

УДК 681.5.01.23

Б.И. Кузнецов, Т.Е. Василец, А.А. Варфоломеев

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОСЕТОВОЙ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ВООРУЖЕНИЯ ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ МАШИН

Выполнен синтез и проведены исследования динамических характеристик нейросетевой системы при линейно нарастающем входном воздействии. Разработана система, компонентами которой являются: линейный регулятор положения, нейронный регулятор скорости и предупредительное по скорости. Выполнен синтез нейрорегулятора с предсказанием. Установлена приближённая зависимость, позволяющая определять коэффициент предупреждения в функции скорости. Показано, что система обеспечивает отработку угла с заданной точностью.

Ключевые слова: нейроконтроллер с предсказанием, нейросетевая система, система наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин с нейроконтроллером.

Введение

Постановка проблемы. Одной из наиболее важных задач при модернизации систем управления огнём легкобронированных машин является повышение тактико-технических характеристик и качества системы стабилизации основного и вспомогательного вооружения. Используемые в настоящее время системы стабилизации вооружения не могут обеспечивать требуемых для эффективного ведения огня значений ошибки стабилизации, диапазона регулирования скорости, неплавности наведения и др. Поэтому разработка систем управления вооружением легкобронированных машин, имеющих высокие динамические характеристики, является актуальной.

Анализ последних достижений и публикаций. Для построения эффективных систем управления в настоящее время широко используются нейронные сети. 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. Рассмотрены примеры, иллюстрирующие использование многослойных нейронных сетей в качестве нелинейных регуляторов. В многочисленных публикациях, например [3] показана эффективность использования нейросетевых структур для регулирования координат одномассовых и двухмассовых электромеханических систем с отрицательным вязким трением. Работа [4] посвящена синтезу современных регуляторов электромеханических систем на основе методов фаззи-логики и нейронных сетей. Анализ последних достижений и публикаций по синтезу нейросетевых систем управления нелинейными динамическими объектами показывает, что данное направление является перспективным.

Цель статьи: синтез нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин и исследование динамических характеристик при линейно нарастающем с заданной скоростью входном воздействии.

1. Модель исполнительного устройства стабилизатора вооружения

Исполнительное устройство стабилизатора вооружения легкобронированных машин состоит из усилителя мощности, приводного двигателя и кинематического устройства сопряжения. Кинематическая схема системы наведения и стабилизации содержит упругие элементы (элементы конечной жесткости). Наличие упругих элементов усложняет расчетную схему механической части системы, превращая её в многомассовую. Система управления является существенно нелинейной, что 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. На вооружение действуют внешние возмущающие моменты, обусловленные колебаниями корпуса.

Структурная схема исполнительного устройства стабилизатора вооружения (СВ) показана на рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения: $S_{упр}$ – величина входного воздействия; $k_{ум}$ – коэффициент передачи усилителя мощности; U_d – напряжение, поступающее на якорную обмотку приводного двигателя (ПД); I_d – ток якоря ПД; M_d – электромагнитный момент двигателя; $R_я$ – сопротивление якорной обмотки ПД; $c_{ф} = k_d \Phi$; k_d – конструктивный коэффициент приводного двигателя; Φ – магнитный поток ПД; J_d – момент инерции ротора ПД; N – передаточное число кинематического устройства сопряжения; ω_d – скорость вала ПД; $M_{тд}$ – моменты сухого трения в под-

шипниках ПД; M_{TM} – момент трения; J_M – момент инерции нагрузки СВ; ω_m – скорость вращения нагрузки СВ; M_y – момент упругости КУС; $f(\Delta\varphi_m)$ – функция, характеризующая механическую связь между двигателем и механизмом, параметрами которой являются: коэффициент жёсткости элементов трансмиссии c и величина люфта между зубьями ведущей

и ведомой шестерни \hat{r} ; M_{Td} – момент сухого трения в подшипниках ПД; M_{TM} – момент трения кинематического устройства сопряжения; M_c – возмущающий момент, обусловленный колебаниями корпуса носителя при движении машины по пересечённой местности; $T_3=L_r/R_r$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи электропривода.

