

# Синтез нейро-нечеткого алгоритма управления приводом вертикального канала наведения и стабилизации

А. К. Ломакин, e-mail: hostel209@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

***Аннотация.** Рассмотрен вариант реализации нейро-нечеткого алгоритма управления силовым приводом вертикального канала наведения и стабилизации с шариковинтовой передачей, выполненного на базе трехфазного вентильного двигателя встраиваемой конструкции.*

***Ключевые слова:** нейро-нечеткое управление, привод, наведение, стабилизация.*

## Введение

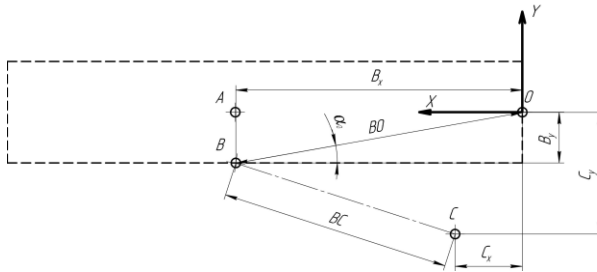
Разработка силовых электроприводов вертикального канала наведения и стабилизации сопряжена с рядом трудностей, которые связаны с нелинейными характеристиками двигателей, изменяющимся характером нагрузок, действующих на выходной вал привода, изменением параметров объекта слежения в процессе эксплуатации системы и т.д. В связи с этим использование классических алгоритмов управления является затруднительным. В данной работе рассматривается вариант использования нейро-нечеткого алгоритма управления, адаптирующегося к изменяющимся в процессе эксплуатации входным сигналам.

## 1. Модель исполнительного двигателя и объекта управления

Современный электропривод – это электромеханическая система, которая включает в себя электрический двигатель, передаточный механизм (редуктор) и управляющее микропроцессорное устройство, которое на основании данных, получаемых с помощью информационных устройств (датчиков) или наблюдателей состояния от электропривода и питающей сети, вырабатывает управляющие воздействия, обеспечивающие движение механической части системы с заданными параметрами и работу всего устройства в оптимальном режиме. При этом многие электроприводы представляют собой единый мехатронный модуль, в котором устройства, о которых было сказано выше объединены с элементами искусственного интеллекта.

В качестве привода вертикального канала наведения и стабилизации привод поступательного действия, в котором вращательное движение исполнительного двигателя преобразуется с помощью механической передачи в возвратно-поступательное. Примером такого механического преобразователя является шариковинтовая передача, которая обладает высокими нагрузочными и эксплуатационными характеристиками при малых габаритах, меньшими потерями на трение, а также меньше подвержена износу в отличие от классических редукторов.

Для формирования математического описания объекта управления была использована геометрическая схема расположения основных точек привода, представленная на рисунке 1.



*т. O – ось вращения направляющей привода; т. A – центр масс привода; т. B – точка соединения привода и направляющей; т. C – точка привода с основанием.*

*Рис. 1. Схема расположения основных точек силовой системы*

Максимальная сила нагрузки на шток редуктора – величина, зависящая от угла возвышения направляющей – определяется по формуле:

$$F_{n \max}(\alpha) = \frac{J_n \ddot{\alpha}_{\max} + |M_{c.m}| \operatorname{sign}(\dot{\alpha}) + M_{np} \cos(\alpha) + M_{aэро} \sin(\alpha)}{d(\alpha)} \quad (1)$$

где  $J_n$  – момент инерции нагрузки,  $M_{c.m}$  – момент сухого трения,  $M_{np}$  – момент неуравновешенности,  $M_{aэро}$  – аэродинамический момент,  $\ddot{\alpha}_{\max}$  – максимальное угловое ускорение направляющей,  $\dot{\alpha}$  – угловая скорость направляющей,  $\alpha$  – угол подъема направляющей,  $\alpha_0$  – начальный угол подъема направляющей,  $d(\alpha)$  – плечо максимальной силы нагрузки, определяемое по формуле (2):

$$d(\alpha) = \left| \frac{BO (C_y \cos(\alpha - \alpha_0) - C_x \sin(\alpha - \alpha_0))}{BC(\alpha)} \right| \quad (2)$$

