

**Гудим А. С., Савельев Д. О., Плохотнюк В. В.**  
**A. S. Gudim, D. O. Savelyev, V. V. Plokhotnyuk**

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

## **INTELLIGENT SYSTEM FOR COMPENSATION OF NONLINEARITIES OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS**

**Гудим Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, декан факультета энергетики и управления Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Aleksandr S. Gudim** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Power Engineering and Management Faculty, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Савельев Дмитрий Олегович** – старший преподаватель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», руководитель Центра робототехники Ресурсного центра Технопарка Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Dmitriy O. Savelyev** – Senior Lecturer, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Head of Robotics Center of Technopark Resource Center, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Плохотнюк Василий Владимирович** – студент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Vasily V. Plokhotnyuk** – Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Аннотация.** В статье представлен анализ программного модуля, реализующего сложные законы управления для компенсации существенных сопутствующих нелинейных элементов систем автоматического управления. Отражены результаты исследования компенсации нелинейных элементов при помощи интеллектуальных систем на основе мягких вычислений. Рассмотрено негативное влияние нелинейного элемента вида «зона насыщения». Представлены возможности автоматического синтеза параметров нечёткого логического регулятора и его настройки на желаемый способ интеграции в объект управления. Приведены полученные в ходе исследования оценки качества регулирования объекта и их сравнительные характеристики ошибок регулирования системы.

**Summary.** The paper presents the analysis of the software module realizing complex control laws for compensation of significant associated nonlinear elements of automatic control systems. The results of research of compensation of nonlinear elements by means of intelligent systems based on soft computing are reflected. The negative influence of nonlinear element of the type «saturation zone» is considered. The possibilities of automatic synthesis of parameters of fuzzy logic regulator and its adjustment to the desired way of integration into the control object are presented. Estimates of the object regulation quality and their comparative characteristics of the system regulation errors obtained in the course of the research are given.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления, нечёткий логический регулятор, программный модуль, компенсация нелинейностей.

**Key words:** intelligent control system, fuzzy logic controller, software system, compensation of nonlinearities.

УДК 681.5.01:658.5

**Введение.** В современном мире с учётом развития технологий микропроцессорной техники и развития интеллектуальных технологий повышаются требования, предъявляемые к системам автоматического управления. Одним из показателей качества в АСУП и АСУТП является точность позиционирования и время переходного процесса. Несмотря на это реальным объектам

управления присущи нелинейные свойства, которые оказывают своё влияние на переходные процессы, ухудшая показатели качества управления объектом.

Для уменьшения негативного влияния сопутствующих нелинейных элементов (НЭ) на систему управления объектом применяют различные методы [1; 2; 3] и способы [4], позволяющие компенсировать их воздействие. Однако применение того или иного способа компенсации нелинейных элементов основывается на степени формализации объекта управления. Ввиду повышения сложности математического описания объектов управления традиционные способы компенсации могут быть неприменимы. Таким образом, целесообразно применение интеллектуальных систем управления в качестве средств для компенсации сопутствующих нелинейных элементов и уменьшения их отрицательного влияния на переходные процессы объекта регулирования. В рамках примера в статье рассматривается уменьшение влияния нелинейного элемента зоны насыщения, которое может оказывать своё воздействие на исполнительные звенья объекта регулирования, тем самым уменьшая динамику системы либо вызывая потерю устойчивости. Наличие такого нелинейного элемента приводит к сильному затягиванию переходных процессов и, как следствие, к снижению быстродействия системы при больших внешних воздействиях. Использование интеллектуальной системы позволит добиться значительного ускорения переходных процессов при подаче упреждающих сигналов управления с нечёткого логического регулятора, являющегося компенсатором нежелательных возмущающих воздействий объекта регулирования.

Для получения максимального быстродействия при наличии таких нелинейностей в статье рассматривается использование нечёткого логического компенсатора (далее НЛК) [5], который позволит создавать форсирующие воздействия, уменьшая сигнал задержки и ошибку управления объектом.

В статье рассматриваются программная реализация НЛК, его описание и реализация автоматической настройки под различные виды нелинейных элементов систем автоматического управления [6; 7]. Настройка нечёткого логического регулятора производится посредством расширенного способа компенсации сопутствующих нелинейных элементов систем автоматического управления [4–7].

