

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С НЕЙРОРЕГУЛЯТОРОМ NN PREDICTIVE CONTROLLER

Розроблена структурна схема системи управління нелінійним динамічним об'єктом з нейромережевим регулятором, включеним на вхід замкнутого контура положення. Виконаний синтез нейрорегулятора з прогнозом NN Predictive Controller. Проведено моделювання системи з урахуванням моментів сухого тертя в підшипниках двигуна і на вихідному валу робочого механізму. Показано, що перехідні процеси в системі при ступінчастій вхідній дії мають високі динамічні характеристики.

Разработана структурная схема системы управления нелинейным динамическим объектом с нейросетевым регулятором, включённым на вход замкнутого контура положения. Выполнен синтез нейрорегулятора с предсказанием NN Predictive Controller. Проведено моделирование системы учётом моментов сухого трения в подшипниках двигателя и на выходном валу рабочего механизма. Показано, что переходные процессы в системе при ступенчатом входном воздействии имеют высокие динамические характеристики.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Система управления огнём легкобронированных машин является существенно нелинейной. Это обусловлено наличием момента сухого трения в подшипниках приводного двигателя и момента трения в кинематическом устройстве сопряжения, а так же наличием люфта между зубьями ведущей и ведомой шестерни. Кинематическая схема системы наведения и стабилизации содержит упругие элементы, что значительно усложняет расчетную схему механической части системы, превращая её в многомассовую. На вооружение действуют внешние возмущающие моменты, обусловленные колебаниями корпуса. Разработка эффективных систем управления, обеспечивающих высококачественное регулирование, является актуальной задачей.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Нейросетевые системы управления являются альтернативой классическим методам построения систем управления нелинейными объектами. Использование искусственных нейронных сетей позволяет решать задачи управления нелинейными объектами, в то время как традиционные методы не обеспечивают решения подобных задач.

В настоящее время проводятся большие работы по применению нейронных сетей в системах управления. В [1] рассмотрены вопросы теории и методы синтеза систем управления нелинейными динамическими объектами на основе обучаемых многослойных сетей. Значительное внимание уделено фундаментальным свойствам нелинейных многослойных нейросетей и алгоритмам их обучения в реальном времени. В [2] приведены базовые функциональные структуры нейросетевых динамических систем управления и идентификации состояния. В многочисленных публикациях, например [3, 4] показана эффективность использования нейросетевых структур для регулирования координат многомассовых электромеханических систем с отрицательным вязким трением. В работах рассматриваются вопросы синтеза современных регуляторов электромеханических систем на основе

методов фаззи – логики, нейронных сетей и генетических алгоритмов. В результате исследований разработана методика синтеза гибридной нейронной сети, реализующая принцип действия фаззи регулятора, позволившая автоматически с помощью компьютера определить требуемые параметры регулятора. Анализ последних достижений и публикаций по синтезу нейросетевых систем управления нелинейными динамическими объектами показывает, что данное направление является перспективным.

Цель статьи. Целью работы является разработка и исследование нейросетевой системы управления нелинейным динамическим объектом специального назначения, обеспечивающей высококачественное регулирование.

ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА ИССЛЕДОВАНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [5] выполнен синтез нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин с использованием нейроконтроллера с предсказанием. Разработана двухконтурная система регулирования с нейронной компенсацией нелинейностей исполнительного устройства стабилизатора вооружения в контуре регулирования скорости. Регулятор положения может быть пропорциональным либо пропорционально - дифференциальным. В [6] выполнен синтез и исследование системы с ПД – регулятором в контуре положения. В [7] показано, что нейросетевая система управления с П-регулятором положения и с предупредлением по скорости обеспечивает высококачественное регулирование. При использовании принципа предупредления на вход регулятора скорости кроме сигнала, пропорционального ошибке регулирования $\Delta\varphi(t)$, подаётся сигнал, пропорциональный производной от задающего воздействия $\dot{\varphi}_3(t)$.

