

**Черный С. П., Бузикаева А. В., Годяев А. И., Давыдов Ю. А.**  
**S. P. Chernii, A. V. Buzikaeva, A. I. Godyaev, Yu. A. Davydov**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНО-МАТРИЧНОГО ОПИСАНИЯ**

### **MODELING OF A FUZZY CONTROL SYSTEM OF A DC ELECTRIC DRIVE BASED ON A VECTOR-MATRIX DESCRIPTION**

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Sergey P. Chernii** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Бузикаева Алина Валерьевна** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Alina V. Buzikaeva** – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Годяев Александр Иванович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь» Дальневосточного государственного университета путей сообщений (Россия, Хабаровск); 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47. E-mail: at@festu.khv.ru.

**Alexander I. Godyaev** – Doctor of Engineering, Professor, Head of Automation, Telemechanics and Communications Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk Territory, Khabarovsk, st. Serysheva, 47. E-mail: at@festu.khv.ru.

**Давыдов Юрий Анатольевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспорт железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщений (Россия, Хабаровск); 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47. E-mail: mv@festu.khv.ru.

**Yury A. Davydov** – Doctor of Engineering, Professor, Railway Transport Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk Territory, Khabarovsk, st. Serysheva, 47. E-mail: mv@festu.khv.ru.

**Аннотация.** В данной работе представлена методика синтеза интеллектуальных систем управления, основанных на структуре нечёткой модели Такаги – Сугено. Представлено построение нечёткого регулятора Такаги – Сугено, использующего концепцию «параллельно распределённой коррекции», которая базируется на внедрении нечёткой модели процесса в канал обратной связи. Такой подход позволяет получить полную информацию об объекте управления как в количественном, так и в качественном виде. Методика проектирования является концептуально простой, естественной и поясняется на примере системы управления электроприводом вращательного движения промышленного робота.

**Summary.** This paper presents a methodology for the synthesis of intelligent control systems based on the structure of the Takagi-Sugeno fuzzy model. The construction of a Takagi-Sugeno fuzzy controller using the concept of «parallel distributed correction», which is based on the introduction of a fuzzy process model into the feedback channel, is presented. This approach allows you to get complete information about the control object, both quantitatively and qualitatively. The design technique is conceptually simple, natural, and is illustrated by the example of an electric drive control system for the rotational motion of an industrial robot.

**Ключевые слова:** алгоритмы нечёткого вывода, система управления электроприводом, векторно-матричное описание, нечёткий логический регулятор Такаги – Сугено.

**Key words:** fuzzy inference algorithms, electric drive control system, vector-matrix description, Takagi-Sugeno fuzzy combined controller.

*Исследования проводятся в рамках гранта № ВНО10/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критериев энергоэффективности».*

УДК 681.5.01:658.5

**Введение.** Зачастую формальное описание объекта управления определяется компромиссом между рядом допущений и набором ограничений, накладываемых на систему управления в целом. С ростом сложности технологических процессов математическое описание не в полной мере способно отразить зависимости, протекающие внутри такого процесса, и ограничено лишь количественным набором параметров и характеристик. В настоящее время большинство сложных объектов управления характеризуется существенным количеством информации качественного содержания. Таким образом, обработку совокупности фактографических данных и информации, содержащейся в виде процедуры правил, целесообразно описывать с применением теории нечётких множеств, а именно моделей Такаги – Сугено [1].

Нечёткие модели служат связующим звеном между двумя подходами (количественным и качественным) и являются наиболее приемлемыми для описания слабо формализованных процессов [2]. В последнее время отмечают быстро растущий интерес к нечёткому управлению, а также повсеместное внедрение нечётких систем управления, но необходимо отметить, что многим важным вопросам не уделяется должного внимания, например анализу устойчивости, анализу производительности, методологии управления и проектирования.