**Имитационное моделирование.** Построение программного модуля базируется на реализации интеллектуального алгоритма. В нём отражены основные этапы синтеза параметров и настройки нечёткого логического регулятора для компенсации существенных нелинейностей систем автоматического управления. Основная программа представляет собой пользовательский интерфейс с кнопками, которые отвечают за выбор имитационной модели, её параметров, а также автоматическую настройку нечёткого логического компенсатора. Дополнительные настройки позволяют произвести выбор и детальные настройки пользователем способа компенсации, а также предоставить визуализацию переходных процессов и параметров компенсатора.

На рис. 1 представлено главное окно программного модуля, содержащее пять основных групп. Первая группа – «Модель нелинейного элемента» – содержит окно со списком и возможностью выбора математической модели системы со статическим нелинейным элементом. Как пример выбран статический нелинейный элемент вида «Зона насыщения», чьё негативное влияние на системы управления описано ранее.

Группа «Параметры модели» позволяет установить шаг моделирования и время расчёта. После произведения математических расчётов появляется возможность просмотра различных характеристик в разблокированной группе «Визуализация», а также возможность ручной или автоматической настройки НЛК в группе «Настройка нечёткого логического регулятора» (см. рис. 2).

Нелинейная характеристика зоны насыщения, продемонстрированная на рис. 3, используется для проверки работоспособности программного модуля и применимости расширенного способа компенсации нелинейностей.

