

УДК 629.33:004.8

**О. Я. НИКОНОВ**, д-р техн. наук, проф., ХНАДУ, Харьков;

**В. И. ФАСТОВЕЦ**, канд. техн. наук, доц. ХНАДУ;

**В. Н. ШУЛЯКОВ**, ассистент, ХНАДУ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНОЙ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ**

В статье рассмотрена задача исследования эффективности функционирования системы управления адаптивной подвески автомобиля на основе использования нейро-нечетких регуляторов. Синтезированы два нейро-нечетких регулятора работающих в разных условиях эксплуатации. Один регулятор создан с использованием метода решетки с треугольной функцией принадлежности, а второй с использованием метода субтрактивной кластеризации. Проведенные исследования подтвердили эффективность использования интеллектуальных систем управления в интегрированных информационно-управляющих системах адаптивной подвески автомобиля.

**Ключевые слова:** нейронные сети, нечеткая логика, система управления, адаптивная подвеска, моделирование, эффективность, автомобиль.

**Введение.** В настоящее время использование электронного управления параметрами подвески автомобиля – жесткостью и коэффициентом демпфирования амортизаторов, изменением дорожного просвета для оптимальной технической эксплуатации автомобилей является реальной необходимостью. Особенно такие системы необходимы для транспортных средств, работающих в условиях интенсивных нагрузок, сложных условий эксплуатации и повышенной ответственности механизмов.

Автомобильный транспорт всегда считался наиболее опасным видом транспорта. Значительное внимание уделяется проблемам комфорта и безопасности автомобилей. При этом все более высокие требования предъявляются к качеству и надежности работы автомобильных подвесок.

Решение задачи улучшения эксплуатационных характеристик подвесок обычно искалось на пути демпфирования колебаний. Однако если недавно повышение эффективности демпфирования в подвеске связывалось с совершенствованием ее конструкции в целом и отдельных элементов в частности, в настоящее время перспективным направлением стало создание нейро-нечетких систем адаптивного управления подвеской. Совершенствование систем адаптивного управления подвеской автомобиля позволит повысить плавность хода и эксплуатационные показатели автомобиля, такие как устойчивость, надежность, долговечность, проходимость.

В адаптивной подвеске степень демпфирования амортизаторов изменяется в зависимости от состояния дорожного покрытия, параметров движения и запросов водителя. Под степенью демпфирования понимается скорость затухания колебаний, которая зависит от сопротивления амортизаторов и величины пружинных масс. Подвеска автомобиля выполняет одновременно несколько важных функций, от ее конструкции и рабочих характеристик зависят управляемость, устойчивость, плавность хода и другие свойства автомобиля, определяющие его безопасность, комфортность, надежность и экономичность.

**Анализ основных достижений и литературы.** В настоящее время наблюдается интенсивное развитие и практическое применение нейро-нечетких систем для управления и регулирования различных технических объектов [1-3]. Использование новой технологии, нейро-нечеткого моделирования, обусловлено тенденцией

© О.Я. Никонов, В.И. Фастовец, В.Н. Шуляков, 2015

увеличения сложности математических моделей реальных систем. Получить исчерпывающую информацию для построения математической модели сложной реальной системы часто в принципе невозможно. В этих случаях целесообразно использовать методы, специально ориентированные на построение моделей, учитывающих неполноту и неточность входных данных. Именно в таких ситуациях технология нейро-нечеткого моделирования является одной из наиболее конструктивных [4].

Среди нейронных сетей наибольший интерес представляют так называемые нейро-нечеткие сети [5-8]. Алгоритм формирования этих сетей построен на основе системы нечеткого вывода, которая требует ручной настройки параметров. Это является главным препятствием применения нечетких регуляторов в адаптивных системах. С другой стороны, рассматривая систему нечеткого вывода как нейронную сеть, можно применить метод обратного распространения ошибки с целью поиска оптимальных коэффициентов нечеткой системы вывода, которые соответствуют условию адекватного отображения учебных данных.

Это значительно облегчает практическое решение задачи формирования системы управления с использованием нейро-нечетких сетей. Применение алгоритмов автоматической настройки параметров нейро-нечеткой сети на основе метода обратного распространения ошибки позволяет избежать процесса ручной настройки. Однако в этом случае в процессе настройки параметров указанной сети все же нужны достаточно большие временные затраты. Так как вычислительная сложность алгоритмов настройки нейронной сети пропорциональна количеству используемых учебных данных, то при введении локальной оптимизации можно существенно снизить объем этих постоянно обновляемых учебных данных и тем самым существенно уменьшить мощность используемых вычислительных средств, решая задачи настройки сети в реальном масштабе времени.

