

Компенсация разных типов неопределенностей при управлении техническим объектом с помощью интеллектуальных регуляторов

В.В. Игнатьев

Ссылка для цитирования

Игнатьев В.В. Компенсация разных типов неопределенностей при управлении техническим объектом с помощью интеллектуальных регуляторов // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 3. С. 423–431. doi: 10.15827/0236-235X.142.423-431

Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.06.2023

После доработки: 30.06.2023

Принята к публикации: 14.07.2023

Аннотация. В статье приводятся результаты исследований по разработке гибридных интеллектуальных регуляторов, позволяющих обеспечить эффективность управления техническим объектом, в том числе функционирующим в условиях неопределенности. Рассмотрены вопросы компенсации разных типов неопределенностей при управлении техническим объектом с применением интеллектуальных регуляторов. Дана обобщенная классификация неопределенностей и предложена новая с определением тех ее видов, компенсация которых достигается с помощью разработанных методов и алгоритмов. Такими видами неопределенностей являются параметрическая неопределенность, неопределенности, вызванные внешними воздействиями, лингвистическая неопределенность. Отдельно выделена лингвистическая неопределенность, приведены способы ее компенсации, основанные на подходе управления, который базируется на сочетании классической теории управления, нечеткой логики, нейросетевых технологий и генетических алгоритмов. В рамках демонстрации подхода в общем виде описан весь процесс получения желаемого управления для технического объекта, в том числе функционирующего в условиях неопределенности. Представлены результаты работы созданных методов управления техническими объектами с применением интеллектуальных регуляторов на основе самоорганизации баз знаний. Основу методов составляет алгоритм самоорганизации робастных баз знаний без привлечения эксперта с автоматизацией процесса генерации управляющих правил. Реализация алгоритма в моделях управления способствует получению желаемого управления для технических объектов, включая функционирующие в условиях неопределенности, представленных линейными или нелинейными математическими моделями первого, второго и третьего порядков, в том числе с запаздыванием. Результаты моделирования подтверждают, что применение подхода с гибридным управлением позволяет получать желаемое управление техническим объектом, в том числе функционирующим в условиях неопределенности.

Ключевые слова: управление, технический объект, интеллектуальный регулятор, синтез, обучение, компенсация неопределенности

Современные автоматизированные системы управления сложно представить без использования интеллектуальных технологий. Их внедрение обусловлено прежде всего возможностью гибкой подстройки под сложные задачи управления техническими объектами для обеспечения требуемой точности и надежности.

Особую значимость применение интеллектуальных технологий приобретает при наличии неопределенностей, от которых зависит эффективность не только управления объектом, но и всего производственного процесса. К неопределенностям, негативно влияющим на управление, можно отнести отсутствие информации о его цели, характеристиках и параметрах объекта управления, свойствах процесса управления, внешних условиях. Системы управления с применением интеллектуальных технологий позволяют устранять отдельные виды неопределенностей, но не все и, что особенно важно, не в режиме реального времени. В связи с этим при проектировании таких систем необходимо разрабатывать новые науч-

ные подходы, гарантирующие эффективное управление с требуемой точностью и надежностью.

В данной статье выполнен обзор разных видов неопределенностей, приведена их классификация, продемонстрирована работа созданных автором методов и алгоритмов управления техническими объектами с помощью интеллектуальных регуляторов, позволяющих для заданных классов объектов компенсировать определенные типы неопределенностей.

Обзор исследований по научной проблеме

Созданию эффективных систем управления, спроектированных на основе интеллектуальных регуляторов, посвящено немало научных исследований. Рассмотрим некоторые из них, наиболее близкие к теме данной работы.

Задача разработки нечеткого пропорционально-интегрального регулятора на основе оптимальной функции принадлежности для управления мощностью активной зоны жидко-солевого реактора-размножителя решается в

исследовании [1]. Ее основная идея – автоматическая настройка параметров классического регулятора с помощью нечеткого. Для этого при проектировании нечеткого регулятора реализуется процедура оптимизации функций принадлежности на основе коэффициентов нелинейного динамического ускорения.

Исследование [2] посвящено разработке пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора на нечеткой логике с оптимальным масштабированием функций принадлежности для системы вентиляции легких. Как и в работе [1], нечеткий регулятор используется для настройки классического (в данном случае ПИД-регулятора). Интерес представляет то, что функция принадлежности нечетких входных данных (ошибка и изменение ошибки по давлению в дыхательных путях) и выходных сигналов (параметров ПИД-регулятора) оптимизируется с помощью метода роя частиц.