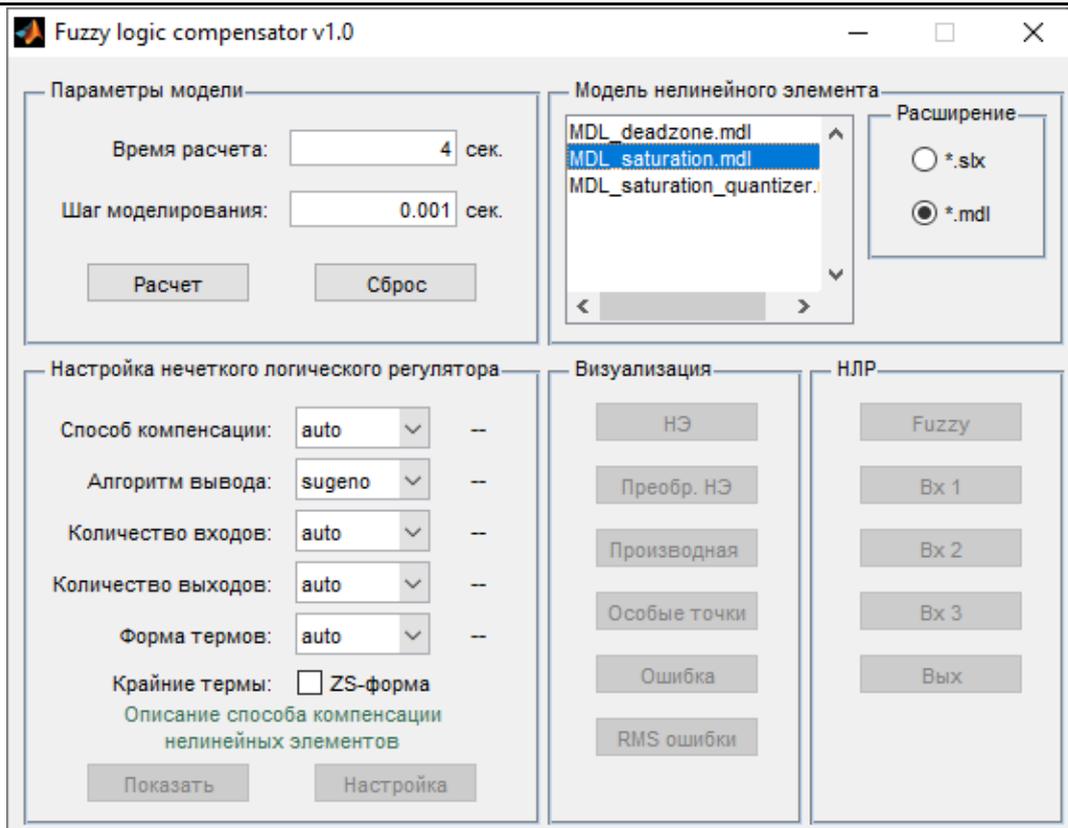


Рис. 1. Главное окно программного модуля

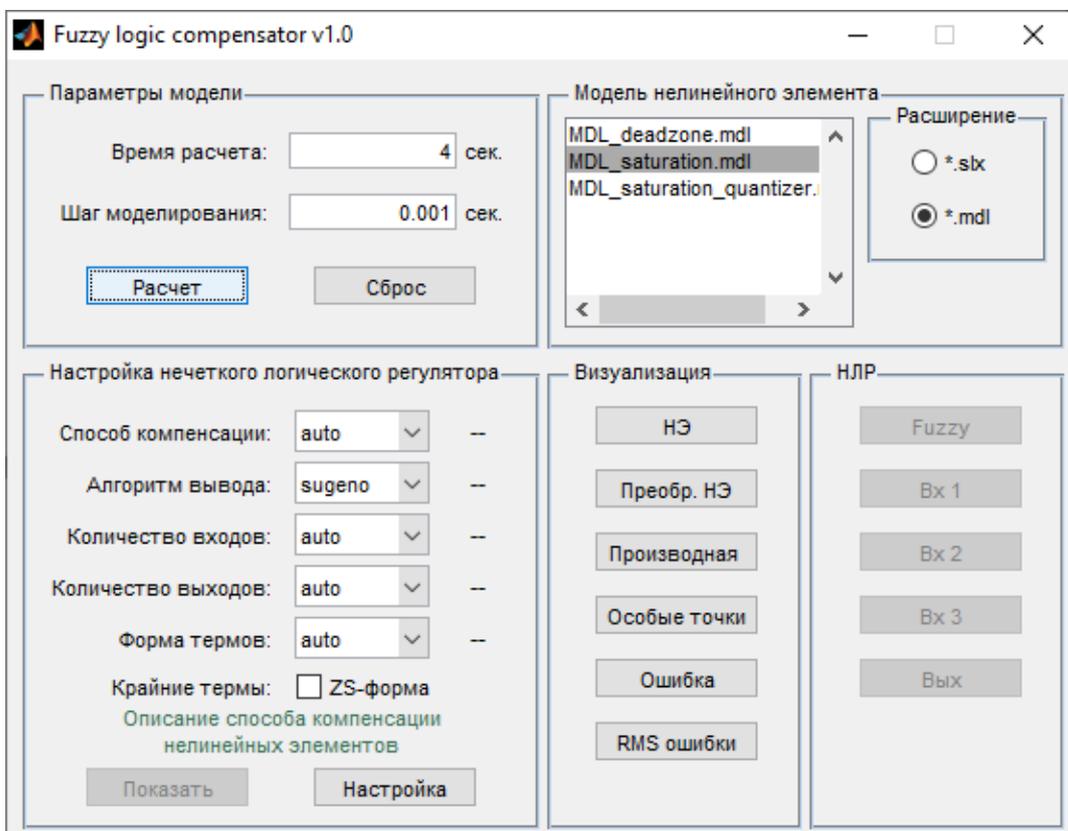


Рис. 2. Главное окно программного модуля с рассчитанной моделью НЭ

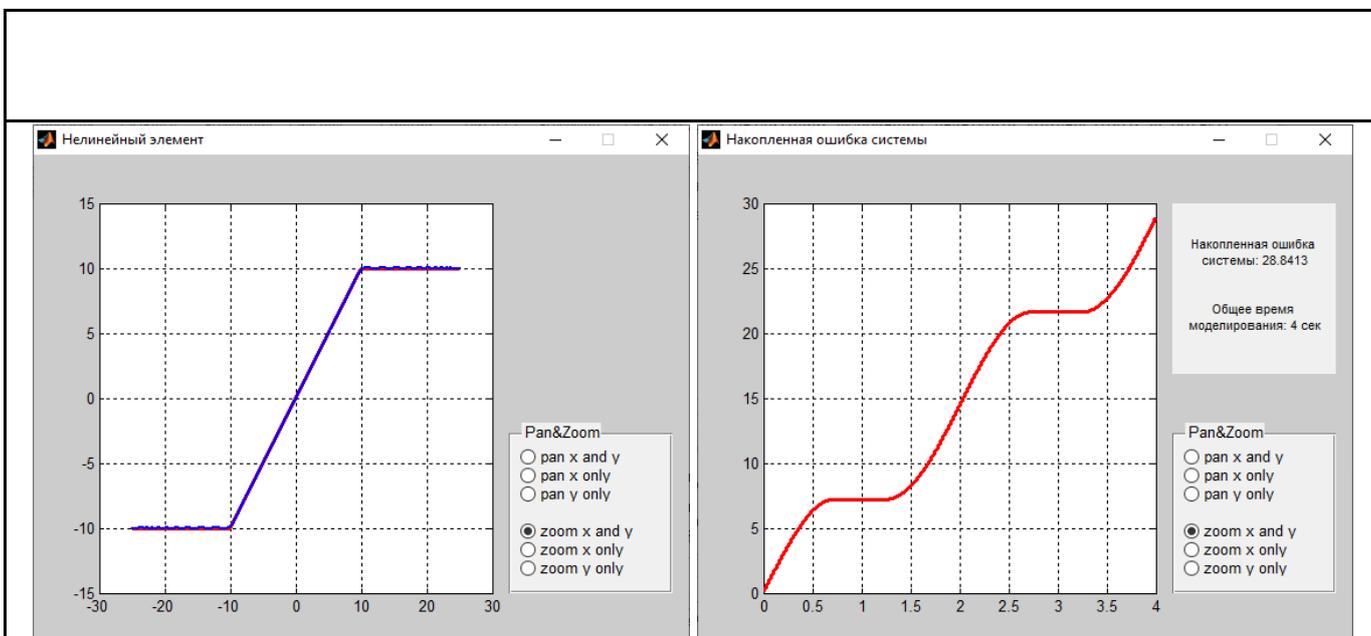


Рис. 3. Примеры графических окон НЭ вида «Зона насыщения» и накопленной ошибки системы рассчитанной модели

После выбора способа интеллектуальной компенсации нелинейных элементов появляется возможность получить входные и выходные параметры нечёткого логического регулятора [8; 9]. Для получения сравнительных характеристик была произведена настройка НЛК по каждому из трёх способов компенсации нелинейных элементов. Нечётким логическим выводом выбран алгоритм Сугено нулевого порядка с автоматически настроенным количеством входов и выходов (см. рис. 4). Форма термов задана комбинацией Гауссовых функций принадлежности, а крайние термы принимают Z- и S-образную форму.