Поскольку нейро-нечеткие системы относительно легко настраиваются и обладают свойством робастности, то эти свойства могут позволить обеспечить их эффективное использование для управления сложными нелинейными динамическими объектами с неопределенными и существенно изменяемыми параметрами.

**Цель исследования, постановка задачи.** Интеграция гидравлических устройств и электронных систем управления позволяет решать задачи повышения качества процессов управления, адаптивной настройки и поддержания параметров или структуры системы при воздействии на объект управления случайных возмущений, диагностики отказов и неисправностей при сохранении относительно небольших массы и габаритов комплекса «привод - система управления».

Таким образом, возникает актуальная задача создания современных электрогидравлических преобразователей на основе современных систем управления, способных надежно работать в условиях повышенной запыленности внешней среды, большом перепаде температур, значительных вибрациях и ударах и других неблагоприятных факторах, возникающих при эксплуатации автомобилей [9-11].

**Материалы и результаты исследований.** Рассмотрим электрогидравлическую следящую систему [12, 13] работающую при сложных условиях эксплуатации и два нечетких регулятора, описанных в работе [14].

С помощью редактора ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) среды Matlab синтезированы нечеткие регуляторы для электрогидравлической следящей системы подвески автомобиля на основе адаптивной нейро-нечеткой гибридной технологии. Первый из регуляторов создан с помощью метода решетки с

использованием треугольной функции принадлежности. Второй нечеткий регулятор создан с использованием метода субтрактивной кластеризации.

Объектом исследования являются процессы функционирования системы управления электрогидравлического следящего привода адаптивной подвески автомобиля с нейро-нечетким регулятором при сложных условиях эксплуатации. Обучение проводилось гибридным методом, который сочетает метод обратного распространения ошибки с методом наименьших квадратов.

Нейро-нечеткая модель рассматривается как одна из разновидностей систем нечеткого логического вывода типа Сугено. При этом функции принадлежности синтезированных систем настроены так, чтобы минимизировать отклонения между результатами нечеткого моделирования и экспериментальных данных.

Цикл обучения проводился в течение 20 эпох. В конце обучения получены следующие значения нормированной среднеквадратичной ошибки: для метода решетки с использованием треугольной функции принадлежности  $3,1295 \cdot 10^{-9}$ , для метода субтрактивной кластеризации  $1,0399 \cdot 10^{-5}$ .

В результате проведенных экспериментов была апробирована работа созданных нечетких регуляторов. На рис. 1 представлены переходные процессы замкнутой системы электрогидравлического следящего привода адаптивной подвески автомобиля, работающего в сложных условиях эксплуатации, при заданных блоком управления значениях для штатного регулятора (кривая 1), нечеткого регулятора с использованием метода решетки с треугольной функцией принадлежности (кривая 2) и нечеткого регулятора с использованием метода субтрактивной кластеризации (кривая 3).

На рис. 1а представлены переходные процессы замкнутой системы электрогидравлического следящего привода адаптивной подвески автомобиля для выбранного значения перемещения объекта управления (200 мм). Как видно из рисунка, регулятор созданный с использованием метода решетки с треугольной функцией принадлежности (кривая 2) и регулятор с использованием метода субтрактивной кластеризации (кривая 3) позволяют уменьшить как показатель перерегулирования так и время регулирования по сравнению со штатным регулятором (кривая 1). Улучшение составляет до 15 %.

На рис. 1б приведены переходные процессы замкнутой системы электрогидравлического следящего привода адаптивной подвески автомобиля для скорости перемещения объекта управления в случае перемещения объекта управления на 200 мм. Как видно из рисунка, подобно предыдущему примеру, регулятор созданный по методу решетки с треугольной функцией принадлежности (кривая 2) и регулятор с использованием метода субтрактивной кластеризации (кривая 3) позволяют уменьшить как показатель перерегулирования так и время регулирования по сравнению со штатным регулятором (кривая 1). В этом случае улучшение составляет также до 15%.

В обоих случаях регулятор с использованием метода субтрактивной кластеризации демонстрирует еще лучшие результаты чем регулятор созданный по методу решетки с использованием треугольной функции принадлежности.

**Выводы.** В работе исследована эффективность функционирования системы управления адаптивной подвески автомобиля на основе использования нейро-нечетких регуляторов при сложных условиях эксплуатации. Синтезированы два нейро-нечетких регулятора. Первый регулятор создан с использованием метода решетки с треугольной функцией принадлежности, второй с использованием метода субтрактивной кластеризации.