Авторами [3] разработан адаптивный нечеткий регулятор на основе раннего обнаружения и предотвращения асимметричных неисправностей в энергосистемах. Для краткосрочного прогнозирования нагрузки используются нейронные сети с целью наблюдения за нелинейным поведением вследствие асимметричных сбоев в профиле потребления энергосистемы. Данный нечеткий регулятор отличается возможностью работы в режиме реального времени и предназначен для обнаружения колебаний, которые невозможно отследить с помощью традиционных методов прогнозирования нагрузки.

Робастный адаптивно-нечетко-пропорционально-производный регулятор для реабилитационного экзоскелета нижних конечностей предложен в работе [4]. Объектом управления является двигатель постоянного тока в качестве привода сустава. В регуляторе для достижения требуемой работы объекта управления реализуется новая оптимизация роя частиц, основанная на инициализации эталонной модели. Следует отметить, что спроектированный регулятор работает в режиме реального времени.

Управлению выходным напряжением двухкамерного микробного топливного элемента с использованием оптимизированного адаптивного нейро-нечеткого регулятора на основе интеллектуальных данных посвящена работа [5]. В регуляторе реализованы алгоритмы оптимизации роя частиц и алгоритм серых волков для настройки его параметров. Полученные результаты показали, что данный регулятор об-

ладает характеристиками, позволяющими быстро и эффективно отслеживать напряжение при внешних изменениях нагрузки, распределениях и неопределенности параметров.

В статье [6] предложена новая конструкция нечеткого адаптивного ПИД-регулятора скорости для современной лифтовой тяговой машины. Продемонстрировано, что для заданного объекта управления нечеткий адаптивный ПИД-регулятор имеет более лучшие характеристики управления по сравнению с традиционными методами ПИД-регулирования (в частности, получены лучшее время переходного процесса и меньшая величина статической ошибки).

Нечеткому регулятору, синтезированному на основе классического регулятора (ПИД), посвящена работа [7]. Исследование выполнено на примере нелинейной математической модели квадрокоптера. В системе управления анализируются сигналы ошибок и управления и с их помощью разрабатываются входные и выходные лингвистические переменные. Далее проектируется база нечетких правил. Предложенный метод позволяет исключить знания эксперта при проектировании базы правил. Разработанный нечеткий регулятор взаимодействует с ПИД-регулятором для поддержки его производительности и компенсирует неопределенности коэффициентов модели.

Нечеткий вибрационный регулятор на основе нейронной сети для морской платформы со случайной временной задержкой создан авторами работы [8]. Регулятор предназначен для ослабления вибрации морской платформы, вызванной нерегулярными волнами. Нейро-нечеткая система наблюдения, обученная на выборочных данных из нечетких моделей, реконструирует систему управления. Регулятор на основе нейронной сети эффективно работает в различных случаях задержки, обеспечивая лучшие характеристики ослабления вибрации при неопределенной задержке управления и случайных волнах по сравнению с существующими законами оптимального управления и нечеткими регуляторами без нейронных сетей.

В работе [9] рассмотрено управление для системы слежения телескопа. Применяется адаптивный нечеткий ПИД-регулятор, автоматически настраиваемый с помощью генетического подхода. Суть этого подхода заключается в автоматической настройке функций принадлежности и правил управления нечеткого регулятора за счет использования эволюционного алгоритма. Данный регулятор достаточно

эффективен при высокоточном управлении, однако нет пояснений относительно его поведения при возникновении разных типов неопределенностей, в том числе одновременно.

Из проведенного анализа научных изысканий следует, что для эффективного управления техническими объектами, в том числе в условиях неопределенности, чаще применяются гибридные методы с использованием интеллектуальных технологий. Таким образом, вопросы, рассмотренные в настоящей статье, и представленные решения с подтверждением результатов их реализации говорят об актуальности проводимых исследований.

Процедура компенсации разных типов неопределенностей при управлении техническим объектом с помощью интеллектуальных регуляторов

Данное исследование основано на ранее созданной концепции управления техническим объектом в условиях неопределенности и является продолжением изысканий по разработке методов синтеза интеллектуальных регуляторов и их оптимизации [10–12].

Концепция базируется на методах управления техническими объектами с помощью интеллектуальных регуляторов на основе самоорганизации баз знаний и алгоритме самоорганизации робастных баз знаний без привлечения эксперта в системах управления с интеллектуальными регуляторами. Реализация концепции позволяет получать желаемое управление техническим объектом, функционирующим в изменяющихся условиях.

