

## СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ВООРУЖЕНИЯ ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ МАШИН ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Кузнецов Б.И., д.т.н., проф., Василец Т.Е., к.т.н., доц., Варфоломеев А.А.  
Украинская инженерно-педагогическая академия  
Украина, 61003, Харьков, ул. Университетская, 16, УИПА, кафедра СУТПиО  
тел. (057) 733-79-59

*Виконаний синтез і проведені дослідження динамічних характеристик нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин за наявності зовнішніх збурюючих дій. Розроблена схема моделі об'єкту управління з урахуванням зовнішніх збурюючих дій, виконаний синтез нейрорегулятора і проведено моделювання системи. Показано, що запропонована нейромережева система володіє однією з основних якостей систем - є нечутливою до зовнішніх збурюючих дій.*

*Выполнен синтез и проведены исследования динамических характеристик нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин при наличии внешних возмущающих воздействий. Разработана схема модели объекта управления с учётом внешних возмущающих воздействий, выполнен синтез нейрорегулятора и проведено моделирование системы. Показано, что предлагаемая нейросетевая система обладает одним из основных качеств систем - является нечувствительной к внешним возмущающим воздействиям.*

**Постановка проблеми.** Стабилизаторы вооружения (СВ) являются сложными системами, которые должны обеспечивать требуемые показатели качества, такие как точность стабилизации, неплавность наведения, требуемый диапазон регулирования скорости и др. При движении боевых машин по пересеченной местности возникают колебания корпуса, которые обуславливают возмущающие моменты, действующие на вооружение. Проблема синтеза эффективных систем управления вооружением легкобронированных машин и анализа их динамических характеристик является актуальной и важной задачей.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Для обеспечения высоких характеристик систем автоматического управления в настоящее время широкое применение получили методы адаптивного и робастного регулирования [1, 2]. Данные методы обеспечивают устойчивость систем с переменной динамикой, базируются на известной модели объекта и не требуют точного знания ее параметров. Методы адаптивного регулирования пытаются при этом подстроить регулятор на основе оценки параметров неизвестного объекта, в то время как робастные регуляторы остаются неизменными и обеспечивают устойчивость системы только в диапазоне допустимых изменений параметров объекта. Однако проблема синтеза адаптивных систем регулирования для неизвестных, нелинейных и переменных во времени объектов как с теоретической так и с практической точки зрения не решена окончательно. Область применения методов робастного регулирования ограничивается, главным образом, линейными системами и некоторыми специальными классами нелинейных систем.

В последнее время ведутся интенсивные исследования по применению искусственных нейронных сетей (ИНС) при построении систем управления нелинейными объектами [3, 4]. Замечательным свойством ИНС является их способность к обучению, что позволяет получить более простые решения для

сложных задач управления. Кроме того, наличие в структуре искусственных нейронных сетей нейронов с нелинейными функциями активации, позволяет использовать их для решения задач управления нелинейными объектами, в то время как традиционные методы не обеспечивают решения подобных задач.

**Цель статьи.** Целью работы является синтез и исследование динамических характеристик нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин при наличии внешних возмущающих воздействий, обусловленных колебаниями корпуса при движении машин по пересеченной местности.

**Изложение материала исследования, полученных научных результатов.** При движении легкобронированных машин по пересеченной местности возникают колебания корпуса, которые обуславливают возмущающие моменты, действующие на вооружение. Вопросы идентификации внешних возмущающих воздействий, вызванных случайными изменениями профиля дороги, рассматриваются во многих публикациях. В работах [5] приведены экспериментально полученные на реальных трассах спектральные плотности этих возмущений. Поскольку спектральные плотности этих воздействий известны, целесообразно формировать случайные изменения возмущающего момента  $M_c(t)$  от источника случайного сигнала типа белого шума  $V_{бш}$  интенсивностью  $\nu$  с помощью формирующего фильтра с передаточной функцией колебательного звена

$$M_c(p) = \frac{k_B \cdot \omega_B^2}{p^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_B \cdot p + \omega_B^2}, \quad (1)$$

где  $\omega_B$  - резонансная частота собственных колебаний;  $\xi$  - коэффициент демпфирования;  $k_B$  - коэффициент усиления формирующего фильтра.

