

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗ ЗНАНИЙ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОГО ОБУЧАЮЩЕГО СИГНАЛА АЗОТНОЙ КРИОГЕННОЙ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Ю. Г. Беспалов, П. В. Зрелов, М. С. Катулин,
Д. В. Неаполитанский, А. Г. Решетников, С. В. Ульянов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В разработанной ранее технологии формирования баз знаний нечетких регуляторов использовались экспертные оценки, что приводило к недоопределенности и субъективности в управлении. Описана технология извлечения знаний из физически регистрируемого сигнала обучения с применением генетического алгоритма, позволяющая формировать объективные базы знаний нечетких регуляторов интеллектуальной системы управления. Проведено сравнение разных типов моделей управления на основе системы TANGO [1]. Представлен метод выбора оптимальных траекторий изменения коэффициентов усиления гибридного ПИД-регулятора. Показана эффективность применения сквозных информационных технологий на основе мягких вычислений в задачах интеллектуального управления.

In the developed earlier technology for the formation of knowledge bases of fuzzy regulators expert estimations are applied, which led to underdeterminacy and subjectivity in control processes. The technology of knowledge extraction from a physically recorded learning signal using a genetic algorithm is described, which allows the formation of objective knowledge bases for fuzzy controllers of an intelligent control system. A comparison of different types of control models based on TANGO [1] is carried out. A method for optimal trajectories design as the gain coefficients schedule of the hybrid PID controller is presented. The effectiveness of the end-to-end information technologies application based on soft computing in intelligent control tasks is shown.

PACS: 89.20.Ff; 07.05.Tp

* E-mail: m.katulin@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках межлабораторного проекта на испытательном стенде фабрики магнитов ЛФВЭ ОИЯИ и являются продолжением исследований работы [2]. Для проведения тестирования и измерения индивидуальных для каждого сверхпроводящего магнита характеристик необходимо поддержание стабильно низкой температуры, которая зависит от давления азота в криогенной установке, регулируемого вентилем сброса давления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Криогенная установка является объектом управления (ОУ), содержащим большое число слабо формализованных и скрытых параметров, таких как температура и давление окружающей среды, режим работы и др. Каждый из таких параметров может меняться во времени и тем самым менять поведение ОУ. Поскольку управление вентилем сброса давления осуществляется с помощью ПИД-регулятора, то для увеличения надежности и управляемости системы коэффициенты ПИД-регулятора также должны зависеть от времени. Одним из решений является применение нечеткого регулятора (НР) или квантового нечеткого регулятора (КНР) [3]. Эффективность и преимущество применения КНР показаны в [4] на конкретных примерах использования интеллектуальных самоорганизующихся квантовых регуляторов, встроенных в бортовые системы управления.

Как показано в [5], КНР может быть построен на базе конечного числа НР. В ядре НР, в свою очередь, заложена база знаний (БЗ), для создания которой нужен обучающий сигнал. В качестве НР рассматривается регулятор, описанный в [6] и схематично изображенный на рис. 1.

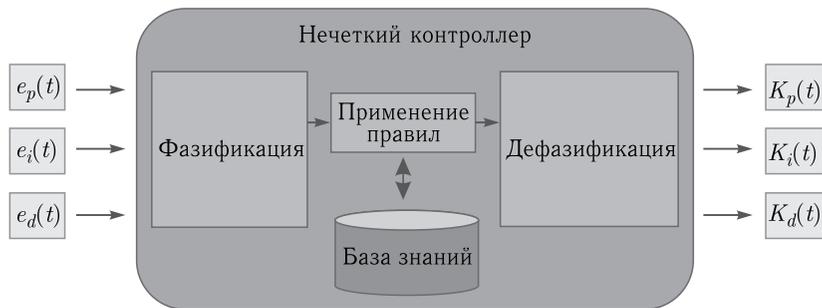


Рис. 1. Схема работы НР: e_p , e_i , e_d — пропорциональная, интегральная и дифференциальная ошибки; K_p , K_i , K_d — коэффициенты классического ПИД-регулятора

Таким образом, для построения НР необходимо создать качественный обучающий сигнал. Одновременно это является первым этапом технологии построения КНР для ОУ со слабо формализованными (не учитываемыми в математической модели) параметрами.

СОЗДАНИЕ ОБУЧАЮЩЕГО СИГНАЛА

Как следует из схемы НР, представленной на рис. 1, в качестве обучающего сигнала рассматривается набор ошибок управления e_p , e_i , e_d , соответствующих самым разным ситуациям управления, и подходящие им оптимальные коэффициенты усиления K_p , K_i , K_d ПИД-регулятора.