При разработке системы наведения и стабилизации представляет интерес рассмотрение другого подхода к построению нейросетевой системы регулирования, а именно, включение нейрорегулятора на вход замкнутого контура положения. В этом случае компенсация имеющихся нелинейностей осуществляется

на уровне сигналов задания, а не сигналов воздействия на объект.

Структурная схема нейросетевой системы показана на рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения: φ_3 , φ – заданное и реальное положение оси ствола орудия; $\Delta\varphi$ – ошибка регулирования; $S_{упр}$ – величина входного воздействия; $k_{ум}$ – коэффициент передачи усилителя мощности УМ; U_d – напряжение, поступающее на якорную обмотку приводного двигателя ПД; $I_я$ – ток якоря ПД; M_d – электромагнитный момент двигателя; $R_я$ – сопротивление якорной обмотки ПД; $c_\phi = k_d \Phi$; k_d – конструктивный коэффициент приводного двигателя ПД; Φ – магнитный поток ПД; J_d – момент инерции ротора ПД; N – передаточное число кинематического устройства сопряжения (КУС); ω_d – скорость вала ПД; $M_{тд}$ – моменты сухого трения в подшипниках ПД; $M_{тм}$ – момент трения КУС; J_m – момент инерции нагрузки СВ; ω_m – скорость вращения нагрузки СВ; M_y – момент упругости КУС; $f(\Delta\varphi_m)$ – функция, зависящая от коэффициента жёсткости элементов трансмиссии и вели-

чины люфта между зубьями ведущей и ведомой шестерни; $M_{тд}$ – момент сухого трения в подшипниках ПД; $M_{тм}$ – момент трения кинематического устройства сопряжения. Случайные изменения возмущающего момента $M_c(t)$ формируются от источника случайного сигнала типа белого шума $V_{бш}$ интенсивностью ν с помощью формирующего фильтра с передаточной функцией колебательного звена $M(p) = k \cdot \omega / (p + 2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot p + \omega^2)$, где ω_b – резонансная частота собственных колебаний; ξ – коэффициент демпфирования; k_b – коэффициент усиления формирующего фильтра.

На вход нейрорегулятора подаётся сигналы задания φ_3 и сигнал обратной связи по положению φ . Нейрорегулятор генерирует такое воздействие на замкнутый контур положения $\varphi_{NN}(t)$, при котором обеспечивается минимальная ошибка регулирования, т.е. разность между заданным и действительным изменением угла φ .

В контур положения включён П-регулятор, коэффициент усиления которого k_p выбирается в процессе моделирования системы.