В работах [13–15] рассматриваются подходы к управлению, в том числе и основанные на применении интеллектуальных технологий. Отдельное внимание уделяется видам неопределенностей, которые приводят к ухудшению точности работы системы управления или к полной потере ее работоспособности.

На основании анализа данных работ и ряда других можно обобщенно классифицировать неопределенности (рис. 1).

Разработанные автором [10–12] методы и алгоритмы позволяют решать задачу компенсации параметрической неопределенности, неопределенностей, вызванных внешними воздействиями, и лингвистической неопределенности (рис. 2, выделенный в блоках текст). Для компенсации указанных на рисунке неопределенностей реализуются методы и алгоритмы, работа которых основана на сочетании класси-

ческой теории управления, теории нечетких множеств, нейросетевых технологий и генетических алгоритмов [10].

Это позволяет эффективно управлять линейными и нелинейными математическими моделями первого, второго, третьего порядков, в том числе с запаздыванием (в контурах управления существуют запаздывания по управлению, по выходному сигналу, по измерению). Общий вид реализации такого подхода к управлению графически представлен на рисунке 3.

Разработанные в рамках подхода гибридные методы синтеза интеллектуального регулятора и алгоритмы управления на основе самоорганизации робастных баз знаний позволяют достичь желаемого управления техническим объектом в условиях неопределенности.

Ключевая особенность реализации гибридного управления заключается в ранее разработанном алгоритме самоорганизации робастных баз знаний без привлечения эксперта в системах управления с интеллектуальными регуля-



Рис. 1. Обобщенная классификация неопределенностей

Fig. 1. A generalized classification of uncertainties

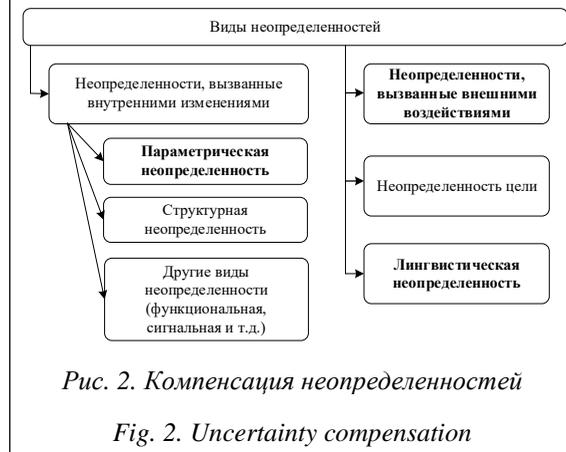


Рис. 2. Компенсация неопределенностей

Fig. 2. Uncertainty compensation



торами (рис. 4). Блоки алгоритма и его работа подробно описаны в [12]. Алгоритм, представленный на рисунке 4, отличается от алгоритма из работы [12] наличием блока лингвистической неопределенности в изменяющихся условиях функционирования объекта управления.

Компенсация лингвистической неопределенности – достаточно сложная задача, поэтому рассмотрим ее более подробно. Когда получение адекватной математической модели является сложным процессом или вообще невозможно, при разработке системы управления используются знания (об объекте управления, его свойствах и/или характере поведения при функционировании) и опыт экспертов, разрабатываются регуляторы с применением технологий искусственного интеллекта.

С одной стороны, такие регуляторы позволяют исключить негативно влияющие на эффективность управления факторы, с другой – работа регулятора становится зависимой от знаний эксперта. В случае появления неопределенности знаний и опыта эксперта в предметной области может быть недостаточно, чтобы охватить все возможные состояния объекта. В связи с этим формирование и оптимальность базы правил интеллектуального регулятора напрямую зависят от квалификации эксперта, что может существенно снизить эффективность регулятора.

Лингвистическая неопределенность обусловлена расплывчатостью и неоднозначностью естественного языка, что приводит к трудностям формирования базы правил интел-

лектуального регулятора из-за необходимости определения вида, количества, параметров функций принадлежности лингвистических переменных.

Для решения вопросов избыточности и противоречивости данных в базе правил и получения желаемого управления, в том числе в непредвиденных ситуациях, следует исключать ошибки, обусловленные человеческим фактором. Представленный на рисунке 4 алгоритм самоорганизации робастных баз знаний позволяет решить обозначенные проблемы.

Кроме реализации процедуры самоорганизации робастных баз знаний без привлечения эксперта, в алгоритме автоматизирован процесс генерации управляющих правил систем с нечеткой логикой на основе данных классических регуляторов. В общем виде весь процесс получения желаемого управления для технического объекта, в том числе функционирующего в условиях неопределенности, заключается в прохождении следующей последовательности этапов.