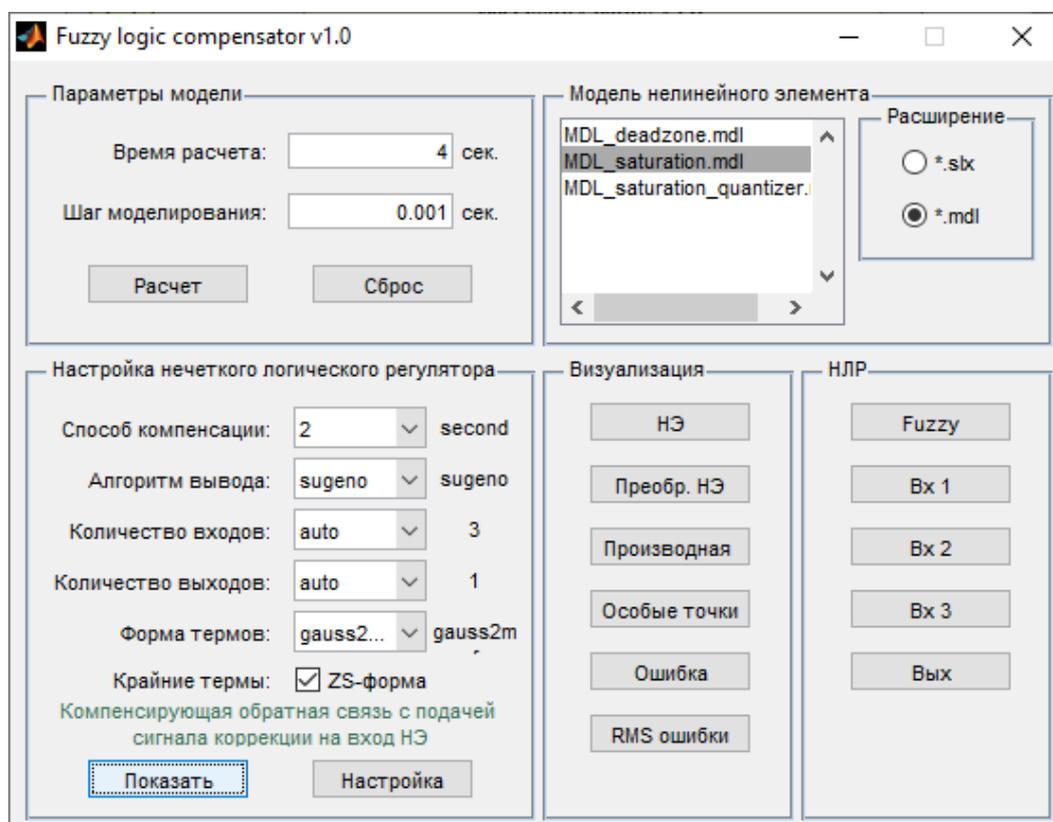


Рис. 4. Главное окно программного модуля с ручной преднастройкой НЛК

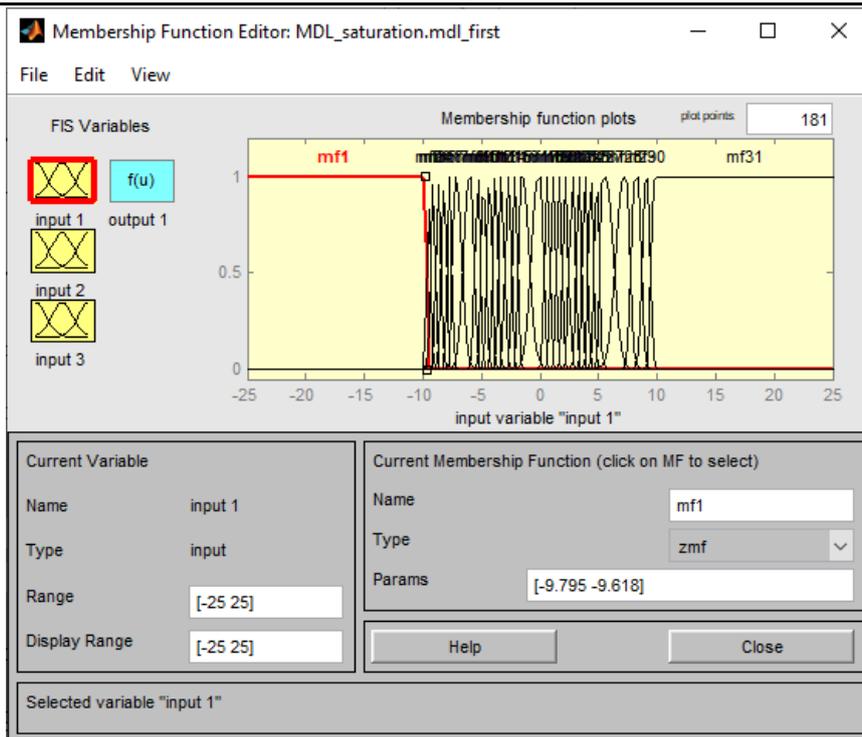


Рис. 5. Распределение функций принадлежности первого входа НЛК для первого и второго способа компенсации НЭ

Аналогичным образом синтезируются нечёткие системы с алгоритмом вывода Мамдани. Контроллер нечёткой логики использует сигнал ошибки и настраивает НЛК таким образом, чтобы максимально снизить ошибку системы. Это в свою очередь влияет на количество лингвистических переменных [6; 7], которые добавляются в зависимости от сложности нелинейного элемента (НЭ): input1, input2 и input3 (см. рис. 5-8).