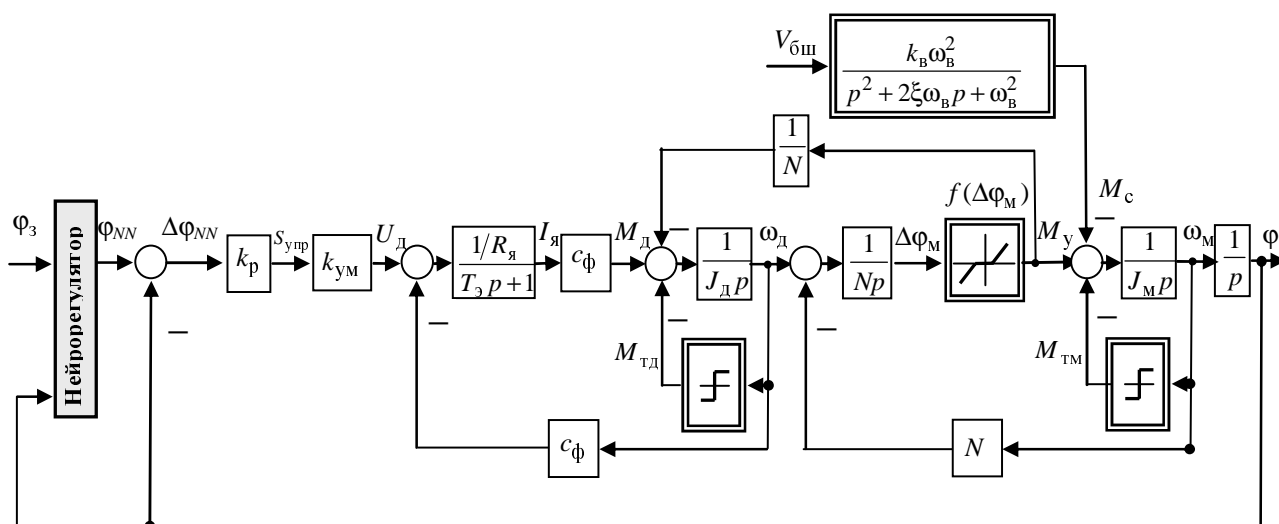


Рис. 1. Структурная схема системы с включением нейрорегулятора на вход замкнутого контура положения

При построении нейрорегулятора, как и в системах, рассмотренных в [5-7], использовано нелинейное предиктивное регулирование. Синтез нейросетевой системы управления производился с помощью пакета прикладных программ Neural Network Toolbox системы MATLAB. Выбран нейроконтроллер с предсказанием NN Predictive Controller. Данный контроллер является наиболее эффективным для решения поставленной задачи. При управлении с предсказанием модель управляемого объекта используется для того, чтобы предсказать его будущее поведение, а алгоритм оптимизации применяется для расчета такого управления, которое минимизирует разность между желаемыми и действительными изменениями выхода модели. В качестве модели объекта управления используется двухслойная нейронная сеть. Подробно принцип

действия и порядок синтеза нейроконтроллера для системы со структурой [5] описан в [8, 9]. Синтез нейроконтроллера NN Predictive Controller для системы, соответствующей рис.1, проводился аналогично.

Схема нейросетевой системы управления, сформированная в окне SIMULINK, показана на рис. 2. Эта структура включает блок управляемого объекта, представленного подсистемой Subsystem и блок контроллера NN Prediction Controller, а также блоки генерации эталонного ступенчатого сигнала со случайной амплитудой Random Reference, блоки построения графиков.

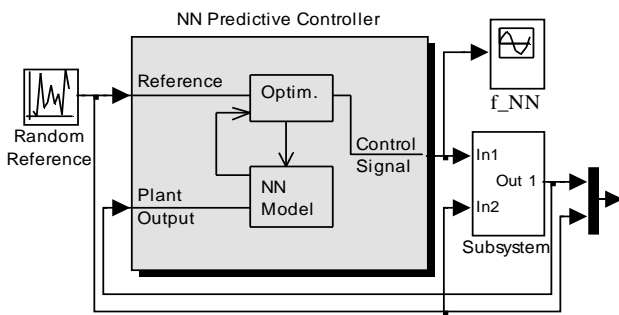


Рис. 2. Схема модели нейросетевой системы, разработанная в SIMULINK

На рис. 3 показана схема модели исполнительного устройства стабилизатора вооружения с учётом двух звеньев сухого трения на валу двигателя и механизма. Поскольку указанные моменты носят пассивный характер, то для их задания в схеме модели, разработанной в SIMULINK, использованы два блока MATLAB Fcn, предназначенные для написания выражений на языке MATLAB. Текст функций составлялся в соответствии со следующими выражениями.