На первом этапе для управления техническим объектом разрабатывается классический регулятор (ПИ, ПД, ПИД). После запуска модели управления с классического регулятора в одинаковые моменты времени снимаются значения сигналов отклонения системы, интеграла или дифференциала отклонения и управляющего воздействия. Значения каждого из сигналов сохраняются в файл в виде текстового массива.

На втором этапе синтезируется нечеткий регулятор, база правил которого формируется на

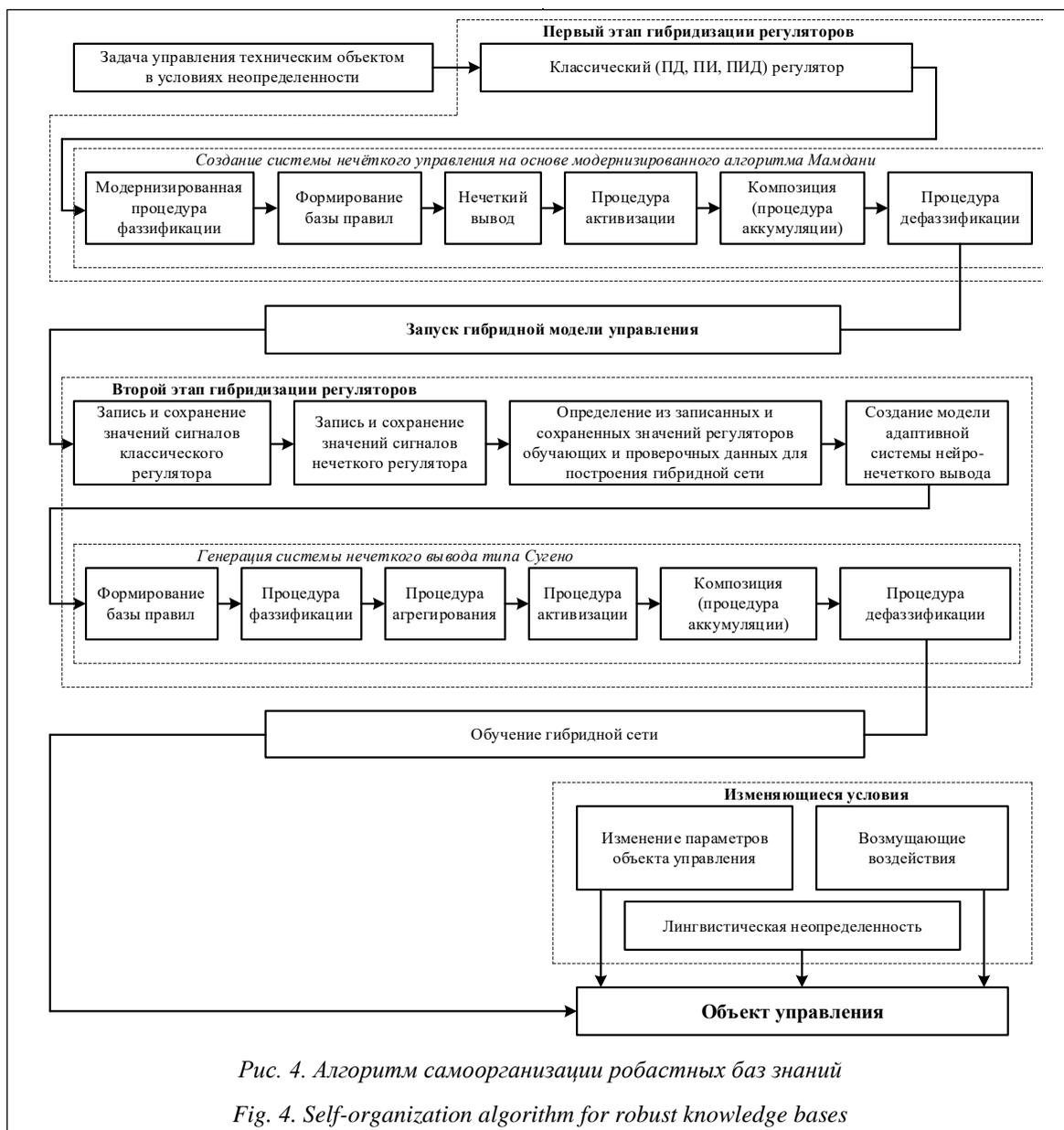


Рис. 4. Алгоритм самоорганизации робастных баз знаний

Fig. 4. Self-organization algorithm for robust knowledge bases

основе модифицированного алгоритма Мамдани в автоматическом режиме. После запуска модели проверяется качество полученного управления и уже с нечеткого регулятора в одинаковые моменты времени снимаются значения сигналов отклонения системы, интеграла или дифференциала отклонения и управляющего воздействия. Эти значения также сохраняются в файл в виде текстового массива.