Параметры формирующего фильтра выбираются таким образом, чтобы спектральная плотность выход-

ного сигнала совпадала с кривой экспериментальной спектральной плотности, полученной на основе статистической обработки реальных трасс.

Исполнительное устройство стабилизатора вооружения состоит из усилителя (преобразователя) мощности УМ, приводного двигателя ПД и кинематического устройства сопряжения КУС. Реальная 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. Исследования показали, что с достаточной для практических расчётов точностью механическая часть системы может быть представлена в виде двухмассовой системы. Тогда процессы в исполнительном устройстве описываются следующей системой уравнений:

$$U_d = k_{ум} \cdot S_{упр}; \quad I_я = \frac{1}{R_я} (U_d - L_я p I_я - c_ф \omega_d)$$

$$M_d = I_я \cdot c_ф; \quad \omega_d = \frac{1}{J_d \cdot p} \left( M_d - \frac{M_y}{N} - M_{тд} \right);$$

$$M_y = \Delta \phi_M \cdot c; \quad \Delta \phi_M = \frac{1}{p} \left( \frac{\omega_d}{N} - \phi_M \right);$$

$$\omega_M = \frac{1}{J_M \cdot p} \cdot (M_y - M_{тм} - M_c)$$

В уравнениях приняты следующие обозначения:  $S_{упр}$  - величина входного воздействия;  $k_{ум}$  - коэффициент передачи усилителя мощности УМ;  $U_d$  - напряжение, поступающее на якорную обмотку ПД;  $R_я$  - сопротивление якорной обмотки ПД;  $L_я$  - ин-

дуктивность якорной обмотки ПД;  $p$  - оператор дифференцирования;  $c_ф = k_d \Phi$ ;  $k_d$  - конструктивный коэффициент ПД;  $\Phi$  - магнитный поток ПД;  $J_d$  - момент инерции ротора ПД;  $N$  - передаточное число КУС;  $\omega_d$  - скорость вала ПД;  $M_{тд}$  - моменты сухого трения в подшипниках ПД;  $M_{тм}$  - момент трения КУС;  $J_M$  - момент инерции нагрузки СВ;  $M_c$  - возмущающий момент, обусловленный колебаниями корпуса носителя;  $\omega_M$  - скорость вращения нагрузки СВ;  $M_y$  - момент упругости КУС;  $c$  - коэффициент жёсткости элементов трансмиссии.

Для обеспечения высоких динамических характеристик системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированной машины разработана двухконтурная система подчинённого регулирования с нейронной компенсацией нелинейностей исполнительного устройства стабилизатора вооружения в контуре регулирования скорости. Регулятор положения может быть линейным. Структурная схема нейросетевой системы управления, разработанная в Simulink системы MATLAB показана на рис. 1. Схема включает блок контроллера NN Prediction Controller, блоки генерации эталонного ступенчатого сигнала со случайной амплитудой Random Reference, блоки построения графиков и блоки, относящиеся к объекту управления.

На рис. 2 показана схема модели объекта регулирования (Subsystem). Блоки MATLAB Fcn и MATLAB Fcn1 используются для задания моментов сухого трения на валу двигателя и механизма.