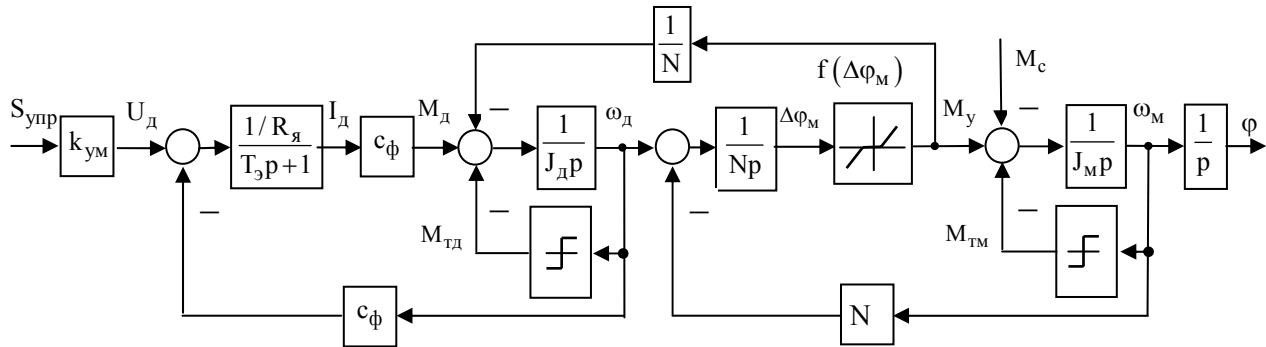


Рис. 1. Структурная схема исполнительного устройства стабилизатора вооружения

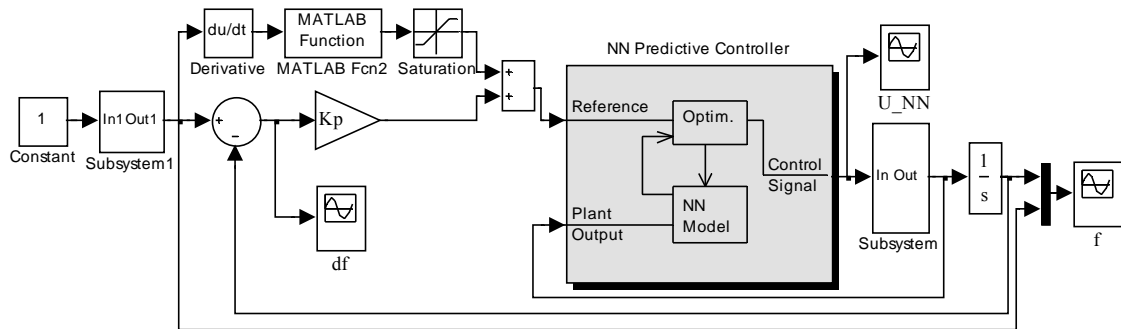


Рис. 2. Схема нейросетевой системы управления с предупредлением

2. Схема нейросетевой системы управления

Для обеспечения заданных характеристик системам наведения и стабилизации использован нейросетевой подход к построению системы. В работе предлагается система подчинённого регулирования, состоящая из контура скорости и контура положения нелинейности исполнительного устройства стабилизатора вооружения компенсируются в контуре скорости путём использования нейрорегулятора. В контуре положения может быть использован П-регулятор. Для повышения характеристик системы используется предупредление по скорости.

Структурная схема нейросетевой системы управления, разработанная в Simulink системы MATLAB показана на рис. 2. Схема включает блок нейроконтроллера NN Prediction Controller, блок Subsystem1 используемый для формирования задающего воздействия, имеющего участки разгона, торможения и движения с установившейся скоростью, блоки построения графиков и блоки, относящиеся к объекту управления. В контур положения включён П-регулятор с коэффициентом усиления K_p . Звенья Derivative и MATLAB Fcn2 включены в

схему для реализации предупредления по скорости.