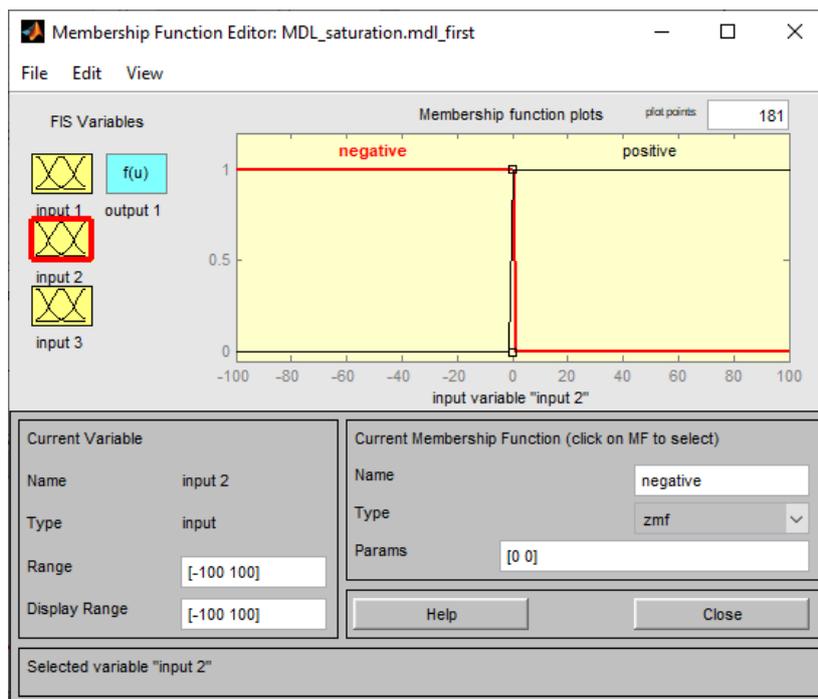


Рис. 6. Распределение функций принадлежности второго входа НЛК для первого и второго способа компенсации НЭ

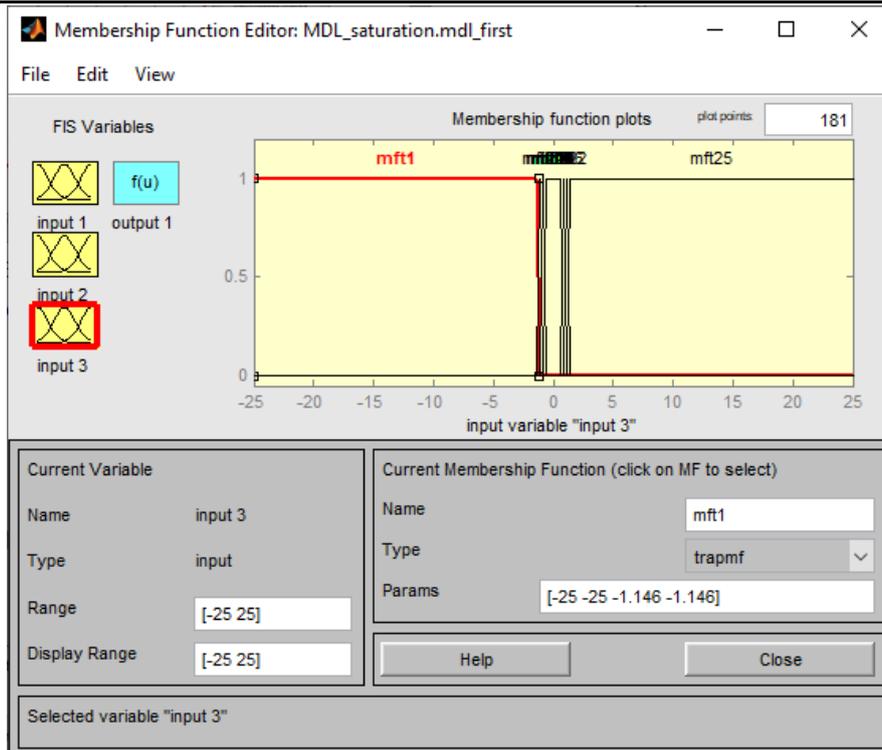


Рис. 7. Распределение функций принадлежности третьего входа НЛК для первого и второго способа компенсации НЭ

После моделирования системы с упреждающими воздействиями НЛК были получены графики среднеквадратической ошибки системы для каждого из рассмотренных способов компенсации НЭ, представленные на рис. 9.