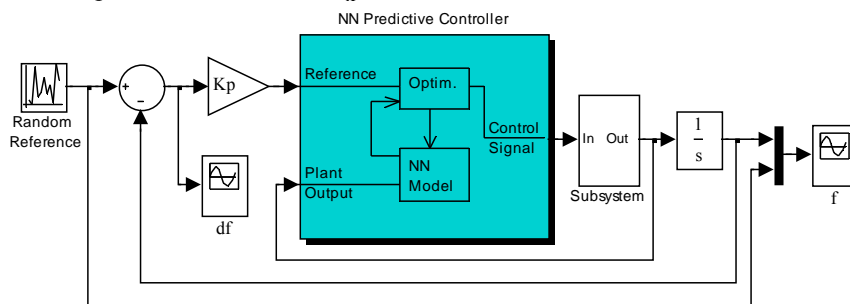


Рис. 1. Схема нейросетевой системы управления

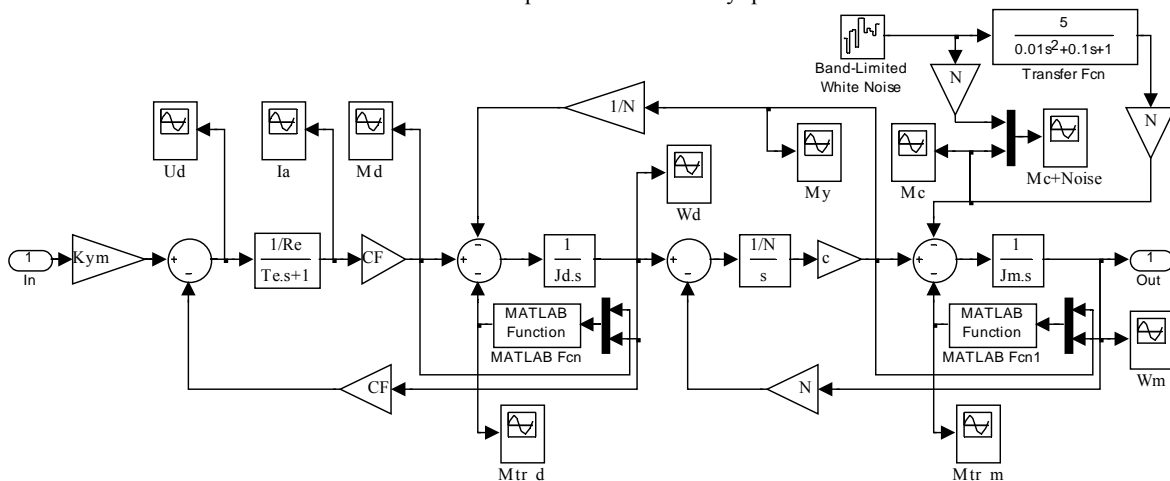


Рис. 2. Модель исполнительного устройства СВ с учётом возмущающего момента  $M_c(t)$

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

При построении регулятора использован принцип предиктивного метода регулирования на основе модели, который заключается в формировании такой последовательности сигналов воздействия на объект, которая минимизирует разность между заданием и предсказываемым моделью процесса выходным сигналом в будущем.

Регулятор представляет собой итерационный алгоритм оптимизации:

- минимизация осуществляется численными методами оптимизации;
- минимизируется функционал качества, описывающий желаемый критерий качества;
- для воздействия на объект используется только первый элемент оптимизированной последовательности;
- вся процедура оптимизации повторяется на каждом шаге дискретности.

В качестве функционала качества используется следующее выражение:

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} [\hat{y}(k+i) - r(k+i)]^2 + \sum_{i=0}^{N_u} \lambda_i [\Delta u(k+i-1)]^2,$$

где  $N_1$  - нижний горизонт предикции;  $N_2$  - верхний горизонт предикции;  $N_u$  - горизонт управления;  $\lambda_i$  - весовой коэффициент;  $\Delta$  - оператор разности  $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ ;  $r = [r(k+N_1) \dots r(k+N_2)]^T$  -

желаемая траектория;  $\hat{y} = [\hat{y}(k+N_1) \dots \hat{y}(k+N_2)]^T$  - вектор предсказания модели,  $u = [u(k+1) \dots u(k+N_u)]^T$  - вектор сигналов воздействия на объект,  $u(k+i) = \text{const}$  при  $i > N_u$ .

Синтез нейроконтроллера состоит из двух этапов: этап идентификации объекта управления и этап синтеза закона управления. На этапе идентификации разрабатывается модель управляемого объекта в виде нейронной сети, которая на этапе синтеза используется для синтеза регулятора.

