
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5.01:658.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-213-221

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Д. О. САВЕЛЬЕВ, С. П. ЧЕРНЫЙ, В. А. СОЛОВЬЕВ

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, Россия
E-mail: kerau@knastu.ru*

Исследуются принципы многокаскадного управления и методы компенсации статических нелинейных элементов систем автоматического управления. Вследствие того, что при компенсации более сложных нелинейных элементов использование только одного из известных способов компенсации не всегда позволяет снизить ошибку системы до желаемой величины, предложено новое решение — способ компенсации, построенный на принципе многокаскадного управления, который практически полностью сводит ошибку к нулю. Представлены особенности настройки интеллектуальных систем, основанных на теории нечетких множеств, для решения задачи компенсации естественных и искусственных нелинейностей. Проанализировано влияние различных алгоритмов нечеткого логического вывода при реализации технологии многокаскадного нечеткого управления для компенсации нелинейностей различного типа.

Ключевые слова: *системы автоматического управления, программный комплекс, компенсация нелинейных элементов, нечеткая логика, интеллектуальные системы, нечеткий логический регулятор, программный комплекс, интеллектуальный модуль*

Компенсации нелинейностей в системах автоматического регулирования посвящено достаточно много публикаций [1]. Так, в работе [2] для повышения точности компенсации предлагается использовать нечеткие алгоритмы и рассматриваются несколько вариантов структурного включения нечеткого логического компенсатора. Однако каждая реализация компенсатора эффективна только для конкретного варианта нелинейных элементов. В этой связи в настоящей статье предлагается несколько иной способ построения нечеткого компенсирующего устройства.

Один из возможных вариантов схемной реализации нечеткого компенсирующего устройства, построенного по многокаскадному принципу управления, представленному в работах [3, 4], приведен на рис. 1. Здесь через FIS_11, FIS_21 и FIS_31 обозначены нечеткие логические компенсаторы на основе нечетких логических регуляторов, реализующих различные способы компенсации нелинейных элементов, рассмотренные в работах [5—7]. Нечеткие логические компенсаторы образуют внутренний каскад и являются исполнительными механизмами для подачи сигнала коррекции на объект управления. В свою очередь, нечеткий логический регулятор FIS, далее — нечеткий внешний компенсатор, обеспечивает управление внутренними компенсаторами [8—10], определяя в конкретный момент наиболее эффективные из них. Тем самым, внешний каскад выполняет подключение к системе управления от одного до

трех компенсаторов, подавая сигналы управления на каждый из них в виде весового коэффициента от нуля до единицы.