$$M_{\text{ТД}} = \begin{cases} M_{\text{д}} & \text{при } |M_{\text{д}}| \leq M_{\text{ТД.0}} \ \& \ |\omega_{\text{д}}| \leq 0,0001; \\ M_{\text{ТД.0}} \cdot \text{sign}(\omega_{\text{д}}) & \text{при } |\omega_{\text{д}}| > 0,0001. \end{cases}$$

$$M_{\text{ТМ}} = \begin{cases} M_{\text{у}} & \text{при } |M_{\text{у}}| \leq M_{\text{ТМ.0}} \ \& \ |\omega_{\text{м}}| \leq 0,00001; \\ M_{\text{ТМ.0}} \cdot \text{sign}(\omega_{\text{м}}) & \text{при } |\omega_{\text{м}}| > 0,00001. \end{cases}$$

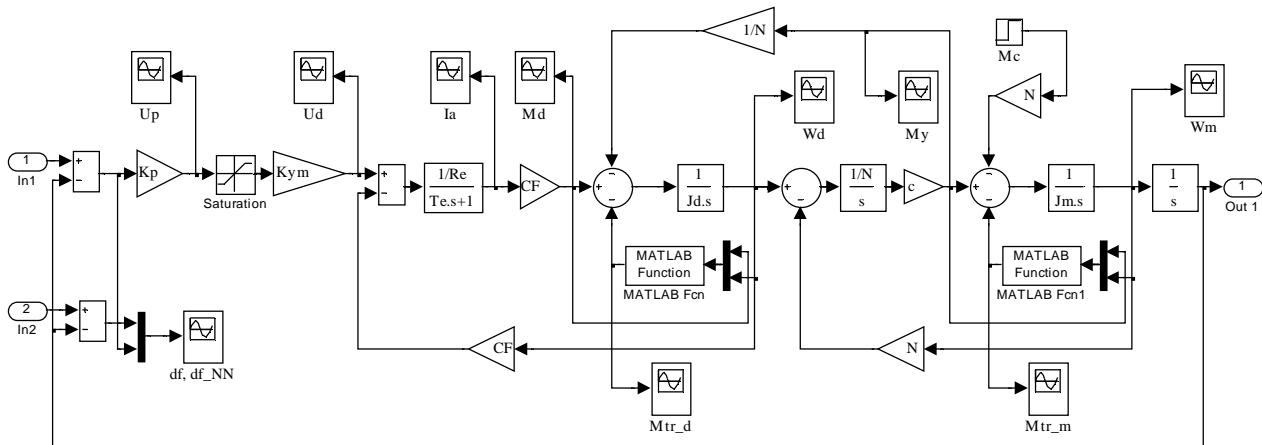


Рис. 3. Схема модели объекта управления (подсистемы Subsystem рис. 2)

Синтез нейроконтроллера проводился для линейного объекта управления без учета возмущающих воздействий. Как показали исследования, синтезированный нейроконтроллер без переобучения обеспечивает высокие динамические характеристики реальной нелинейной системы наведения и стабилизации при ступенчатом входном воздействии. При других видах воздействий и при учёте возмущающих воздействий и помех измерения регулируемых координат динамические характеристики системы уступают соответствующим характеристикам системы с нейрорегулятором, включённым на вход контура скорости [5].

При моделировании системы на ЭВМ было определено оптимальное значение П-регулятора положения $k_p = 6$, которое затем оставалось неизменным

при всех дальнейших исследованиях. В качестве примера на рис. 4. приведены графики переходных процессов переменных состояния синтезированной системы с учётом двух звеньев сухого трения на выходном валу двигателя и на выходном валу рабочего механизма при ступенчатом входном воздействии, находящемся в пределах $\varphi_3 = -1 \div 1$ рад. Все обозначения переменных соответствуют рис. 2 и рис. 3.

