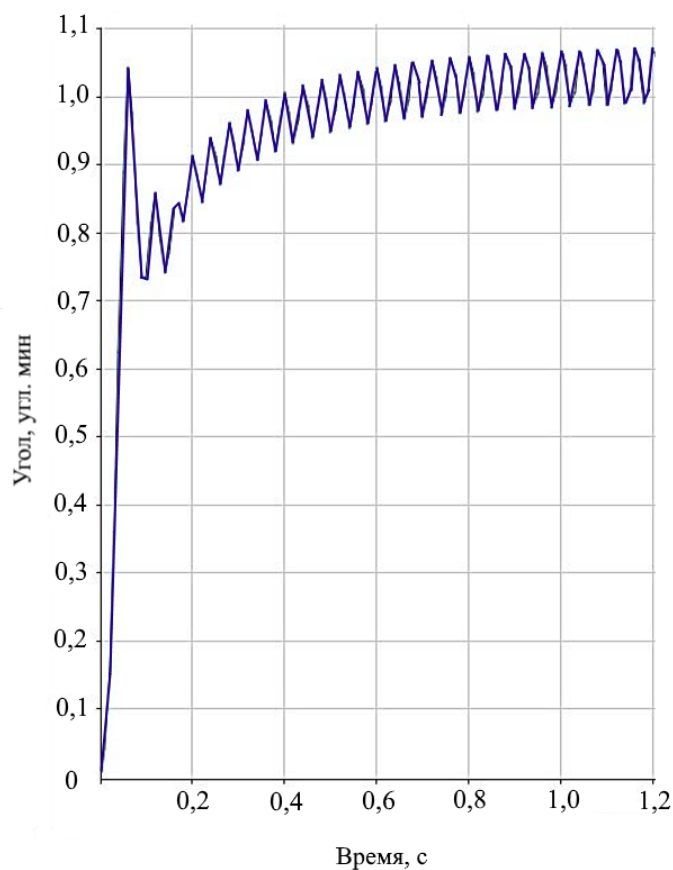


Рис. 9. Переходный процесс при недостаточном демпфировании малых угловых скоростей

После настройки и подбора коэффициентов, в частности, уменьшения участка малых углов и угловых скоростей, был получен приемлемый вид переходного процесса (рис. 10) близкий к переходному процессу системы с линейным регулятором.

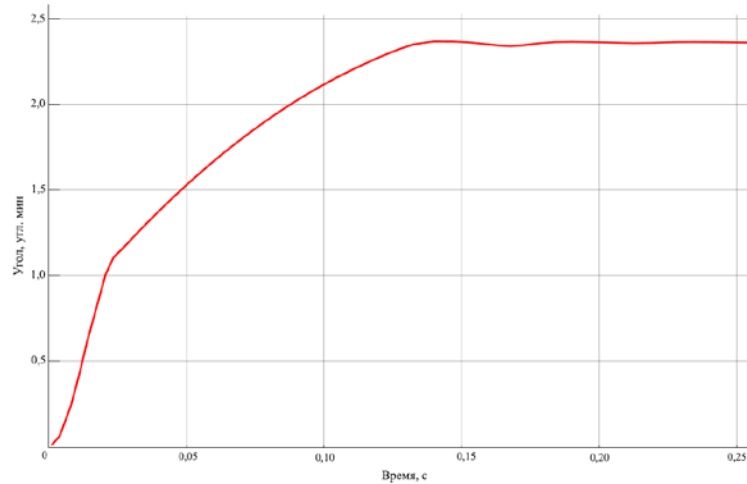


Рис. 10. Переходный процесс после настройки

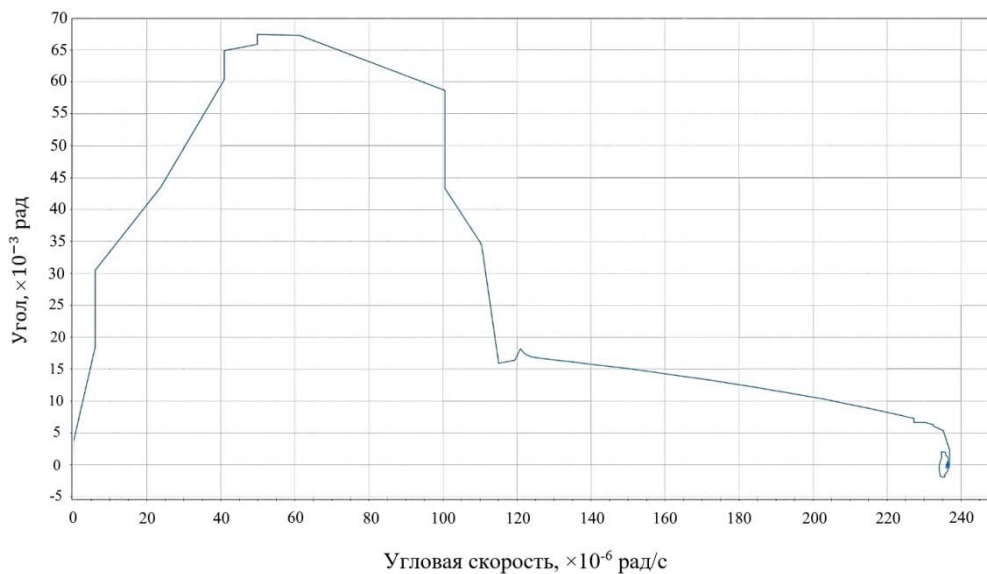


Рис. 11. Фазовый портрет системы с регулятором на нечеткой логике

При сравнении переходных процессов классического регулятора и регулятора на базе нечеткой логики выявленные отличия оказываются несущественными. Таким образом, применение синтезированного регулятора на основе не-

четкой логики является потенциально возможным, однако повышается сложность организации обратной связи, из-за чего требуются дополнительные исследования для определения целесообразности применения такого типа регуляторов.