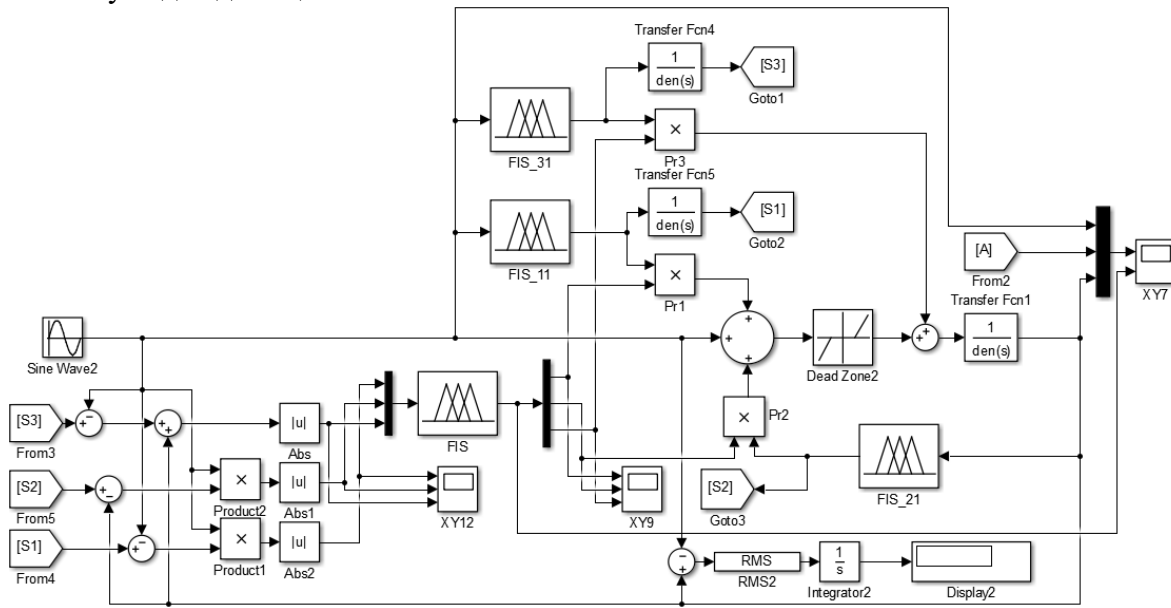


Рис. 1

Работоспособность устройства и качество компенсации оценивались для системы регулирования, содержащей нелинейное звено типа „зона нечувствительности“. По характеристике используемого нелинейного элемента, представленной на рис. 2, были получены требуемые параметры настройки нечетких логических компенсаторов для трех различных способов компенсации статических нелинейных элементов систем автоматического управления.

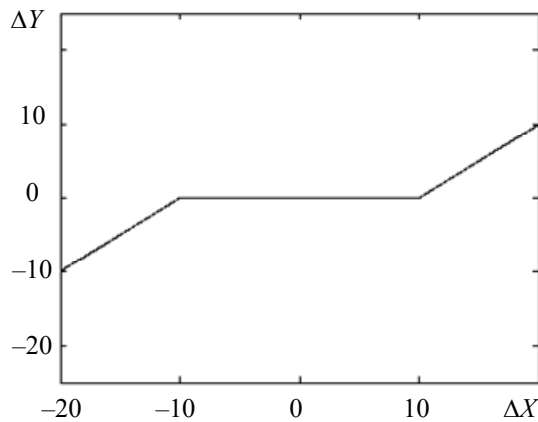


Рис. 2

Каждый нечеткий логический компенсатор имеет один нечеткий логический вход и один выход. Распределение функций принадлежности входного сигнала по диапазону изменения входного параметра для каждого нечеткого логического компенсатора принято равномерным [11, 12], а количество термов в базовом терм-множестве принято равным пяти (mf1, mf2, mf3, mf4, mf5).

Для формирования базы правил систем нечеткого логического вывода компенсаторов выбран алгоритм Сугено нулевого порядка. Таким образом, термы выходной лингвистической переменной output1 имеют следующий вид:

$$output1 = \{omf1, omf2, omf3, omf4, omf5\} = \{-10, 0, 10, 10, -10\};$$

Результирующая база правил нечетких представлений для каждого из трех нечетких логических компенсаторов имеет вид:

1. Если (input1 это mf1) тогда (output1 это omf1)
2. Если (input1 это mf3) тогда (output1 это omf3)

3. Если (input1 это mf5) тогда (output1 это omf5)
4. Если (input1 это mf2) тогда (output1 это omf2)
5. Если (input1 это mf4) тогда (output1 это omf4)

При структурном синтезе внешнего нечеткого логического компенсатора принималось во внимание, что компенсатор должен управлять работой трех внутренних компенсаторов, а формирование сигнала управления, поступающего на внутренний компенсатор, должно происходить по величине ошибки на выходе соответствующего внутреннего компенсатора [11, 12].

Распределение функций принадлежности (Degree of Membership — DM) входного сигнала нечеткого логического регулятора внешнего каскада показано на рис. 3.

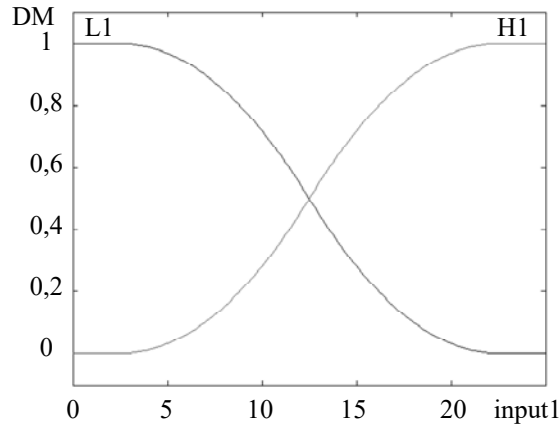


Рис. 3

Базовое терм-множество лингвистической переменной *input1* описывается двумя нечеткими термами L1 и H1 Z- и S-образного типа. Аналогичные наборы базовых терм-множеств L2 и H2, L3 и H3 соответствуют и другим входным лингвистическим переменным нечеткого регулятора, а именно *input2*, *input3*. Приведенной паре термов соответствует величина расогласования ошибки системы в большом и малом для соответствующего метода компенсации нелинейных элементов. Использование функций принадлежности сигмоидального вида [13] во внешнем каскаде обеспечивает получение гладких непрерывно дифференцируемых гиперповерхностей в целях минимизации функции ошибки нечеткой системы [7, 13].