Схема подсистемы Subsystem приведена на рис. 3. Данная схема составлена на основании структурной схемы исполнительного устройства стабилизатора вооружения (рис. 1). Блоки MATLAB Fcn и MATLAB Fcn1 используются для задания моментов сухого трения на валу двигателя и механизма. Наличие люфта в кинематическом устройстве сопряжения и действие возмущающего воздействия M_c в данной схеме не учитывается.

3. Синтез нейроконтроллера с предсказанием

В качестве нейрорегулятора контура скорости выбран регулятор с предсказанием NN Predictive Controller; реализованный в пакете прикладных программ Neural Network Toolbox системы MATLAB.

Управление с предсказанием использует принцип удаляющегося горизонта, когда нейросетевая модель управляемого объекта предсказывает реакцию объекта на определенном интервале времени в будущем. Предсказание используется программой численной оптимизации для того, чтобы вычислить управляющий сигнал, который минимизирует критерий качества

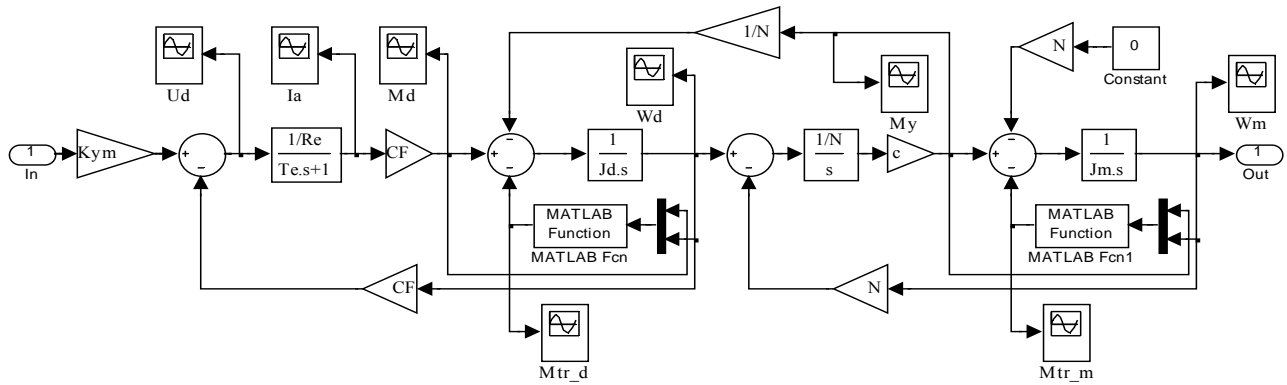


Рис. 3. Схема подсистемы Subsystem нейросетевой системы управления рис. 2

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [y_r(t+j) - y_m(t+j)]^2 + \dot{r} \sum_{j=1}^{N_4} [\dot{u}'(t+j-1) - u'(t+j-2)]^2,$$

где константы N_1 , N_2 и N_4 задают пределы, внутри которых вычисляются ошибки слежения и мощность управляющего сигнала. Переменная u' описывает пробный управляющий сигнал; y_r – ожидаемая, а y_m – истинная реакция модели рассматриваемой системы. Величина \dot{r} определяет вклад, который вносит мощность управления в критерий качества.

Структурная схема на рис. 4 иллюстрирует процесс управления с предсказанием. Регулятор состоит из нейросетевой модели управляемого объекта и блока оптимизации. Блок оптимизации определяет значения u' , которые минимизируют критерий качества управления, а соответствующий управляющий сигнал управляет процессом.