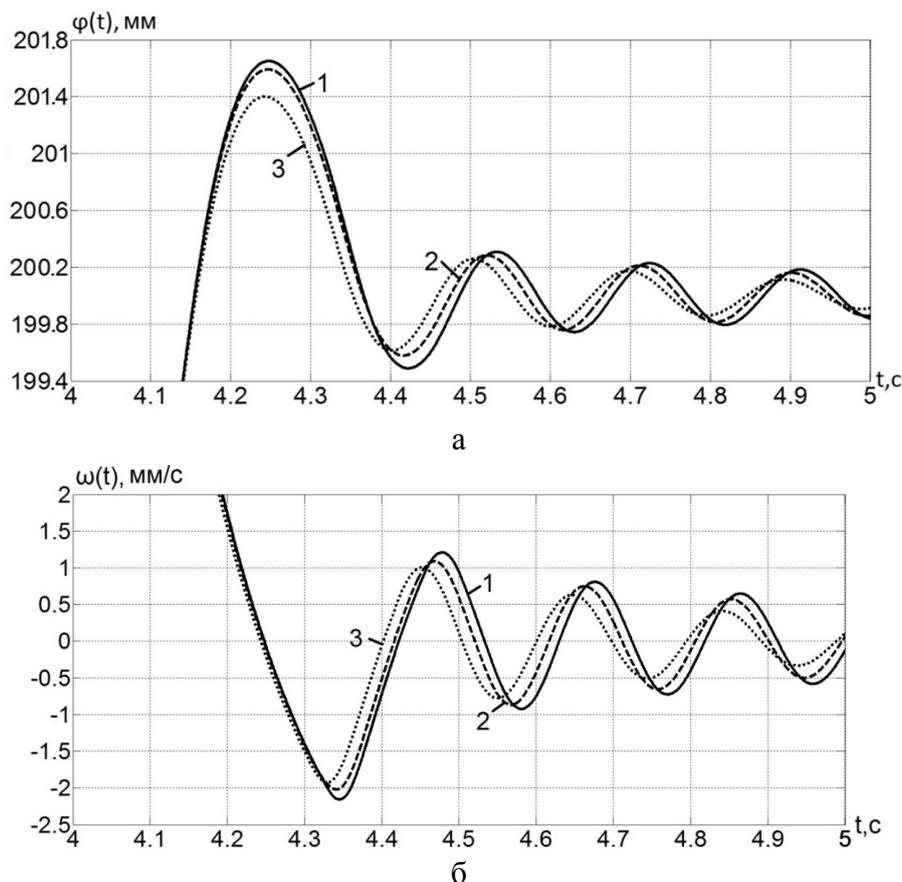


Рисунок 1 – Переходные процессы замкнутой системы электрогидравлического следящего привода адаптивной подвески автомобиля, работающего в сложных условиях эксплуатации: а – для значения перемещения объекта управления на 200 мм; б – скорости объекта управления

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность использования интеллектуальных систем управления в интегрированных информационно – управляющих системах адаптивной подвески автомобиля. Применение нейро-нечетких адаптивных регуляторов целесообразно при проектировании электронных систем управления агрегатами, механизмами и узлами автомобилей, электромобилей, гибридных автомобилей, а также при разработке новых методов диагностики и прогнозирования технического состояния средств транспорта, обеспечивающих высокую эффективность их использования и надежность работы.

Использование нейро-нечетких регуляторов в системах управления электрогидравлических следящих приводов адаптивной подвески автомобиля позволило улучшить качество переходных процессов при регулировании, и время регулирования. Этих результатов удалось достичь с использованием метода решетки с треугольной функцией принадлежности и метода субтрактивной кластеризации. Также введение в контур системы нейро-нечеткого регулятора позволило расширить область устойчивости системы, что в свою очередь позволит повысить надежность системы. Вышесказанное позволит в целом повысить надежность, энергоэффективность, быстродействие, безотказность, долговечность, безопасность использования узлов и агрегатов транспортных средств, что чрезвычайно важно для автомобилей, а также быстроходных транспортных средств специального назначения.

**Список литературы: 1. Гостев В.И.** Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления / В.И. Гостев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.