На третьем этапе строится адаптивная система нейро-нечеткого вывода (ANFIS), в которой второй текстовый массив является обучающим, а первый необходим для проверки. Синтезируется система нечеткого вывода, запускается модель с новой структурой, проверяется качество полученного управления.

На четвертом этапе в определенной последовательности реализуется оптимизация:

- центров функций принадлежности входных лингвистических переменных;
- центров функций принадлежности выходной лингвистической переменной;
- операций агрегирования, активизации, аккумуляции, дефаззификации алгоритма Мамдани;
- весовых коэффициентов базы нечетких правил.

В результате для разных объектов (линейных, в том числе с запаздыванием) получены переходные процессы с требуемыми показателями качества, примеры которых показаны на рисунке 5.

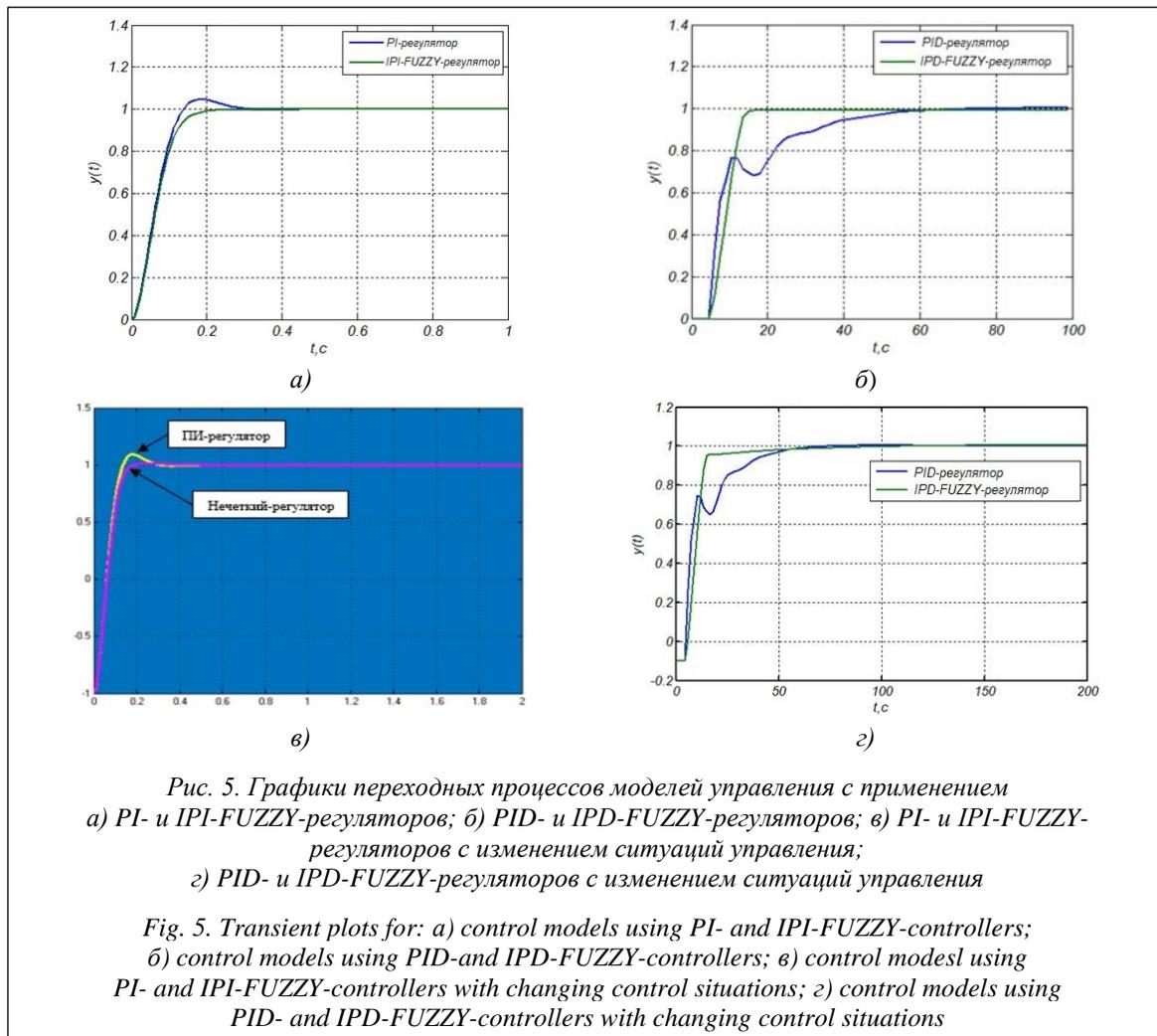


Рис. 5. Графики переходных процессов моделей управления с применением
 а) PI- и IPI-FUZZY-регуляторов; б) PID- и IPD-FUZZY-регуляторов;
 в) PI- и IPI-FUZZY-регуляторов с изменением ситуаций управления;
 з) PID- и IPD-FUZZY-регуляторов с изменением ситуаций управления