Синтез параметров внешнего нечеткого логического компенсатора по выходному сигналу (распределение функций принадлежности и база правил) базировался на том, что проекция поверхности, описывающая множество выходных значений нечеткого логического вывода, должна быть близка к виду, показанному на рис. 4.

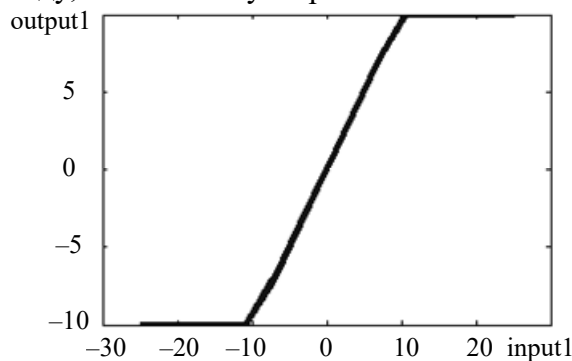


Рис. 4

Кроме того, внешний каскад интеллектуального модуля компенсации предназначен для выбора индивидуальных входных сигналов, поступающих на элементы внутреннего каскада компенсации, а термы выходной лингвистической переменной каждого каскада можно считать идентичными по своей структуре (как и входные). В этом случае их можно записать в следующем виде:

- для нечеткого логического вывода Сугено нулевого порядка:

output1 = {omf1, omf2, omf3} = {0, 0.5, 1};
 output2 = {omf1, omf2, omf3} = {0, 0.5, 1};
 output3 = {omf1, omf2, omf3} = {0, 0.5, 1};

— для нечеткого логического вывода Мамдани [14] — в виде графика, приведенного на рис. 5.

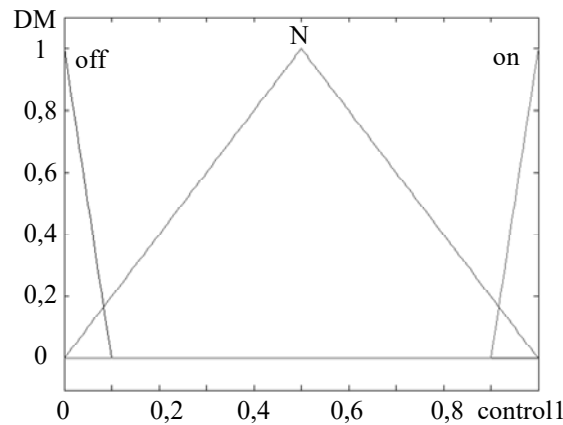


Рис. 5

База правил нечетких представлений внешнего каскада имеет вид:

— для внешнего каскада с нечетким логическим выводом Сугено нулевого порядка:

1. Если (input1 есть L1) и (input2 есть H2) и (input3 есть H3) тогда (output1 есть mf3) (output2 есть mf1) (output3 есть mf1)
2. Если (input1 есть H1) и (input2 есть L2) и (input3 есть H3) тогда (output1 есть mf1) (output2 есть mf3) (output3 есть mf1)
3. Если (input1 есть H1) и (input2 есть H2) и (input3 есть L3) тогда (output1 есть mf1) (output2 есть mf1) (output3 есть mf3)
4. Если (input1 есть L1) и (input2 есть L2) и (input3 есть H3) тогда (output1 есть mf2) (output2 есть mf2) (output3 есть mf1)
5. Если (input1 есть L1) и (input2 есть H2) и (input3 есть L3) тогда (output1 есть mf2) (output2 есть mf1) (output3 есть mf2)
6. Если (input1 есть H1) и (input2 есть L2) и (input3 есть L3) тогда (output1 есть mf1) (output2 есть mf2) (output3 есть mf2)
7. Если (input1 есть L1) и (input2 есть L2) и (input3 есть L3) тогда (output1 есть mf2) (output2 есть mf2) (output3 есть mf2)
8. Если (input1 есть H1) и (input2 есть H2) и (input3 есть H3) тогда (output1 есть mf1) (output2 есть mf1) (output3 есть mf1)

— для внешнего каскада с нечетким логическим выводом Мамдани:

1. Если (input1 есть L1) и (input2 есть H2) и (input3 есть H3) тогда (control1 есть on) (control2 есть off) (control3 есть off)
2. Если (input1 есть H1) и (input2 есть L2) и (input3 есть H3) тогда (control1 есть off) (control2 есть on) (control3 есть off)
3. Если (input1 есть H1) и (input2 есть H2) и (input3 есть L3) тогда (control1 есть off) (control2 есть off) (control3 есть on)
4. Если (input1 есть L1) и (input2 есть L2) и (input3 есть H3) тогда (control1 есть N) (control2 есть N) (control3 есть off)
5. Если (input1 есть L1) и (input2 есть H2) и (input3 есть L3) тогда (control1 есть N) (control2 есть off) (control3 есть N)
6. Если (input1 есть H1) и (input2 есть L2) и (input3 есть L3) тогда (control1 есть off) (control2 есть N) (control3 есть N)
7. Если (input1 есть L1) и (input2 есть L2) и (input3 есть L3) тогда (control1 есть N) (control2 есть N) (control3 есть N)
8. Если (input1 есть H1) и (input2 есть H2) и (input3 есть H3) тогда (control1 есть off) (control2 есть off) (control3 есть off)

На рис. 6 приведен график переходных процессов обработки тестового синусоидального сигнала заданной амплитуды системой управления, содержащей нелинейное звено типа „зона нечувствительности“ при использовании многокаскадной системы коррекции с нечеткими логическими выводами Мамдани и Сугено нулевого порядка, а также с однокаскадными устройствами нечеткой коррекции; на рисунке нумерация кривых соответствует системам: 1 — система без компенсирующего устройства; 2 — система с многокаскадным компенсирующим устройством с нечетким логическим выводом Сугено; 3 — система с многокаскадным компенсирующим устройством с нечетким логическим выводом Мамдани; 4 — система с последовательно включенным компенсатором; 5 — система с компенсатором в цепи обратной связи; 6 — система с параллельно включенным компенсатором.

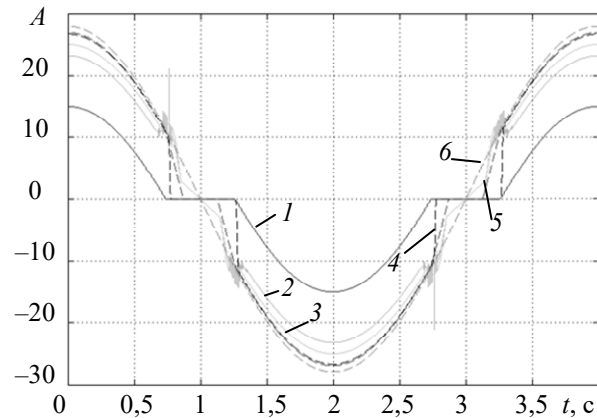


Рис. 6

Структура систем управления (показанных на рис. 6 кривыми 4, 5, 6) представляет собой однокаскадные САУ, описанные в работе [2] и соответствующие отдельно взятым способам компенсации статических нелинейных элементов. Графики, демонстрирующие сигналы управления внутренним контуром многокаскадной системы регулирования, представлены на рис. 7.