Процесс стабилизации давления в криогенной установке после значительного отклонения от целевого значения представляет особый интерес, так как охватывает сразу несколько типичных ситуаций управления. Например, необходимость быстрого изменения положения вентиля сброса давления при сильном отклонении от целевого значения или, наоборот, плавная регулировка вентиля при малом отклонении. Интервал времени, необходимый для стабилизации давления, разбивается на некоторое число малых временных отрезков и каждому присваиваются определенные значения коэффициентов ПИД-регулятора. Полученная последовательность, представляющая собой траекторию изменения коэффициентов усиления, записывается во время работы криогенной установки в режиме стабилизации давления и является обучающим сигналом.

Для поиска оптимальной траектории изменения коэффициентов ПИД-регулятора был выбран генетический алгоритм (ГА), часто применяемый для решения инженерных задач [7–9]. Кроме того, известно применение ГА для получения обучающего сигнала, позволяющего проектировать БЗ НР для объектов без математической модели [10].

За основу был взят ГА, описанный в [11]. ГА запускался в режиме реального времени на испытательном стенде фабрики магнитов ЛФВЭ. Чтобы обеспечить одинаковые условия обучения, для каждой проверяемой траектории давление сбрасывалось до заданной величины. Каждая траектория состояла из 5 временных интервалов со своими коэффициентами ПИД-регулятора. Эффективность траектории оценивалась в течение 10 мин. Значение оценки рассчитывалось как интеграл модуля ошибки отклонения от целевого значения давления.

На каждой из 10 итераций (поколений) проверялось 50 траекторий изменения коэффициентов. Использовалось двухточечное скрещивание с вероятностью 0,3. Вероятность мутации устанавливалась равной 0,1. 10% лучших траекторий изменения коэффициентов переходили в следующее поколение без изменений (элитный отбор). Сходимость результатов работы ГА определялась по нисходящей линии тренда функции пригодности с каждой новой проверяемой траекторией. В результате были выбраны лучшие наборы коэффициентов ПИД-регулятора для каждого

временного интервала и составлена таблица обучающего сигнала, состоящая из значений ошибок отклонения давления от целевого значения и соответствующих им коэффициентов ПИД-регулятора.

СРАВНЕНИЕ РАБОТЫ НР И КЛАССИЧЕСКОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

НР был сформирован на основе полученного обучающего сигнала с помощью программного обеспечения SCOptKB™ [3]. Коэффициенты классического ПИД-регулятора подбирались на основе обобщения опыта операторов криогенной установки и многократно тестировались в условиях реального эксперимента. Для сравнения работы классического ПИД-регулятора и гибридного НР был проведен анализ изменения давления в режиме заправки сателлита. Выбор режима заправки обусловлен тем, что он является наиболее сложным с точки зрения управления, поскольку в этом режиме установка ведет себя очень неустойчиво.

На рис. 2 приведены графики изменения давления в системе при работе в режиме заправки. Процесс заправки завершается снижением давления ниже целевого значения, так как клапан подачи азота перекрывается, и установка переходит в штатный режим работы.

На рис. 3 представлены временные зависимости интегральной ошибки для гибридного НР и классического ПИД-регулятора.