Fig. 5. Transient plots for: а) control models using PI- and IPI-FUZZY-controllers;
 б) control models using PID- and IPD-FUZZY-controllers; в) control models using
 PI- and IPI-FUZZY-controllers with changing control situations; з) control models using
 PID- and IPD-FUZZY-controllers with changing control situations

Следует отметить, что желаемое управление можно получить уже на втором этапе, однако оно может не обладать робастными свойствами и, как показали различные экспериментальные исследования, в отдельных случаях при изменении ситуаций управления требуемыми показателями качества. Поэтому разработаны и реализуются третий и четвертые этапы.

Примеры переходного процесса с требуемыми показателями качества для неустойчивого нелинейного технического объекта третьего порядка и реализации процедуры поиска оптимальных параметров нечеткого регулятора представлены на рисунках по адресу <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-3/2023-3-dop/32.jpg>.

Анализ результатов

Полученные графики переходных процессов для разных технических объектов свидетельствуют о достоинствах разработанных методов управления, основанных на гибридном

подходе, включающем комбинирование классической теории управления, нечеткой логики, нейросетей и генетических алгоритмов. Для достижения желаемого управления подход может как реализоваться при выполнении всей последовательности этапов, так и закончиться на втором или третьем этапе в зависимости от требований к управлению.

Однозначно можно сказать, что показатели управления при реализации такого подхода значительно выше, чем при применении традиционных методов управления. Кроме того, система управления техническим объектом, построенная с применением интеллектуальных регуляторов, отличается повышенной робастностью и позволяет компенсировать разные типы неопределенностей.

Обсуждение

Применя представленные в статье научные решения в прикладных задачах управления, связанных с автоматизацией техноло-

гических процессов, необходимо понимать, каких целей требуется достичь. Например, представленный на рисунке 4 алгоритм самоорганизации робастных баз знаний отличается сложным взаимодействием различных технологий управления (классические методы, нечеткие, нейросети, генетические алгоритмы) и предназначен для получения желаемого управления сразу в условиях разных типов неопределенностей. В отдельных случаях достаточно на основе классического регулятора с помощью разработанных методов и алгоритмов построить эффективный нечеткий регулятор с заданными параметрами (имеется возможность их изменения).

То же самое можно сказать и о разработанной процедуре поиска оптимальных параметров нечеткого регулятора: исходя из полученного качества управления делается заключение о необходимости ее применения. Вне зависимости от указанных задач разработанные методы и алгоритмы позволяют успешно решить их. Это дает возможность в значительной сте-

пени снизить трудозатраты на разработку эффективного регулятора.

Заключение

В статье представлен новый алгоритм, в котором, кроме параметрической неопределенности и неопределенностей, вызванных внешними воздействиями, выделена лингвистическая неопределенность.

В подходе управления нечеткий регулятор строится на основе данных с классического регулятора, а не является источником его настройки. Это позволяет более гибко реагировать на возникающие в процессе управления изменения.

Интеллектуальный регулятор изначально строится на данных, полученных с классического регулятора. Это дает возможность спроектировать базу правил интеллектуального регулятора, обладающую робастными свойствами (на основе всех разработанных методов и алгоритмов).