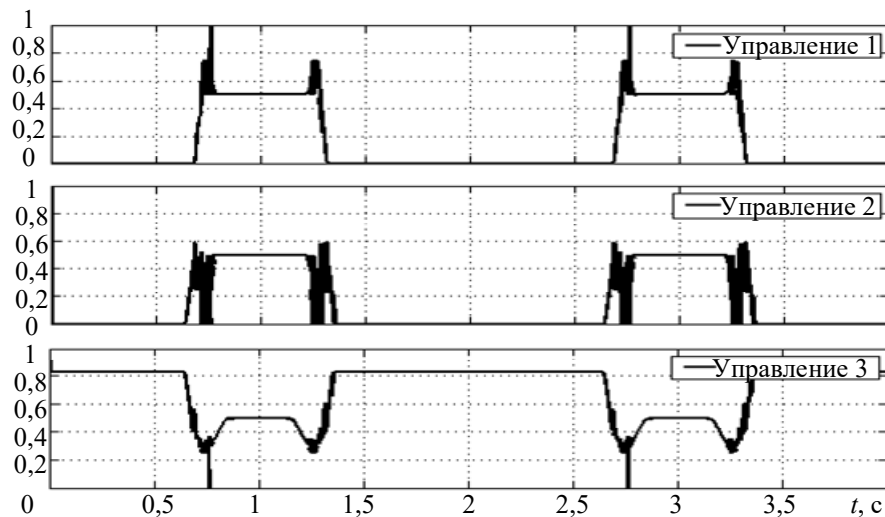


Рис. 7

Выходной сигнал „Управление 1“ контролирует подачу компенсирующего воздействия нечетким логическим компенсатором FIS_11, „Управление 2“ — FIS_21 и „Управление 3“ — FIS_31. Как видно из рис. 7, во временных промежутках около 0,6, 1,3, 2,7 и 3,3 с происходят многократные переключения компенсаторов, что указывает на выбор оптимального способа компенсации в конкретный промежуток времени путем сравнения среднеквадратического отклонения при нивелировании ошибки одним из способов компенсации нелинейных элементов.

Для оценки динамической ошибки системы управления [15] на рис. 8 приведены графики переходных процессов ошибки регулирования системы, содержащей нелинейное звено

типа „зона нечувствительности“ при обработке скачка управляющего сигнала. В данном случае использована многокаскадная система коррекции с нечеткими логическими выводами Мамдани и Сугено нулевого порядка, а также с однокаскадными устройствами нечеткой коррекции. Нумерация кривых на рисунке полностью соответствует нумерации, принятой на рис. 6.

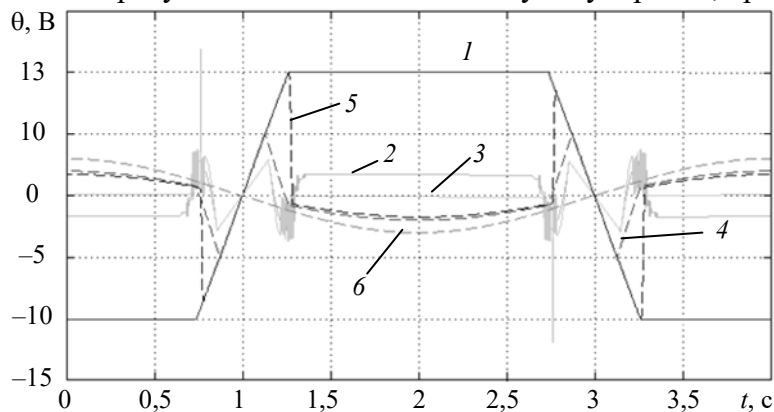


Рис. 8

Для оценки эффективности предложенных многокаскадных способов нечеткой компенсации нелинейности систем управления на рис. 9 приведены графики, характеризующие изменение накопленной среднеквадратической ошибки системы (RMS) за определенный промежуток времени: 1 — RMS системы без компенсирующего устройства составляет 34,84; 2 — RMS системы с многокаскадным компенсирующим устройством с нечетким логическим выводом Сугено составляет 5,654; 3 — RMS системы с многокаскадным компенсирующим устройством с нечетким логическим выводом Мамдани составляет 2,265; 4 — RMS системы с последовательно включенным компенсатором составляет 7,122; 5 — RMS системы с компенсатором в цепи обратной связи составляет 9,067; 6 — RMS системы с параллельно включенным компенсатором составляет 7,639.

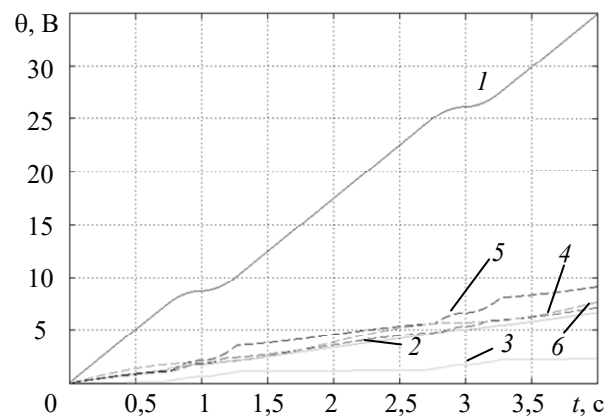


Рис. 9

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

— предложенный многокаскадный принцип нечеткой компенсации нелинейности систем управления позволяет обеспечить адаптацию компенсирующего устройства к виду компенсируемой нелинейности;

— независимо от выбранного логического вывода (Сугено или Мамдани) выходного сигнала внешнего нечеткого компенсатора обработка системой управления синусоидального входного воздействия происходит практически с одинаковыми минимальными искажениями;