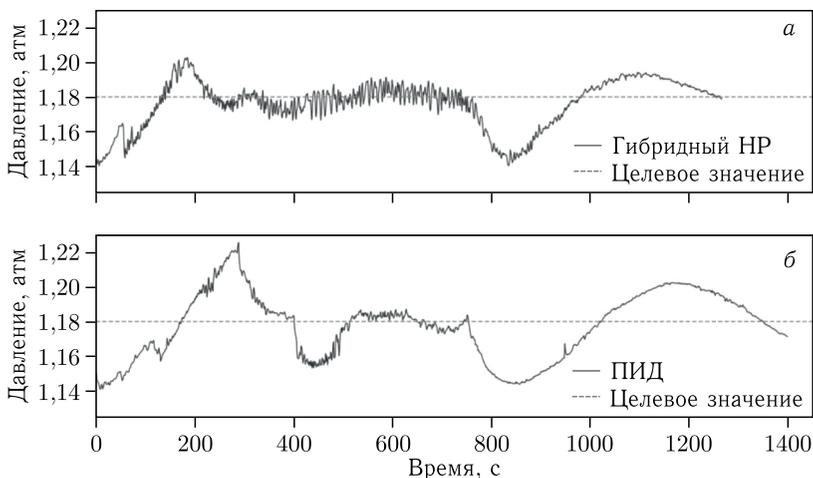


Рис. 2. Сравнение работы двух регуляторов в режиме заправки

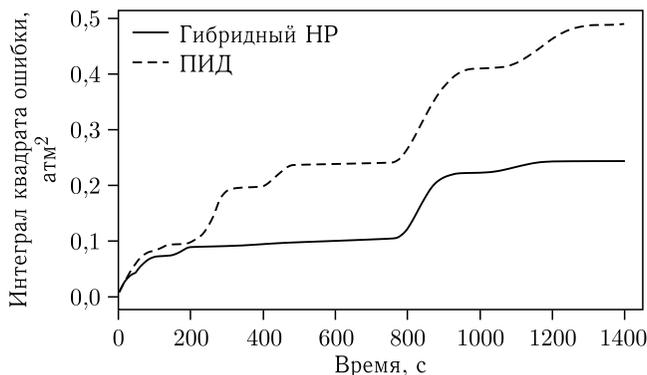


Рис. 3. Изменение интегральной ошибки в процессе работы регуляторов

Хорошо видно, что величина ошибки в случае использования ПИД-регулятора практически вдвое превышает аналогичную величину для гибридного НР во всем диапазоне измерений.

ВЫВОДЫ

- Благодаря применению ГА обучающий сигнал может быть создан без использования математической модели установки. Это особенно важно для систем управления, содержащих объект управления с недоопределенными, слабо формализованными параметрами.

- Подбор траектории изменения коэффициентов классического ПИД-регулятора позволяет добавлять в систему свойства адаптивности и обучаемости без необходимости внесения изменений в существующую систему управления.

- НР может работать в качестве интеллектуальной надстройки над уже работающей системой управления, повышая ее устойчивость.

- Так как КНР может быть построен на основе описанного в работе НР, определен первый этап технологии формирования универсального КНР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Home — TANGO Controls. Available at: <https://www.tango-controls.org/> (accessed 17.09.2023).
2. Бутенко А. В., Зрелов П. В., Кореньков В. В., Костромин С. А., Никифоров Д. Н., Решетников А. Г., Семашко С. В., Трубников Г. В., Ульянов С. В. Интеллектуальная система дистанционного управления давлением и расходом жидкого азота в криогенной системе сверхпроводящих магнитов: программно-аппаратная платформа // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 2(247). С. 183–199.

3. Литвинцева Л. В., Тятюшкина О. Ю., Ульянов С. В. Технологии интеллектуальных вычислений. Ч. I. Мягкие и дробные вычисления: Учебно-метод. пособие. М.: Курс, 2020.
4. Зрелов П. В., Зрелова Д. П., Катулин М. С., Кореньков В. В., Решетников А. Г., Ульянов С. В. Квантовая IT-инженерия в задачах интеллектуального управления физическими системами // ЭЧАЯ. 2024. Т. 55, вып. 3. С. 540–548.
5. Зрелов П. В., Никифоров Д. Н., Решетников А. Г., Ульянов С. В. Квантовое интеллектуальное управление давлением азота в криогенной установке испытательного стенда фабрики магнитов // ЭЧАЯ. 2024. Т. 55, вып. 3. С. 677–683.
6. Zakharov V. N., Ulyanov S. V. Fuzzy Models of Intelligent Industrial Controllers and Control Systems // J. Comput. Syst. Sci. Intern. 1995. V. 33, No. 2.
7. Скрухин А. Н. Генетические алгоритмы // Новости искусственного интеллекта. 1995. № 4.
8. Куцый Н. Н., Лукьянов Н. Д. Применение генетического алгоритма для оптимизации автоматических систем с ПИД-регулятором // Вестн. ИргТУ. 2012. № 6 (65). С. 6–10.
9. Ким Т. Ю., Прокопович Г. А. Оптимизация коэффициентов ПИД-регулятора системы управления движением мобильного робота по цветоконтрастной линии на основе генетического алгоритма // Информатика. 2021. Т. 18, № 4. С. 53–68; doi: 10.37661/1816-0301-2021-18-4-53-68.
10. Решетников А. Г., Ульянов С. В. Метод извлечения знаний из физически измеряемого сигнала обучения: проектирование баз знаний нечеткого регулятора // Систем. анализ в науке и образовании. 2013. № 1.
11. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы / Под ред. Ю. Ю. Тарасевича. Астрахань: Издат. дом «Астраханский ун-т», 2007. С. 87.