Список литературы

1. Acharya D., Das D.K. Optimal membership function based fuzzy proportional-integral controller for power control of molten salt breeder reactor core. *Progress in Nuclear Energy*, 2023, vol. 161, art. 104753. doi: 10.1016/j.pnucene.2023.104753.
2. Acharya D., Das D.K. Design of a fuzzy-based proportional integral derivative controller with optimal membership function scaling for respiratory ventilation system. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022, vol. 78, art. 103938. doi: 10.1016/j.bspc.2022.103938.
3. Ali M., Kaur K., Adnan M., Nisar Sh. Adaptive fuzzy controller based early detection and prevention of asymmetrical faults in power systems. *Control Engineering Practice*, 2023, vol. 130, art. 105380. doi: 10.1016/j.conengprac.2022.105380.
4. Aliman N., Ramli R., Haris S.M., Amiri M.S., Van M. A robust adaptive-fuzzy-proportional-derivative controller for a rehabilitation lower limb exoskeleton. *JESTECH*, 2022, vol. 35, art. 101097. doi: 10.1016/j.jestech.2022.101097.
5. Demir M.H., Eren B. Output voltage control of double chambers microbial fuel cell using intelligence-based optimized adaptive neuro fuzzy inference controller. *Int. J. of Hydrogen Energy*, 2022, vol. 47, no. 45, pp. 19837–19849. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.113.
6. Duan X., Zhi P., Zhu W., Wei H. Fuzzy adaptive PID speed controller design for modern elevator traction machine. *Energy Reports*, 2023, vol. 9, pp. 175–183. doi: 10.1016/j.egy.2023.04.262.
7. Alsafadi L.A., Chulin N.A., Mironova I.V. Synthesis of fuzzy controller based on simple PID controller. *Procedia Comput. Sci.*, 2019, vol. 150, pp. 28–38. doi: 10.1016/j.procs.2019.02.008.
8. Zhang Y., Ma H., Xu J. Neural network-based fuzzy vibration controller for offshore platform with random time delay. *Ocean Engineering*, 2021, vol. 225, art. 108733. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108733.
9. Demidova G.L., Lukichev D.V., Kuzin A.Yu. A Genetic approach for auto-tuning of adaptive fuzzy PID control of a telescope's tracking system. *Procedia Comput. Sci.*, 2019, vol. 150, pp. 495–502. doi: 10.1016/j.procs.2019.02.084.
10. Игнатъев В.В., Шацкий В.Б. Концепция управления техническим объектом в условиях неопределенности // *Актуальные вопросы науки*. 2020. № 70. С. 28–31.
11. Игнатъев В.В. Методы управления техническими объектами с помощью интеллектуальных регуляторов на основе самоорганизации баз знаний. Ростов-на-Дону; Таганрог: изд-во ЮФУ, 2020. 142 с. doi: 10.18522/801273622.
12. Игнатъев В.В. Алгоритм самоорганизации робастных баз знаний без привлечения эксперта в системах управления с интеллектуальными регуляторами // *ИС&ИТ-2020: тр. междунар. науч.-технич. конгресса*. 2020. Т. 1. С. 362–377.
13. Никифоров В.О., Слита О.В., Ушаков А.В. Интеллектуальное управление в условиях неопределенности. СПб: изд-во СПбГУ ИТМО, 2009. 232 с.
14. Збрищак С.Г., Звягин Л.С. Неопределённость в задачах моделирования и управления сложных, слабо формализуемых многокомпонентных систем // *Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям*. 2020. Т. 1. С. 15–19.

15. Никифоров В.О., Ушаков А.А. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация и робастность. СПб: изд-во СПбГУ ИТМО, 2003. 232 с.

Software & Systems

doi: 10.15827/0236-235X.142.423-431

2023, vol. 36, no. 3, pp. 423–431

Compensation of various types of uncertainties when controlling a technical object using intelligent controllers

Vladimir V. Ignatyev

For citation

Ignatyev, V.V. (2023) 'Compensation of various types of uncertainties when controlling a technical object using intelligent controllers', *Software & Systems*, 36(3), pp. 423–431 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.423-431

Article info

Received: 27.06.2023

After revision: 30.06.2023

Accepted: 14.07.2023

Abstract. The article presents the research results on the development of hybrid intelligent controllers, which make it possible to ensure the effectiveness of the technical object control, including one functioning under uncertainty. The article is devoted to the issues of compensation of various types of uncertainties in controlling a technical object using intelligent controllers. It also gives a generalized classification of uncertainties and proposes a new classification with the definition of its types that are compensated using the developed methods and algorithms. The uncertainty types are parametric uncertainty, uncertainties caused by external influences, linguistic uncertainty. The author highlights linguistic uncertainty and gives methods for its compensation based on a control approach based on a combination of a classical control theory, fuzzy logic, neural network technologies and genetic algorithms. As a part of the demonstration of the approach, the author presents a general description of the entire process of obtaining the desired control for a technical object, including the one operating under conditions of uncertainty. The paper demonstrates the results of the work of the developed methods for controlling technical objects using intelligent controllers based on self-organization of knowledge bases. The basis of the methods is a self-organization algorithm of robust knowledge bases without involving an expert and automating the process of generating control rules. The implementation of these algorithms in control models makes it possible to obtain the desired control for technical objects including those functioning under uncertainty represented by linear or nonlinear mathematical models of the first, second, third order, including the ones with a delay. The presented simulation results confirm that the implementation of the hybrid control approach allows obtaining the desired control of a technical object including the one functioning under uncertainty.