Синтез нейроконтроллера является достаточно сложным и трудоёмким процессом и в данной статье не приводится. Оптимальные параметры нейроконтроллера следующие: размер скрытого слоя нейронов $S = 10$; количество элементов запаздывания на входе модели $N_i = 2$ и количество элементов запаздывания на выходе модели $N_j = 5$; верхний предел суммирования в показателе качества $N_2 = 23$, число итераций на 1 такт дискретности $\gamma = 2$; длина обучающей выборки (количество точек съема информации) $N_b = 12000$; максимальный интервал идентификации $t_{\text{max}} = 0,7$ с; минимальный интервал идентификации $t_{\text{min}} = 0,05$ с; такт дискретности (определяет интервал между двумя последовательными моментами съема данных) $\Delta t = 0,003$ с; верхний предел суммирования при оценке мощности управления $N_n = 2$; коэффициент веса для составляющей мощности управления $\rho = 0,05$; параметр одномерного поиска, задающий порог уменьшения показателя качества $\alpha = 0,001$ (величины N_n , ρ и α не значительно влияют на результаты синтеза). В качестве процедуры одномерного поиска принята *csrchbas*, а в качестве обучающей функции – *trainlm*. Количество циклов обучения, по истечении которых ошибка обучения переставала уменьшаться, составляло $200 \div 300$. Средняя ошибка обучения составляет $(6 \div 8) \cdot 10^{-9}$, а мгновенные ошибки на обучающем, тестовом и контрольном множествах не превышают $(4 \div 6) \cdot 10^{-4}$.

Как видно из графиков, переходные процессы в системе с учётом сухого трения при ступенчатом входном воздействии имеют достаточно высокие динамические характеристики. Угол $\varphi_3 = 0,05$ рад отрабатывается за время $t = 0,2$ с. Перерегулирование переходных процессов угла φ составляет 2,1%.

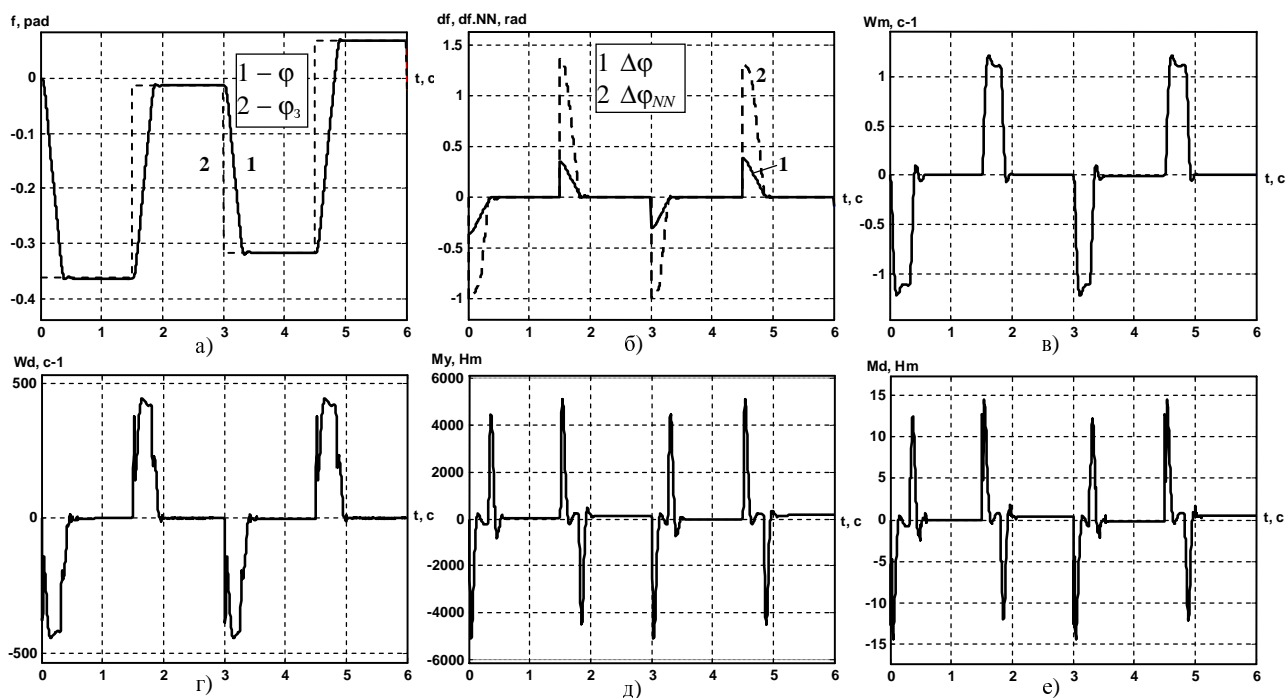


Рис. 4. Графики переходных процессов переменных состояния системы:

а) – задающее воздействие $\varphi_3(t)$ и угол $\varphi(t)$; б) – ошибка регулирования $\Delta\varphi(t) = \varphi_3(t) - \varphi(t)$ и $\Delta\varphi_{NN}(t) = \varphi_{NN}(t) - \varphi(t)$; в) – скорость механизма $\omega_m(t)$; г) – скорость двигателя $\omega_d(t)$; д) – момент упругости $M_y(t)$; е) – момент двигателя $M_d(t)$

ВЫВОД

В статье выполнена разработка нейросетевой системы управления нелинейным динамическим объектом специального назначения.

Разработана структурная схема нейросетевой системы наведения и стабилизации. Система является одноконтурной с включением нейрорегулятора на вход контура положения. В системе MATLAB выполнен синтез нейроконтроллера с предсказанием NN Prediction Controller. Проведено моделирование системы учётом моментов сухого трения в подшипниках двигателя и на выходном валу рабочего механизма. Показано, что переходные процессы в системе при ступенчатом входном воздействии, находящемся в диапазоне $\varphi_3 = -1 \div 1$ рад имеют высокие динамические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления. – М.: ИПРЖР, 2002. – 480 с.
2. Бодянский Е.В., Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. – Харьков: Телетех, 2004. – 264 с.
3. Клепиков В.Б., Полянская И.С. Синтез двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением при регулировании по полному и неполному вектору состояния // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПИ". – 2001. – Вип.10. – С. 36-40.
4. Клепиков В. Б. Моисеенко П. Л. Цепковский Ю. А. Синтез гибридной нейронной сети для двухмассовой ЭМС при срывных фрикционных автоколебаниях // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. научн. трудов "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Харьков, 2003. – Вып.10. – Т.1. – С. 512-514.

5. Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А. Разработка нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин. // Электротехника и электромеханика. – Харьков: ХНТУ "ХПИ" – 2008. – №2 – С. 31-34.
6. Кузнецов Б.И., Василец Т.Е. Варфоломеев А.А. Побудова нейромережевої системи курування нелінійною електро-механічною системою з використанням нейроконтролера з передбаченням. // Електроінформ. – Львів: ТОВ "Екоінформ" – 2008. – №1. – С. 6-10.
7. Синтез и исследование нейросетевой системы управления нелинейным динамическим объектом. Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Коломиец В.В., Машнев А.Е., Варфоломеев А.А. // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов МНТК. – Донецк: Дон НГУ, 2008. Т. 2. – С. 165-169.
8. Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А. Синтез нейроконтроллера с предсказанием для двухмассовой электромеханической системы. // Электротехника и электромеханика. – Харьков: ХНТУ "ХПИ" – 2008. – №3 – С. 27-32.
9. Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А. Нейроуправление нелинейным динамическим объектом с использованием метода обобщенного управления с предсказанием. // Электротехника и электромеханика. – Харьков: ХНТУ "ХПИ" – 2008. – №4 – С. 34-41.

Поступила 02.09.08

Кузнецов Борис Иванович, д.т.н., проф.,
 Василец Татьяна Ефимовна, к.т.н., доц.,
 Варфоломеев Алексей Алексеевич
 Украинская инженерно – педагогическая академия
 Украина, 61003, Харьков, ул. Университетская, 16, УИПА,
 кафедра СУТПиО,
 тел. (057) 733-79-59