где

$$BC(\alpha) = \sqrt{BO^2 - 2 \cdot BO \cdot (C_x \cdot \cos(\alpha - \alpha_0) - C_y \cdot \sin(\alpha - \alpha_0)) + C_x^2 + C_y^2} \quad (3)$$

Используя определенную систему допущений, математическое описание трехфазного вентильного двигателя постоянного тока встраиваемой конструкции можно привести к системе уравнений описывающих классический двигатель постоянного тока, поэтому с целью упрощения расчетов воспользуемся данными допущениями:

$$\begin{aligned} u_\delta &= i_\delta + T_\delta \frac{di_\delta}{dt} + C_e \omega_\delta \\ M_\delta &= C_m i_\delta \\ J_\delta \frac{d\omega_\delta}{dt} &= M_\delta - M_n \\ \frac{d\varphi_\delta}{dt} &= \omega_\delta \\ \frac{d\omega_\delta}{dt} &= \varepsilon_\delta \end{aligned} \quad (4)$$

где  $u_\delta$  – эквивалентное управляющее напряжение в обмотке двигателя,  $i_\delta$  – эквивалентный ток в обмотках двигателя,  $T_\delta$  – эквивалентная постоянная времени,  $M_\delta$  – момент развиваемый двигателем,  $M_n$  – момент нагрузки на валу двигателя,  $\varphi_\delta, \omega_\delta, \varepsilon_\delta$  – угол поворота вала двигателя, его угловые скорость и ускорение.

Уравнения (1) – (4) составляют математическое описание привода вертикального канала наведения и стабилизации, которое будет использоваться в дальнейшем для синтеза нейро-нечеткого алгоритма управления.

## 2. Синтез алгоритма управления

Синтез нейро-нечеткого регулятора проводился по методу обратного распространения ошибки [1]. Обучение нейросети проводилось с помощью наблюдения за реакцией системы на сигнал, подаваемый с генератора случайных чисел. Simulink-схемы, на которых

изображены структура регулятора, схема обучения и финальная схема моделирования системы приведены на рисунках 2-4:

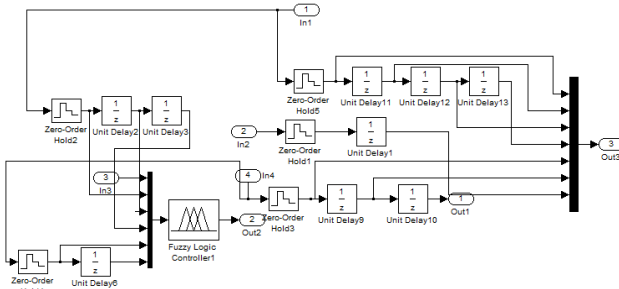


Рис. 2. Структура нейро-нечеткого регулятора

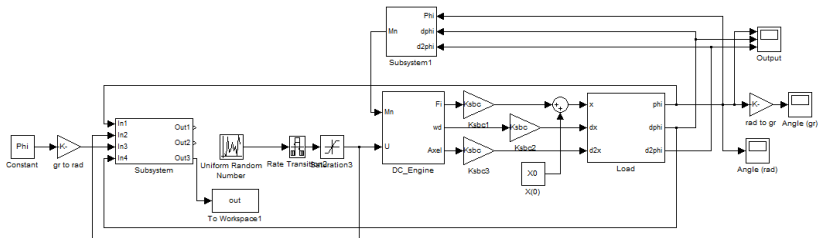


Рис. 3. Simulink-схема обучения системы

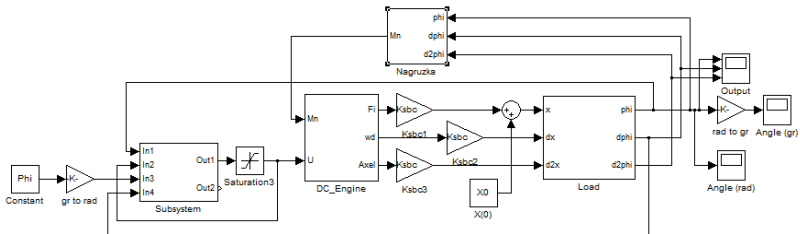
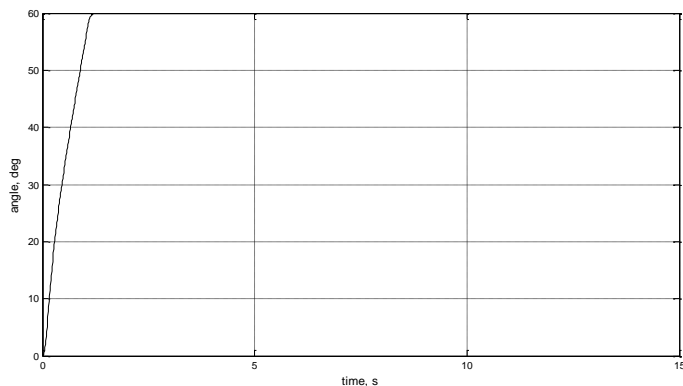


Рис. 4. Simulink-схема привода с нейро-нечетким регулятором

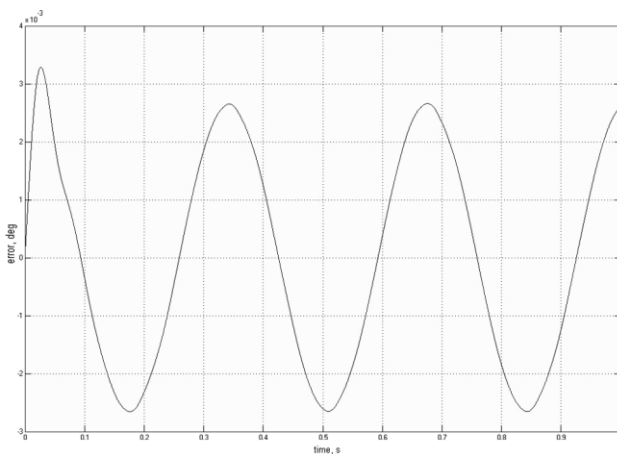
В ходе моделирования были получены следующие результаты. При подаче на вход системы постоянного входного воздействия, соответствующего перебору направляющей из начального положения на угол 60 градусов был получен график переходного процесса, приведенный на рисунке 5. По графику видно, что сигнал

обрабатывается без статической ошибки, время регулирования составило примерно 1,2 секунды.



*Рис. 5.* Переходный процесс в системе наведения и стабилизации при подаче на вход постоянного воздействия  $50^\circ$

Усложним задачу для регулятора, добавив ко входному сигналу гармоническую составляющую, которая будет имитировать качку основания, на котором расположен привод наведения и стабилизации. График ошибки обработки сигнала приведен на рисунке 6.



*Рис. 6.* Ошибка обработки входного воздействия с учетом качки основания

Как видно из рисунка, максимальная ошибка отработки сигнала составляет примерно 0,0032 градуса, что является удовлетворительным показателем работы системы.

### **Заключение**

В результате проведенной работы были получены следующие результаты:

1. Получена математическая модель силового привода вертикального канала наведения и стабилизации с шариковинтовой передачей, выполненная на базе трехфазного вентильного двигателя встраиваемой конструкции;
2. Сформирован нейро-нечеткий алгоритм управления приводом, сформированный по методу обратного распространения ошибки;
3. Проведено имитационное моделирование, показывающее работоспособность полученного алгоритма управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-2023

### **Литература**

1. Романов Д.Е. Нейронные сети обратного распространения ошибки // ИВД. 2009. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyronnye-seti-obratnogo-rasprostraneniya-oshibki> (Дата обращения: 14.01.2023)