Keywords: control, technical object, intelligent controller, synthesis, learning, uncertainty compensation

Reference List

1. Acharya, D., Das, D.K. (2023) 'Optimal membership function based fuzzy proportional-integral controller for power control of molten salt breeder reactor core', *Progress in Nuclear Energy*, 161, art. 104753. doi: 10.1016/j.pnucene.2023.104753.
2. Acharya, D., Das, D.K. (2022) 'Design of a fuzzy-based proportional integral derivative controller with optimal membership function scaling for respiratory ventilation system', *Biomedical Signal Processing and Control*, 78, art. 103938. doi: 10.1016/j.bspc.2022.103938.
3. Ali, M., Kaur, K., Adnan, M., Nisar, Sh. (2023) 'Adaptive fuzzy controller based early detection and prevention of asymmetrical faults in power systems', *Control Engineering Practice*, 130, art. 105380. doi: 10.1016/j.conengprac.2022.105380.
4. Aliman, N., Ramli, R., Haris, S.M., Amiri, M.S., Van, M. (2022) 'A robust adaptive-fuzzy-proportional-derivative controller for a rehabilitation lower limb exoskeleton', *JESTECH*, 35, art. 101097. doi: 10.1016/j.jestech.2022.101097.
5. Demir, M.H., Eren, B. (2022) 'Output voltage control of double chambers microbial fuel cell using intelligence-based optimized adaptive neuro fuzzy inference controller', *Int. J. of Hydrogen Energy*, 47(45), pp. 19837–19849. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.113.

6. Duan, X., Zhi, P., Zhu, W., Wei, H. (2023) 'Fuzzy adaptive PID speed controller design for modern elevator traction machine', *Energy Reports*, 9, pp. 175–183. doi: 10.1016/j.egy.2023.04.262.
7. Alsafadi, L.A., Chulin, N.A., Mironova, I.V. (2019) 'Synthesis of fuzzy controller based on simple PID controller', *Procedia Comput. Sci.*, 150, pp. 28–38. doi: 10.1016/j.procs.2019.02.008.
8. Zhang, Y., Ma, H., Xu, J. (2021) 'Neural network-based fuzzy vibration controller for offshore platform with random time delay', *Ocean Engineering*, 225, art. 108733. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108733.
9. Demidova, G.L., Lukichev, D.V., Kuzin, A.Yu. (2019) 'A genetic approach for auto-tuning of adaptive fuzzy PID control of a telescope's tracking system', *Procedia Comput. Sci.*, 150, pp. 495–502. doi: 10.1016/j.procs.2019.02.084.
10. Ignatyev, V.V., Shatskiy, V.B. (2020) 'The concept of managing a technical object under uncertainty', *Actual Issues of Sci.*, (70), pp. 28–31 (in Russ.).
11. Ignatyev, V.V. (2020) *Methods for Controlling Technical Objects Using Intelligent Controllers Based on Self-organization of Knowledge Bases*. Rostov-on-Don; Taganrog, 142 p. (in Russ.). doi: 10.18522/801273622.
12. Ignatyev, V.V. (2020) 'Algorithm for self-organization of robust knowledge bases without involving an expert in control systems with intelligent controllers', *Proc. IS&IT-2020*, 1, pp. 362–377 (in Russ.).
13. Nikiforov, V.O., Slita, O.V., Ushakov, A.V. (2009) *Intelligent Control Under Uncertainty*. St. Petersburg, 232 p. (in Russ.).
14. Zbrischak, S.G., Zvyagin, L.S. (2020) 'Uncertainty in modeling and control problems of complex, poorly formalized multicomponent systems', *Proc. SCM*, 1, pp. 15–19 (in Russ.).
15. Nikiforov, V.O., Ushakov, A.A. (2003) *Management Under Uncertainty: Sensitivity, Adaptation and Robustness*. St. Petersburg, 232 p. (in Russ.).

Авторы

Игнатъев Владимир Владимирович¹, к.т.н.,
ведущий научный сотрудник, vvignatev@sfnu.ru

¹ Южный федеральный университет,
г. Таганрог, 347900, Россия

Authors

Vladimir V. Ignatyev¹, Ph.D. (Engineering),
Leading Researcher, vvignatev@sfnu.ru

¹ Southern Federal University,
Taganrog, 347900, Russian Federation