На первом этапе вначале генерируется обучающая выборка, а затем происходит задание параметров нейронной сети и её обучение. Тренировочные данные генерируются путём подачи ступенчатых сигналов со случайной амплитудой на объект управления. Качество тренировки сети в значительной степени зависит от длины обучающей выборки и такта дискретности, определяющего интервал между двумя последовательными моментами съема данных. Оптимальными в решаемой задаче являются: количество данных $(8 \div 10) \cdot 10^3$, такт дискретности – $0,001$ с. Для получения представительной выборки необходимо правильно задать максимальное и минимальное значения интервала идентификации, т.е. длительности скачков заданий. Величина их зависит от параметров объекта управления. В рассматриваемой задаче максимальная длительность скачков заданий должна быть примерно равна времени регулирования контура скорости, минимальная – на порядок меньше.

Для нейрорегулятора с предсказанием используется двухслойная сеть с прямой передачей сигнала. При построении нейронной сети регулятора вначале формируется и обучается статическая сеть.

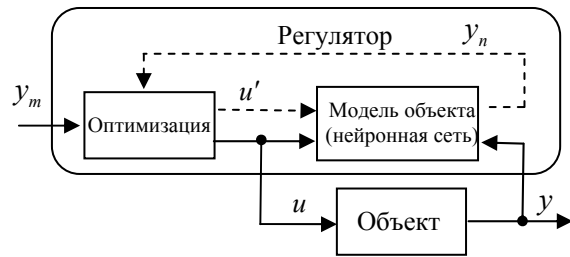


Рис. 4. Структурная схема системы с регулятором, использующим принцип предсказания

Наиболее важным вопросом является выбор количества нейронов скрытого слоя. При малом количестве нейронов сеть не может выполнять поставленную задачу, а при большом наблюдается явление переобучения и возрастает объем вычислений. Для рассматриваемой задачи оптимальное значение находится в пределах $11 \div 14$ при этом средняя ошибка обучения имеет порядок 10^{-10} , а мгновенная ошибка не превышает $10^{-3} \div 10^{-4}$. Затем формируется динамическая сеть путём переключения связей между слоями в соответствии с заданным количеством элементов запаздывания на входе и выходе модели. Наилучшие результаты получены при значениях 2 и 5 соответственно.

При синтезе контроллера варьируются величины N_2 , N_u и \dot{r}_i (величина N_1 фиксирована и равна 1). Для решаемой задачи оптимальные значения находятся в пределах $N_2=23 \div 25$, $N_u=2$ $\dot{r}_i=0,05$.

4. Моделирование нейросетевой системы с П-регулятором в контуре скорости

Для определения характеристик разработанной системы было проведено моделирование системы при различных видах входных воздействий. Одним из основных исследуемых режимов нейросетевой системы является режим обработки линейно изменяющегося входного воздействия. При этом минимальная скорость нарастания и уменьшения обработки угла составляет $\omega_{\varphi, \min} = 0,00035$ с⁻¹. На рис. 5 приведены графики переходных процессов системы с П-регулятором положения при минимальной скорости нарастания

тания и уменьшения угла. Как видно из графиков, при $\omega_{\varphi, \min} = 0,00035 \text{ с}^{-1}$ отработка угла происходит при значительной неравномерности скорости механизма ω_m . Скорость имеет колебательный характер с частотой колебаний 6 Гц и амплитудой $0,4 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Следовательно, нарастание и уменьшение угла φ также

происходит с колебаниями вокруг φ_3 . Амплитуда колебаний составляет $0,09 \cdot 10^{-4}$ рад с частотой 6 Гц.

Средняя скоростная ошибка составляет $(1,3 \div 2,4) \cdot 10^{-4}$ рад, ошибка по положению находится в пределах $(0,85 \div 2) \cdot 10^{-4}$ рад.