С одной стороны, нечёткая логика обеспечивает простой и прямой способ декомпозиции задачи моделирования и расчёта управления в группу локальных задач, которые проще решать и обрабатывать, а также обладает механизмом, который соединяет эти задачи вместе, чтобы впоследствии составить полную модель и расчёт управления. С другой стороны, достижения в современном управлении сделали доступным большое количество средств проектирования. Однако это справедливо только в случае расчётов линейных систем управления [3].

**Постановка задачи.** На сегодняшний день известны многочисленные исследования по применению нечёткой логики для автоматического управления и распознавания образов. В числе основных промышленных применений теории можно назвать управление, диагностику неисправностей, распознавание образов, обработку изображений, анализ надёжности, проектирование систем и т. д. [4].

В качестве объекта исследования используется система автоматического управления электроприводом вращательного движения промышленного робота. Объектом управления является двигатель постоянного тока независимого возбуждения модели СЛ-569М [5]. На рис. 1 приведена структурная схема нечёткой системы управления.

Синтез нечёткой системы управления следует начать с определения нечёткой модели Такаги – Сугено.

Обозначим  $x_1(t) = \varphi(t)$ ,  $x_2(t) = \omega(t)$ ,  $x_3(t) = I_a(t)$ ,  $x_4(t) = K_E(t)$ , тогда система дифференциальных уравнений в векторно-матричной форме примет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J} \cdot x_3 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_a} & -x_2 \cdot \frac{1}{R_a} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2 \cdot 10^{-5}} \end{bmatrix} \cdot x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{R_a} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t).$$



1. Если  $z_2(t)$  есть «Положительная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Положительный ток», то  $x'(t) = 40.693 z_2(t) + 12\,886.6 z_3(t)$ .

2. Если  $z_2(t)$  есть «Отрицательная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Положительный ток», то  $x'(t) = -40.693 z_2(t) + 12\,886.6 z_3(t)$ .

3. Если  $z_2(t)$  есть «Положительная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Отрицательный ток», то  $x'(t) = 40.693 z_2(t) - 12\,886.6 z_3(t)$ .

4. Если  $z_2(t)$  есть «Отрицательная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Отрицательный ток», то  $x'(t) = -40.693 z_2(t) - 12\,886.6 z_3(t)$ .

Функции принадлежности нечёткой модели представлены на рис. 2 и 3.

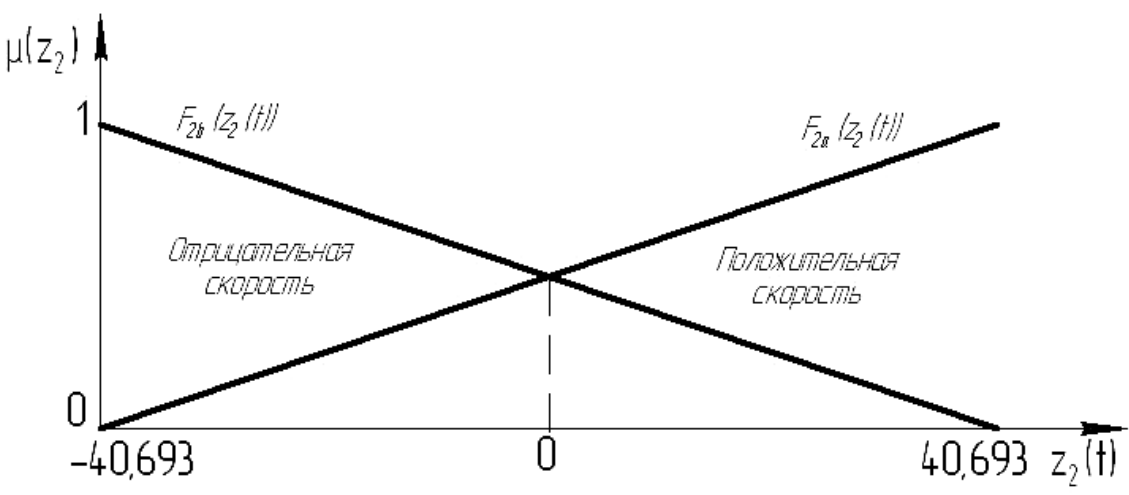


Рис. 2. Функции принадлежности  $F_{2a}(z_2)$  и  $F_{2b}(z_2)$

**Реализация нечёткого регулятора.** После получения нечёткой модели объекта необходимо рассчитать нечёткий регулятор, а именно коэффициенты обратной связи  $K_i$ , посредством решения задачи линейных матричных неравенств:

$$\begin{cases} X > 0 \\ XA_i^T + A_iX - B_iM - M^TB_i^T < 0 \\ K = MX^{-1} \end{cases}$$

при  $X = 1.4$ .

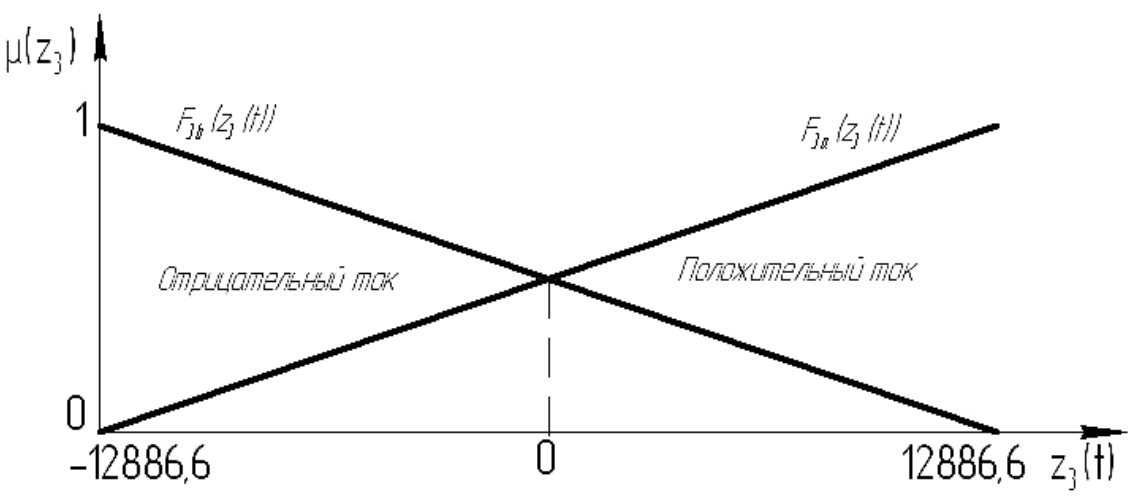


Рис. 3. Функции принадлежности  $F_{3a}(z_3)$  и  $F_{3b}(z_3)$

В результате решения получим

$$K_1 = [-0.031; -0.0063],$$

$$K_2 = [-0.0021; -0.0089],$$

$$K_3 = [-0.089; -0.0035],$$

$$K_4 = [-0.0056; -0.037].$$

Тогда нечёткий регулятор будет представлен моделью:

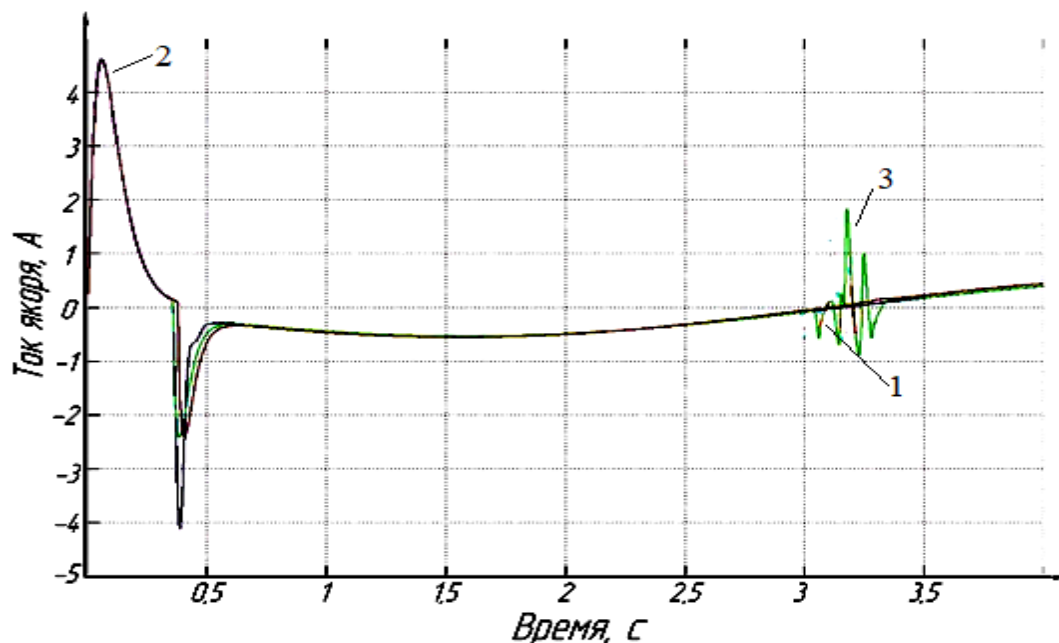
1. Если  $z_2(t)$  есть «Положительная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Положительный ток», то  $u(t) = -0.031 z_2(t) - 0.0063 z_3(t)$ .

2. Если  $z_2(t)$  есть «Отрицательная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Положительный ток», то  $u(t) = -0.0021 z_2(t) - 0.0089 z_3(t)$ .

3. Если  $z_2(t)$  есть «Положительная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Отрицательный ток», то  $u(t) = -0.089 z_2(t) - 0.0035 z_3(t)$ .

4. Если  $z_2(t)$  есть «Отрицательная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Отрицательный ток», то  $u(t) = -0.0056 z_2(t) - 0.037 z_3(t)$ .

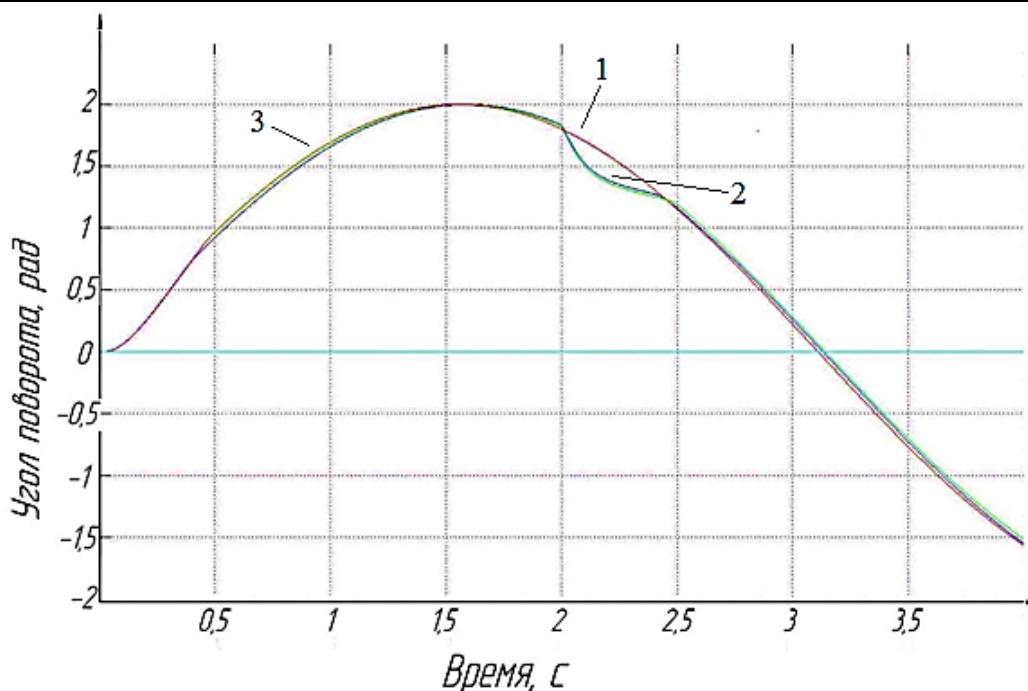
Рассмотрим динамические характеристики систем по переменным состояния при задающем воздействии синусоидальной формы амплитудой 2 В и частотой 1 рад/с. На графике (см. рис. 4) видно, что бросок тока рассчитанной нечёткой системы управления (НСУ) составляет 3.2 А, что на 23 % меньше, чем у системы с ПИД-регулятором, и на 25 % меньше, чем у НСУ по прямым показателям. Анализ графика переходных характеристик позволяет говорить о том, что все системы одинаково хорошо обрабатывают задающее и возмущающее воздействие [8].