2. *Круглов В.В.* Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / *В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов.* – М.: Физматлит, 2001. – 221с. 3. *Ali H.K.* Fuzzy Controller Design of Servo System / *H.K. Ali* // Asian Journal of Applied Science. – 2011. – P. 403–413. 4. *Ross T.J.* Fuzzy logic with engineering applications / *T.J. Ross.* – Chichester: Wiley, 2004. – 628 p. 5. *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / *Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский.* – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с. 6. *Liu G.P.* Nonlinear identification and control: a neural network approach / *G.P. Liu.* – London: Springer, 2001. – 210 p. 7. *Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A.* An adaptive learning algorithm for a neuro-fuzzy network / Ed. by B. Reusch "Computational Intelligence. Theory and Applications." – Berlin – Heidelberg – New York: Springer, 2001. – P. 68-75. 8. *Bodyanskiy Ye., Yegorova E., Vynokurova O.* Radial-basis-fuzzy-wavelet- neural network with adaptive activation-membership function // Int. J. on Artificial Intelligence and Machine Learning. 2008. V.8. П. Р. 9-15. 9. *Башта Т.М.* Гидравлические следящие приводы / *Башта Т.М.* – М.: Машгиз, 1961. – 742 с. 10. *Гладкий П.М.* Оптимальне проектування гідропневмосистем і їх елементів / *Гладкий П.М.* – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – 240 с. 11. *Mitshke M.* Bremsschwingungen von Lastkraftwagen // AutomobilIndustrie. 1980. – №1. – S. 129-134. 12. *Гамынин Н.С.* Гидравлический привод систем управления / *Н.С. Гамынин.* – М.: Машиностроение, 1972. – 376 с. 13. *Ніконов О.Я.* Розроблення інформаційно-структурної схеми електрогідравлічних слідкуючих приводів багатоцільових транспортних засобів / *О.Я. Ніконов, В.Ю. Улько* // Вестник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 57. – С. 214–220. 14. *Шуляков В.М.* Аналіз використання методу субтрактивної кластеризації при створенні нечітких регуляторів електрогідравлічних слідкуючих приводів автомобілів / *В.М. Шуляков* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 4(978). – С. 69–73.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Gostev V.I.* Proektirovanie nechetkih reguljatorov dlja sistem avtomaticheskogo upravlenija. SPb.: BHV-Peterburg, 2011. Print. 2. *Kruglov V., M Dli, R. Golunov.* Nechjotkaja logika i iskusstvennye nejronnye seti. Moscow: Fizmatlit, 2001. Print. 3. *Ali H.K.* "Fuzzy Controller Design of Servo System." Asian Journal of Applied Science. No 4. 2011. 403–413. Print. 4. *Ross T.J.* Fuzzy logic with engineering applications. Chichester: Wiley, 2004. Print. 5. *Rutkovskaja D., M. Pilin'skij, L. Rutkovskij.* Nejrionnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. Moscow: Gorjachaja linija-Telekom, 2004. Print. 6. *Liu G.P.* Nonlinear identification and control: a neural network approach. London: Springer, 2001. Print. 7. *Bodyanskiy Ye., V. Kolodyazhniy, A. Stephan.* "An adaptive learning algorithm for a neuro-fuzzy network." Computational Intelligence. Theory and Applications. 2001. 68–75. Print. 8. *Bodyanskiy, Ye., E. Yegorova, O. Vynokurova.* "Radial-basis-fuzzy-wavelet- neural network with adaptive activation-membership function." Int. J. on Artificial Intelligence and Machine Learning. No 8. 2008. 9–15. Print. 9. *Bashta T. M.* Gidravlicheskie sledjashhie privody. Moscow: Mashgiz, 1961. Print. 10. *Gladkij P.M.* Optimal'ne proektuvannja gidropnevmosistem i ih elementiv. Kharkov: NTU "KhPI", 2003. Print. 11. *Mitshke M.* "Bremsschwingungen von Lastkraftwagen." AutomobilIndustrie. No1. 1980. 129–134. Print. 12. *Gamynin N.S.* Gidravlicheskij privod sistem upravlenija. Moscow: Mashinostroenie, 1972. Print. 13. *Nikonov O.J., V.J. Ul'ko.* "Rozroblennja informacijno-strukturної shemi elektrogidravlichnih slidkujuchih privodiv bagatocil'ovih transportnih zasobiv." Vestnik NTU "KhPI ". No 57. 2010. 214–220. Print. 14. *Shuliakov V.M.* "Analiz vikoristannja metodu subtraktivної klasterizacії pri stvorenii nechetkih reguljatoriv elektrogidravlichnih slidkujuchih privodiv avtomobiliv." Visnik NTU "KhPI". Serija "Novi rishennja v suchasnih tehnologijah". No 978.4. 2013. 69–73. Print.

*Надійшла (received) 27.02.2015*