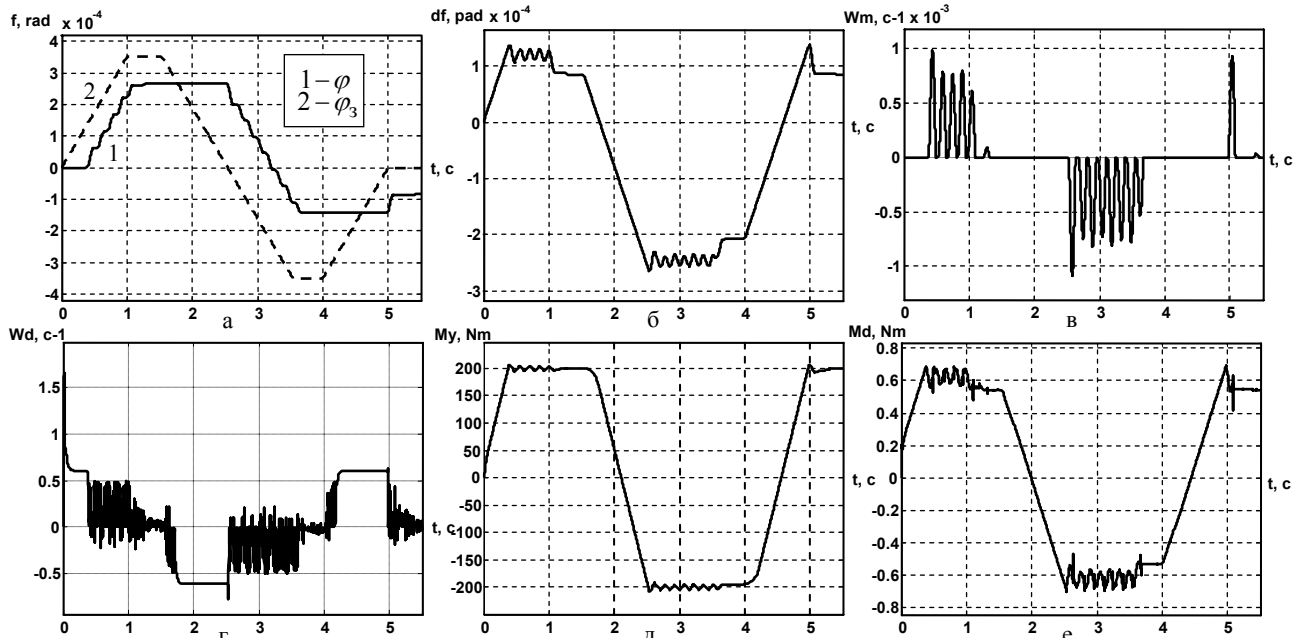


Рис. 5. Переходные процессы системы при линейно изменяющемся воздействии:
 а – отработки заданного угла φ ; б – ошибки регулирования $\Delta\varphi$; в – скорости механизма ω_m ;
 г – скорости двигателя ω_d ; д – момента упругости M_y ; е – момента двигателя M_d

5. Моделирование нейросетевой системы с предупредлением по скорости

Как известно, при подчинённом регулировании динамику контура положения можно существенно повысить за счёт предупредления, т.е. подачи на вход регулятора скорости кроме сигнала, пропорционального ошибке регулирования $\Delta\varphi(t)$, сигнала пропорционального производной от задающего воздействия $\frac{\varphi_3(t)}{dt}$. Внутренние регуляторы систем подчинённого регулирования активизируются при этом раньше, чем внешние регуляторы замечают отклонения от заданий. Запоздывание внешних контуров регулирования при этом компенсируется, а регулирование положения происходит без динамических ошибок. Однако на практике, можно добиться лишь ограниченного уменьшения динамических ошибок.

В разрабатываемой системе, как указывалось выше, использован принцип предупредления. На вход нейрорегулятора введён сигнал, пропорциональный $\varphi'_3(t)$. Для ограничения сигнала при скачкообразном изменении задания на положение использовано звено ограничения Saturation (рис. 2).