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – НСУ по прямым показателям; 3 – НСУ на основе ВМО

Рис. 4. Графики переходных процессов при возмущающем воздействии по току

Результаты моделирования, приведённые на рис. 5, наглядно показывают, что в контуре тока нечёткой системы управления по прямым показателям возникают колебания тока при переходе двигателя в режим реверса. Нечёткая система управления на основе векторно-матричного описания (ВМО) невосприимчива к возмущению заданной величины [9].



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – НСУ по прямым показателям; 3 – НСУ на основе ВМО  
 Рис. 5. Графики переходных процессов при возмущающем воздействии по скорости

**Заключение.** Результаты моделирования подтвердили эффективность применения представленной выше методики проектирования НСУ. Показаны достоинства метода:

- нелинейная система может быть точно представлена нечёткой системой посредством выбора соответствующих функций принадлежности;
- простота и логическое понимание процесса управления;
- облегчение процесса синтеза и некоторая универсальность рассчитанных регуляторов;
- улучшение динамики объекта;
- наличие у системы управления с нечётким регулятором Такаги – Сугено высоких адаптивных свойств, что делает возможным использование таких систем в условиях изменений параметров объекта [10].

Нечёткие системы управления с регулятором на основе модели Такаги – Сугено целесообразно использовать в управлении сложными электромеханическими объектами высокого порядка. Такие системы эффективно использовать в тех объектах, где существует необходимость формирования специфических законов управления, т. е. где качество динамики системы играет ключевую роль.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SymPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
2. Cherny S., Khrulkov V., Vasilchenko S. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. P. 9111902. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902.
3. Susdorf V. I., Cherniy S. P., Buzikayeva A. V. Optimization of Series Motor Drive Dynamics // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934344.
4. Savelyev D. O., Gudim A. S., Solovov D. B. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (automatic control system) elements // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019. 2019. P. 8725324. DOI: 10.1109/Eastonf.2019.8725324.

5. Башарин, А. В. Управление электроприводами: учеб. пособие / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
6. Стельмашук, С. В. Согласованное управление транспортировки ленты с модальным регулятором / С. В. Стельмашук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1 (38). – С. 28-40.
7. Болдырев, В. В. Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения / В. В. Болдырев, М. А. Горькавый // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 9-18.
8. Соловьев, В. А. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 23-28.
9. Стельмашук, С. В. Синтез ПИД-регулятора системы автоматического регулирования с максимальным быстродействием и ограничением на перерегулирование / С. В. Стельмашук, А. Ю. Чернов // Электротехнические системы и комплексы. – 2012. – № 20. – С. 256-265.
10. Трусов, Р. Е. Повышение точности мягких вычислений в системе поддержки процессов ситуационной оценки / Р. Е. Трусов, М. А. Горькавый // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 488-491.
11. Mazandarani M., Pariz N., Kamyad A. V. Granular differentiability of Fuzzy-Number-Valued functions // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018. 26(1).
12. Савельев, Д. О. Программный модуль нечёткого логического компенсатора нелинейных элементов / Д. О. Савельев, А. С. Гудим, В. Н. Хрульков // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы международной научно-практической конференции. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2017. – С. 128-131.