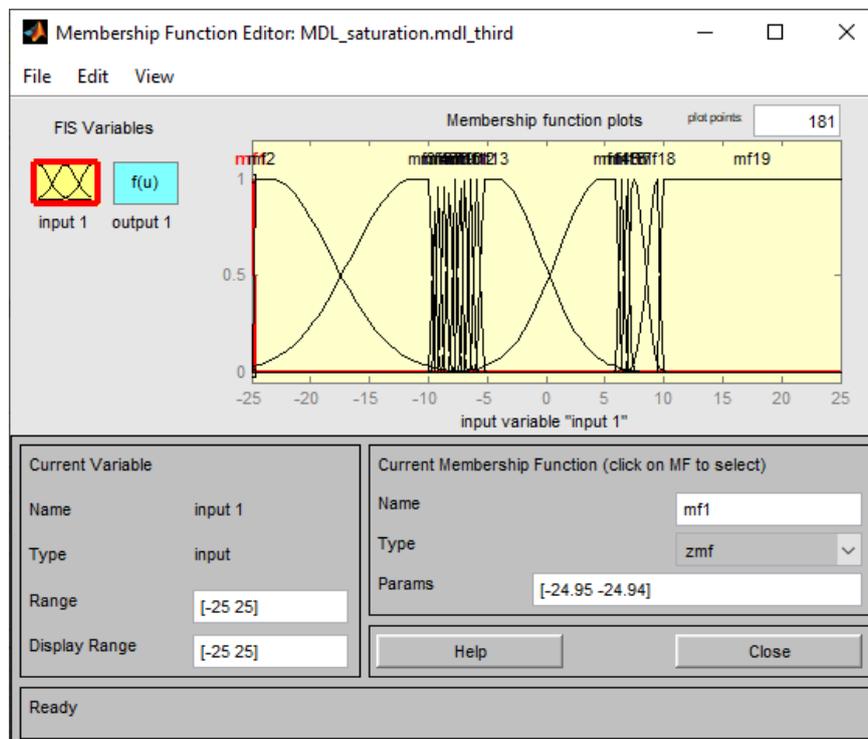


Рис. 8. Распределение функций принадлежности входа НЛК для третьего способа компенсации НЭ