Как показали исследования, путём подбора коэффициента предупредления k_{Π} можно существен-

но снизить скоростную ошибку. Трудность заключается в том, что оптимальное значение коэффициента $k_{\Pi, \text{опт}}$ для каждого значения скорости нарастания и уменьшения отработки угла различно. В процессе исследований установлена следующая приближённая зависимость

$$k_{\Pi, \text{опт}} = \begin{cases} 0 & \text{при } \varphi'_3(t) = 0; \\ 1 + 7,29 \cdot k1 / \exp(k-1)^2 & \text{при } \varphi'_3(t) \neq 0, \end{cases}$$

где $k, k1$ – коэффициенты, определяемые следующим образом: $k = \log(10 \cdot |\varphi'_3(t)| / \omega_{c, \min})$; $k1 = 1$ при $\varphi'_3(t) \geq 0$ и $k1 = 2,2$ при $\varphi'_3(t) < 0$. Приведенная зависимость определения $k_{\Pi, \text{опт}}$ реализована в виде MATLAB Fcn2 (рис. 3).

На рис. 6 показаны графики переходных процессов переменных состояния системы с предупредлением по скорости. Как видно из графиков, при $\omega_{\varphi, \min} = 0,00035 \text{ с}^{-1}$, скорость механизма $\dot{\gamma}_m$ имеет колебательный характер с частотой колебаний 6 Гц и амплитудой $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Амплитуда колебаний угла φ относительно φ_3 составляет $0,09 \cdot 10^{-4}$ рад с частотой 6 Гц. Средняя скоростная ошибка составляет $(0,05 \div 0,08) \cdot 10^{-4}$ рад, ошибка по положению находится в пределах $(0,07 \div 0,095) \cdot 10^{-4}$ рад.