По построенному фазовому портрету системы (рис. 11) с синтезированным регулятором на базе нечеткой логики, также можно сказать, что система устойчива, однако поведение регулятора недостаточно оптимизировано на границе малых и средних углов.

На результаты моделирования также могли повлиять недостаточная оптимизация работы исследуемого регулятора, неточности в построении правил регулирования, малое число участков разбиений рабочих диапазонов угла и скорости поворота гиросtabilизатора и, как следствие, пониженная чувствительность.

Заключение. В данной работе в соответствии с техническим заданием был проведен синтез регулятора на базе нечеткой логики, с помощью методов математического моделирования определены процессы в системе и подтверждена возможность применения описанной архитектуры при построении обратной связи.

Литература

- [1] Пельпор Д.С., ред. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Ч. 1, 2. М., Высшая школа, 1977.
- [2] Пельпор Д.С. Гироскопические системы. Теория гироскопов и гиросtabilизаторов. М., Высшая школа, 1986.
- [3] Сломьянский Г.А., Агапов А.В. Детали и узлы гироскопических приборов. Атлас конструкций. М., Машиностроение, 1975.
- [4] Александров А.Д., ред. Индикаторные гироскопические платформы. М., Машиностроение, 1979.
- [5] Матвеев В.А., Подчерзцев В.П., Фатеев В.В. Гироскопические гиросtabilизаторы на ДНГ. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
- [6] Арсеньев В.Д. Расчет и синтез параметров гиросtabilизаторов для маневренных объектов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
- [7] Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. СПб., Судостроение, 1968.
- [8] Регулятор на базе нечеткой логики. Создание и настройка. *habr.com: веб-сайт*. URL: <https://habr.com/ru/post/413539/> (дата обращения: 10.04.2022).
- [9] Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М., Горячая линия-Телеком, 2006.

Соломенцев Владислав Дмитриевич — студент кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Кулешов Александр Викторович, доцент кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Соломенцев В.Д. Исследование возможности использования нечеткой логики в регуляторе индикаторного гиросtabilизатора. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 12(77). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-12-849>

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING FUZZY LOGIC IN THE INDICATOR GYROSTABILIZER CONTROLLER

V.D. Solomentsev

vlad_soloma@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

With the development of navigation systems and optical devices, the need to use a stabilized base to maintain a given system orientation in space is growing. When increasing the accuracy and speed of designed gyroscopic stabilizers, there is a problem of stability due to the presence of unaccounted for links in the system with a linear regulator, which have a significant impact when increasing the cut-off frequency of the system. This paper describes the principle of feedback channel organization with the use of a nonlinear regulator based on fuzzy logic, built a nonlinear model of such a system and investigated the possibility of its application in practice.

Keywords

Stabilization systems, indicator gyrostabilizer, linear controller, fuzzy logic, system stability, mathematical modeling

Received 22.11.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Pelpor D.S., ed. Girokopicheskie sistemy. Proektirovanie girokopicheskikh sistem. Ch. 1, 2 [Gyroscopic systems. Design of gyroscopic systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977 (in Russ.).
- [2] Pelpor D.S. Girokopicheskie sistemy. Teoriya girokopov i girostabilizatorov [Gyroscopic systems. Theory of gyroscopes and hydrostabilizers]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986 (in Russ.).
- [3] Slomyanskiy G.A., Agapov A.V. Detali i uzly girokopicheskikh priborov. Atlas konstruktsey [Parts and assemblies of gyroscopic devices. Atlas of designs]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975 (in Russ.).
- [4] Aleksandrov A.D., ed. Indikatornye girokopicheskie platform [Indicator gyroscopic platforms]. Moscow, Mashinostroenie, 1979 (in Russ.).
- [5] Matveev V.A., Podchezertsev V.P., Fateev V.V. Girokopicheskie girostabilizatory na DNG [Gyroscopic gyrostabilizers on dynamically tuned gyroscopes]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005 (in Russ.).
- [6] Arsenyev V.D. Raschet i sintez parametrov girostabilizatorov dlya manevrennykh obektov [Calculation and synthesis of gyrostabilizers for maneuvering objects]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013 (in Russ.).
- [7] Besekerskiy V.A., Fabrikant E.A. Dinamicheskii sintez sistem girokopicheskoy stabilizatsii [Dynamic synthesis of gyroscopic stabilization systems]. Sankt-Petersburg, Sudostroenie Publ., 1968 (in Russ.).
- [8] Regulyator na baze nechetkoy logiki. Sozdanie i nastroyka [Controller based on fuzzy logic. Creating and configuring]. *habr.com: website* (in Russ.). URL: <https://habr.com/ru/post/413539/> (accessed: 10.04.2022).

- [9] Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2006 (in Russ.).

Solomentsev V.D. — Student, Department of Orientation, Stabilization and Navigation Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Kuleshov A.V., Assoc. Professor, Department of Orientation, Stabilization and Navigation Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Solomentsev V.D. Investigation of the possibility of using fuzzy logic in the indicator gyrostabilizer controller. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 12(77). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-12-849.html> (in Russ.).