— динамическая ошибка системы управления с многокаскадным нечетким компенсатором с логическим выводом Мамдани при обработке скачкообразного воздействия существенно ниже, чем при использовании аналогичного компенсатора с логическим выводом Сугено;

— с точки зрения эффективности работы многокаскадного нечеткого компенсатора (по накопленной среднеквадратической ошибке) использование логического вывода Мамдани во внешнем нечетком компенсаторе является более целесообразно; ошибка примерно в три раза меньше, чем при аналогичном многокаскадном компенсаторе с выводом Сугено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлыпало Е. И. Нелинейные корректирующие устройства в автоматических системах: Учебник для вузов. Л.: Энергия, 1973. 344 с.
2. Гудим А. С., Соловьев В. А., Зайченко И. В. Нечеткие алгоритмы компенсации нелинейностей САУ // Информатика и системы управления. 2005. № 2. С. 89—101.
3. Cherny S. P., Soloviev V. A. Another approach to enhancement of intellectual capabilities of the fuzzy controller // Proc. Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017.
4. Черный С. П., Бичаев И. Е. Моделирование следящей системы управления с применением многокаскадного нечеткого регулятора // Электротехнические комплексы и системы управления. 2014. № 1(33). С. 47—54.
5. Савельев Д. О., Гудим А. С., Черный С. П., Сухоруков С. И. Способ компенсации статических нелинейностей с использованием мягких вычислений // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 1. С. 35—42.
6. Savelyev D. O., Gudim A. S. Software fuzzy logic compensator of nonlinear elements of automatic control system // Proc. Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2018. P. 1—4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602829.
7. Савельев Д. О., Гудим А. С., Черный С. П. Особенности компенсации неоднозначных сопутствующих нелинейностей с использованием нечеткого подхода // Информатика и системы управления. 2014. № 4 (42). С. 149—158.
8. Савельев Д. О., Черный С. П. Компенсация совокупности естественных и искусственных нелинейностей многоканальным нечетким регулятором // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Комсомольск-на-Амуре, 2018. С. 165—168.
9. Савельев Д. О., Черный С. П. Один из подходов к решению комплексной задачи компенсации нелинейных элементов систем автоматического управления с применением теории нечетких множеств // Тр. II Всерос. науч.-практ. конференции „Электропривод на транспорте и в промышленности“. Хабаровск, 2018. С. 276—279.
10. Savelyev D. O., Gudim A. S., Cherny S. P. Application of fuzzy multi-cascade control during modeling of universal non-linearity compensator // Proc. Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2019. P. 1—4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933905.
11. Савельев Д. О., Гудим А. С., Хрульков В. Н. Программный модуль нечеткого логического компенсатора нелинейных элементов САУ // Производственные технологии будущего от создания к внедрению: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Комсомольск-на-Амуре, 2017. С. 128—131.
12. Savelyev D. O., Gudim A. S., Solovev D. B. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (Automatic Control System) elements // Proc. Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2019. P. 1—4. DOI: 10.1109/EastConf.2019.8725324.
13. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2009. 800 с.
14. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with fuzzy logic controller // Intern. Journal Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7, N 1. P. 1—13.
15. Piegat A., Jaszczak S., Pluciriski M. Selflearning neuro-fuzzy PID controller without simplifications. // Proc. of the Intern. Symp. on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR'96, Miedzyzdroje, Poland. 1996. Vol. 3. P. 1195—1200.

Сведения об авторах

Дмитрий Олегович Савельев

— Комсомольский-на-Амуре государственный университет, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок; руководитель центра робототехники; E-mail: savelyevdo@gmail.com

Сергей Петрович Черный

— канд. техн. наук, доцент; Комсомольский-на-Амуре государственный университет, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок; заведующий кафедрой; E-mail: keraпу@knastu.ru

Вячеслав Алексеевич Соловьев

— д-р техн. наук, профессор; Комсомольский-на-Амуре государственный университет, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок; E-mail: keraпу@knastu.ru

Поступила в редакцию
31.01.2020 г.

Ссылка для цитирования: Савельев Д. О., Черный С. П., Соловьев В. А. Повышение точности компенсации нелинейных элементов систем управления // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 3. С. 213—221.