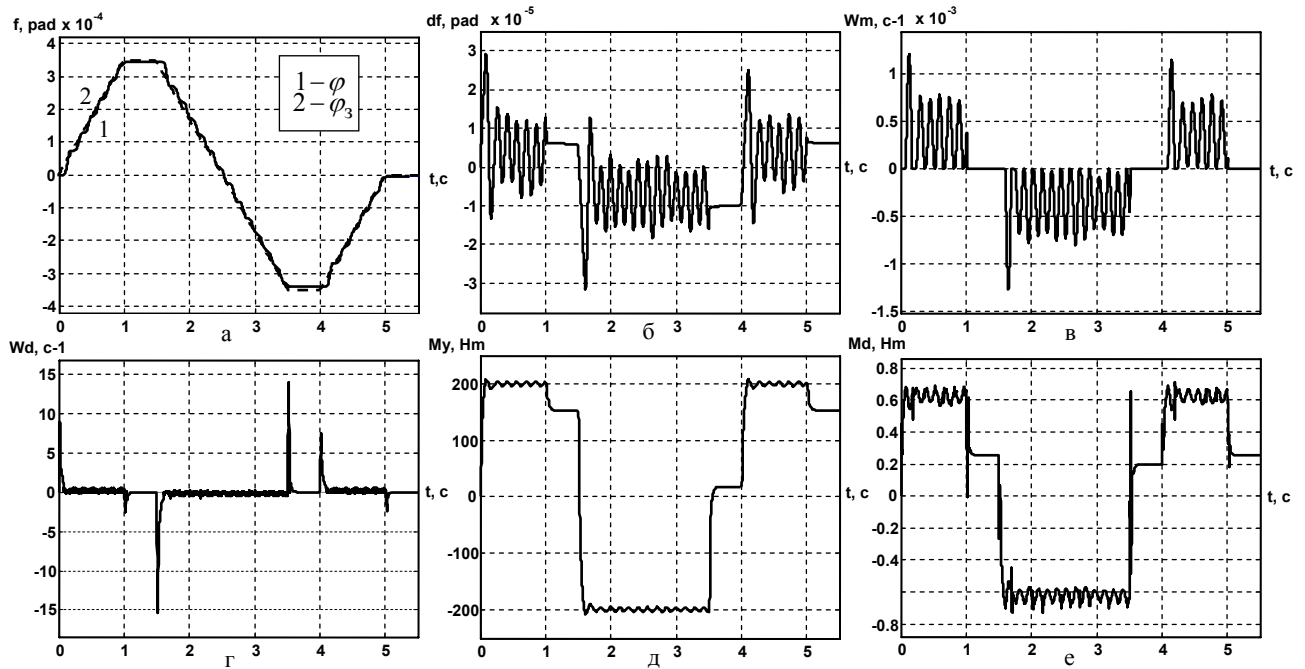


Рис. 6. Переходные процессы в системе с предупредлением при линейно изменяющемся воздействии:
 а – отработки заданного угла φ ; б – ошибки регулирования $\Delta\varphi$; в – скорости механизма ω_M ;
 г – скорости двигателя ω_D ; д – момента упругости M_y ; е – момента двигателя M_D

Выводы

В статье выполнен синтез и проведены исследования динамических характеристик нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных. Выполнено моделирование системы в режиме отработки линейно изменяющегося входного воздействия при минимальной скорости нарастания и уменьшения отработки угла $\omega_{\varphi, \min} = 0,00035 \text{ c}^{-1}$. Установлено, что отработка угла происходит при значительной неравномерности скорости механизма $\dot{\gamma}_M$. Ошибки регулирования имеют недопустимые значения. Для повышения динамических характеристик системы разработана система, компонентами которой являются: линейный регулятор положения, нейронный регулятор скорости и предупредление по скорости. Как показали исследования, путём подбора коэффициента предупредления $k_{\text{п}}$ можно существенно снизить ошибки системы. Установлено, что оптимальное значение коэффициента $k_{\text{п, опт}}$ для каждого значения скорости нарастания и уменьшения отработки угла различно. Определена приближённая зависимость, позволяющая определять $k_{\text{п, опт}}$ и написана

MATLAB-функция, реализующая данную зависимость. Использование нейрорегулятора скорости и предупредления по скорости позволило снизить ошибки системы в несколько десятков раз.

Список литературы

1. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – М.: ИПРЖР, 2002. – 480 с.
2. Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: архитектура, обучение, применения / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. – Х.: Телетех, 2004. – 264 с.
3. Клепиков В.Б. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами / В.Б. Клепиков, К.В. Махотило, С.А. Сергеев // Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 2-6.
4. Нейро-фаззи регулятор для электроприводов с проскальзыванием / В.Б. Клепиков, А.В. Клепиков, О.Ю. Глебов, П.Л. Моисеенко, И.С. Полянская // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Х., 2002. – № 9, Т. 4. – С. 47-52.

Поступила в редакцию 14.10.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаев, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, Харьков..

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ ОЗБРОЄННЯ ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН

Б.І. Кузнєцов, Т.Ю. Василець, О.О. Варфоломєєв

Розроблена система, компонентами якої є: лінійний регулятор положення, нейронний регулятор швидкості і передуправління за швидкістю. Виконаний синтез нейрорегулятора. Отримана залежність коефіцієнта передуправління у функції швидкості. Виконано моделювання системи при лінійно наростаючій вхідній дії.

Ключові слова: нейроконтролер з проרוкуванням, нейромережева система, система наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з нейроконтролером.

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE NEURO-SYSTEM OF AIMING
AND STABILIZING OF ARMAMENT OF LIGHT-ARMORED MACHINES**

B.I. Kuznetsov, T.E. Vasilets, A.A. Varfolomeyev

The system is developed the components of which is: linear regulator of position, neuron regulator of speed and pre-management on speed. The synthesis of neuro-controller is executed. Dependence of coefficient of pre-management in the function of speed is got. The design of the system is executed at linearly increasing entrance influence.

Keywords: *neuro-controller with a prediction, neuro-system system, system of aiming and stabilizing of armament of light-armour machines with neuro-controlle.*