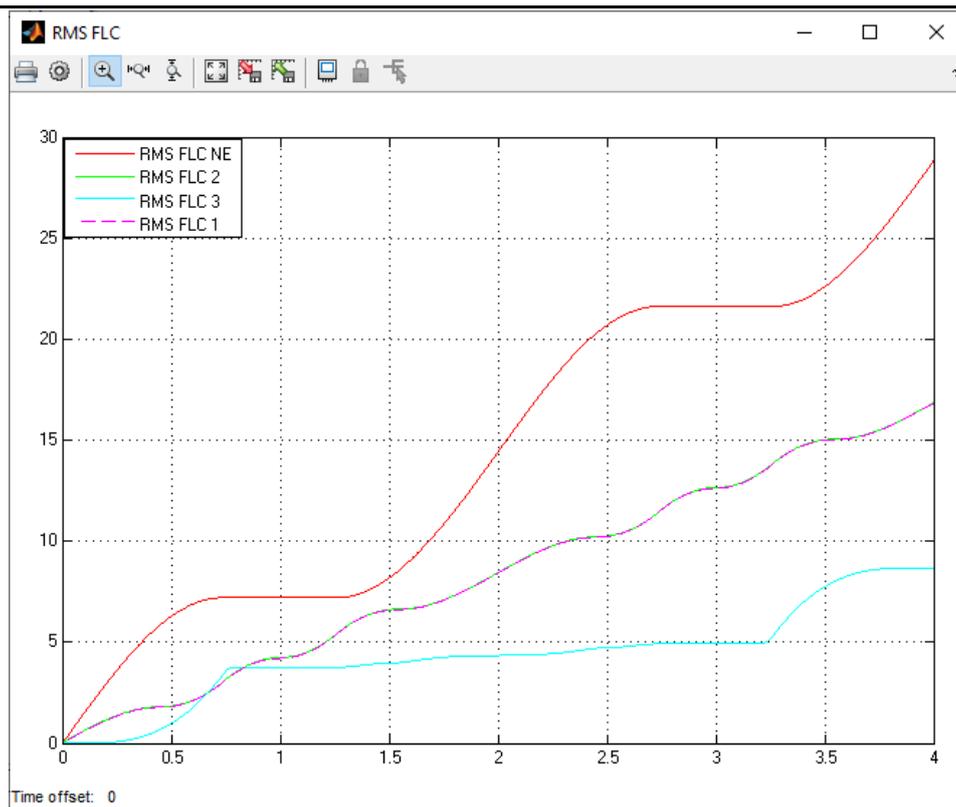


Рис. 9. Среднеквадратическая ошибка системы по времени

На рис. 9 представлены следующие переходные характеристики:

- RMS FLC NE – среднеквадратическая ошибка нелинейности;
- RMS FLC 1 – среднеквадратическая ошибка нелинейности с последовательно включённым регулятором;
- RMS FLC 2 – среднеквадратическая ошибка нелинейности с включённым регулятором по обратной связи;
- RMS FLC 3 – среднеквадратическая ошибка нелинейности с параллельно включённым регулятором.

При коррекции нелинейного элемента вида «зона нечувствительности» среднеквадратическая ошибка за время равное 4 с составила:

- исходный сигнал объекта управления  $RMS(\theta(t)) = 28,84$ ;
- коррекция путём введения прямой связи на вход нелинейного элемента  $RMS(\theta(t)) = 16,81$ ;
- коррекция путём введения обратной связи на вход нелинейного элемента  $RMS(\theta(t)) = 16,83$ ;
- коррекция путём введения прямой связи на выход нелинейного элемента  $RMS(\theta(t)) = 8,67$ .

**Заключение.** На основании анализа работы программного модуля можно утверждать, что разработанное программное обеспечение позволяет по желанию пользователя производить выбор способа компенсации исходя из заданных требований.

Программный модуль обеспечивает автоматический процесс настройки НЛК для ослабления влияния сопутствующих нелинейных элементов систем автоматического управления. Заложённая в структуру программного модуля многофункциональность приёмов компенсации нелинейностей обеспечивает более высокую точность компенсации сопутствующих нелинейных элементов систем автоматического управления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Купова, А. В. Программная реализация нечёткого регулятора компенсирующего устройства на языке функциональных блоков / А. В. Купова, А. В. Купов, В. А. Соловьев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № V (77). – С. 36-44.
2. Гайдук, А. Р. Методы синтеза нелинейных систем управления (квазилинейный подход): учеб. пособие для вузов / А. Р. Гайдук. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 288 с.
3. Попов, Е. П. Приближённые методы исследования нелинейных автоматических систем / Е. П. Попов, И. П. Пальтов. – М.: Физматгиз, 1960. – 790 с.
4. Гудим, А. С. Нечёткие алгоритмы компенсации нелинейностей САУ / А. С. Гудим, И. В. Зайченко, В. А. Соловьев // Информатика и системы управления. – 2005. – № 2 (10). – С. 89-101.
5. Способ компенсации статических нелинейностей с использованием мягких вычислений / Д. О. Савельев, А. С. Гудим, С. П. Черный, С. И. Сухоруков // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2015. – № 1. – С. 35-42.
6. Savelyev, D. O. Software Fuzzy Logic Compensator of Nonlinear Elements of Automatic Control System / D. O. Savelyev, A. S. Gudim // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, 03-04 октября 2018 года. – EN: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8602829. – DOI 10.1109/FarEastCon.2018.8602829.
7. Савельев, Д. О. Особенности компенсации неоднозначных сопутствующих нелинейностей с использованием нечёткого подхода / Д. О. Савельев, А. С. Гудим, С. П. Черный // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4 (42). – С. 149-158.
8. 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 междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29-30 сентября 2017 года / С. В. Белых (отв. ред.). – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2017. – С. 128-131.
9. Savelyev, D. O. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (Automatic Control System) elements / D. O. Savelyev, A. S. Gudim, D. B. Solovev // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019, Vladivostok, 01-02 марта 2019 года. – Vladivostok, 2019. – P. 8725324. – DOI 10.1109/Eastconf.2019.8725324.