IMPROVING THE ACCURACY OF COMPENSATION FOR NONLINEAR ELEMENTS OF CONTROL SYSTEMS

D. O. Savelyev, S. P. Cherny, V. A. Solovyov

Komsomolsk-na-Amure State University, 681013, Komsomolsk-na-Amure, Russia
E-mail: keraпу@knastu.ru

Principles of multi-stage control and methods for compensating for nonlinearities of static nonlinear elements of automatic control systems are studied. Due to the fact that in the case of complex nonlinear elements, compensation using only one of the known compensation methods does not always reduce the system error to the desired value, a new solution is proposed - a compensation method based on the principle of multi-stage control, which almost completely reduces the error to zero. Specific of tuning intelligent systems based on the theory of fuzzy sets to solve the problem of compensating for natural and artificial nonlinearities are described. The influence of various algorithms of fuzzy inference when implementing multi-stage fuzzy control technology to compensate for nonlinearities of various types, is analyzed.

Keywords: automatic control systems, software system, compensation for nonlinear elements, fuzzy logic, intelligent system, fuzzy logic controller, program complex, intelligent module

REFERENCES

1. Khlypalo E.I. *Nelineynnye korrektyrnyye ustroystva v avtomaticheskikh sistemakh* (Nonlinear Correction Devices in Automatic Systems), Leningrad, 1973, 344 p. (in Russ.)
2. Gudim A.S., Solovov V.A., Zaychenko I.V. *Information Science and Control Systems*, 2005, no. 2, pp. 89–101. (in Russ.)
3. Cherny S.P., Soloviev V.A. *Proc. Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2017.
4. Cherny S.P., Bichaev I.E. *Elektrotekhnicheskiye kompleksy i sistemy upravleniya*, 2014, no. 1(33), pp.47–54. (in Russ.)
5. Savelyev D.O., Gudim A.S., Cherny S.P., Sukhorukov S.I. *Elektrotekhnicheskiye kompleksy i sistemy upravleniya*, 2015, no. 1, pp. 35–42. (in Russ.)
6. Savelyev D.O., Gudim A.S. *Proc. Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602829.
7. Savelyev D.O., Gudim A.S., Cherny S.P. *Information Science and Control Systems*, 2014, no. 4(42), pp. 149–158. (in Russ.)
8. Savelyev D.O., Cherny S.P. *Proizvodstvennyye tekhnologii budushchego ot sozdaniya k vnedreniyu* (Production Technologies of the Future from Creation to Implementation), Materials of Intern. Sci.-Pract. Conf., Komsomolsk-on-Amur, 2018, pp. 165–168. (in Russ.)
9. Savelyev D.O., Cherny S.P. *Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti* (Electric drive in transport and industry), Proc. of the II All-Russian Sci.-Pract. Conf., Khabarovsk, pp. 276–279.
10. Savelyev D.O., Gudim A.S., Cherny S.P. *Proc. Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933905.
11. Savelyev D.O., Gudim A.S., Khrul'kov V.N. *Proizvodstvennyye tekhnologii budushchego ot sozdaniya k vnedreniyu* (Production Technologies of the Future from Creation to Implementation), Materials of Intern. Sci.-Pract. Conf., Komsomolsk-on-Amur, 2017, pp. 128–131. (in Russ.)
12. Savelyev D.O., Gudim A.S., Solovov D.B. *Proc. Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/EastConf.2019.8725324.
13. Piegat A. *Fuzzy modeling and control*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2001.
14. Mamdani E.H., Assilian S. *Intern. Journal Man-Machine Studies*, 1975, no. 1(7), pp. 1–13.
15. Piegat A., Jaszczak S., Plucirski M. *Proc. of the Intern. Symp. on Methods and Models in Automation and Robotics*, MMAR'96, Miedzyzdroje, Poland, 1996, vol. 3, pp. 1195–1200.

Data on authors

- Dmitry O. Savelyev** — Komsomolsk-na-Amure State University, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations; Head of the Center for Robotics; E-mail: savelyevdo@gmail.com
- Sergey P. Cherny** — PhD, Associate Professor; Komsomolsk-na-Amure State University, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations; Head of the Department; E-mail: kepapu@knastu.ru
- Vyacheslav A. Solovyov** — Dr. Sci., Professor; Komsomolsk-na-Amure State University, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations; E-mail: kepapu@knastu.ru

For citation: Savelyev D. O., Cherny S. P., Solovyov V. A. Improving the accuracy of compensation for nonlinear elements of control systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 3. P. 213—221 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-213-221