Был выполнен синтез нейроконтроллера и проведены всесторонние исследования системы при различных входных воздействиях с учётом возмущающих моментов, действующие на вооружение.

При исследовании влияния внешних возмущающих воздействий, действующих на вооружение, параметры передаточной функции (1) приняты следующими: коэффициент демпфирования  $\xi = 0,5$ ; резонансная частота собственных колебаний  $\omega_B = 10$ ; интенсивность белого шума  $v = 0,001$ . Для исследования нечувствительности системы с нейрорегулятором к внешним возмущающим воздействиям расчёт переходных процессов производился для ряда значений коэффициента усиления формирующего фильтра  $k_B$ . На рис. 3 приведены графики переходных процессов переменных состояния системы с пропорциональным регулятором в контуре положения без нейрорегулятора в контуре скорости при  $k_B = 100$ .

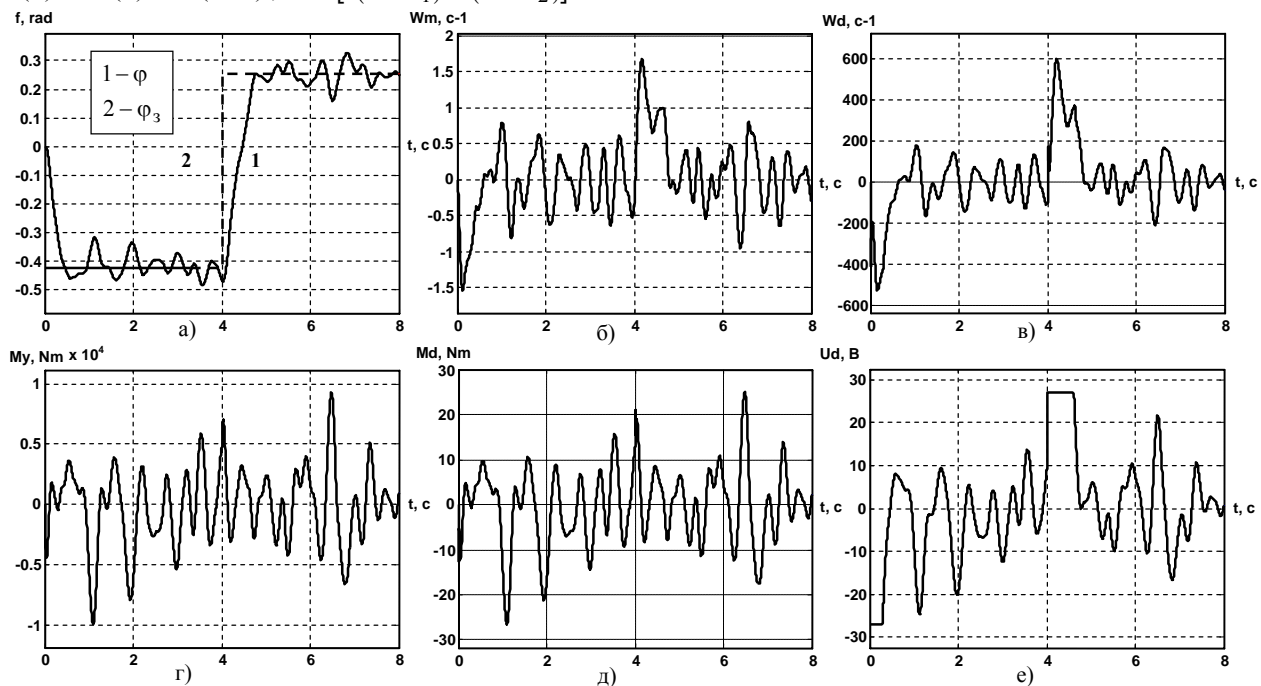


Рис. 3. Графики переходных процессов переменных состояния системы без нейрорегулятора:

- а) обработки заданного угла  $\varphi$ ; б) напряжения двигателя  $U_d$ ; в) ток двигателя  $I_d$ ;  
г) скорости механизма  $\omega_M$ ; д) скорости двигателя  $\omega_d$ ; е) момента упругости  $M_y$

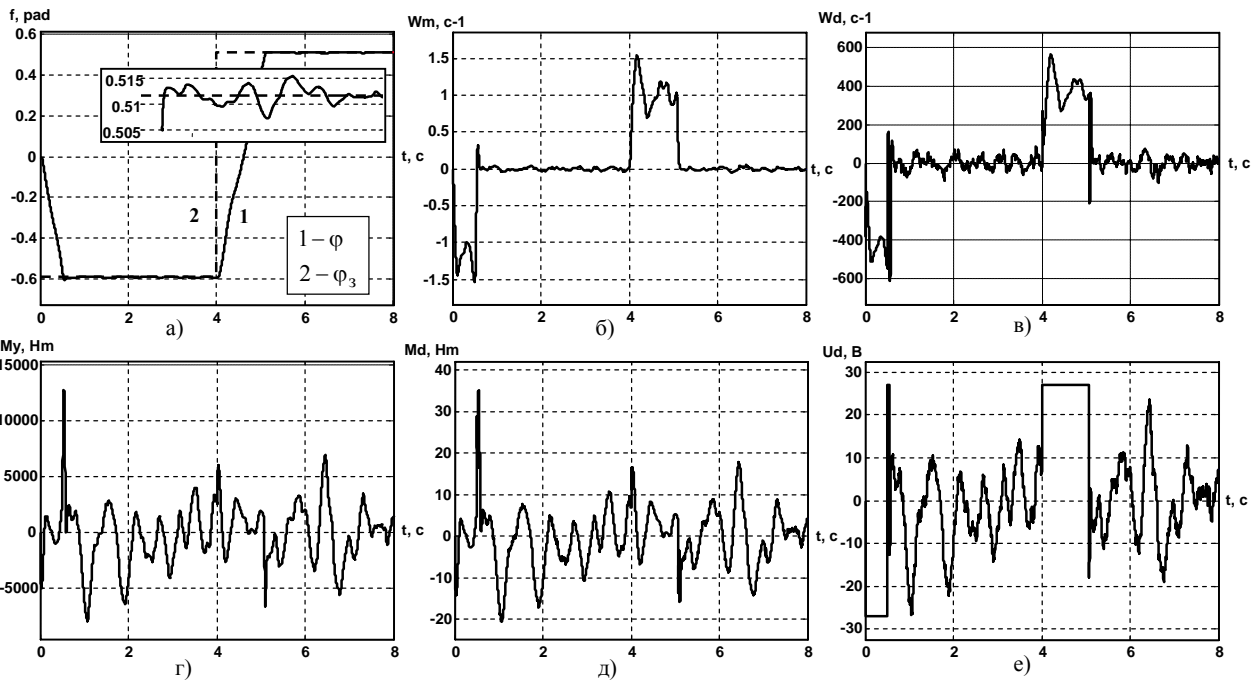


Рис. 4. Графики переходных процессов переменных состояния системы с нейрорегулятором:  
 а) обработки заданного угла  $\varphi$ ; б) напряжения двигателя  $U_d$ ; в) ток двигателя  $I_d$ ;  
 г) скорости механизма  $\omega_M$ ; д) – скорости двигателя  $\omega_d$ ; е) – момента упругости  $M_y$

На рис. 4 приведены переходные процессы системы с нейрорегулятором в контуре скорости без учёта момента сухого трения на валу механизма. Данные исследования носят теоретический характер, поскольку величина возмущающего момента  $M_c(t)$  выбрана такой величины, которая приводит в среднем к пятикратной перегрузке двигателя по току. Отклонения угла  $\varphi$  от установившегося значения в такой системе составляют в среднем  $\pm 0,09$  рад, что соответствует  $\Delta\varphi = \pm 5^\circ$ . Как видно из графиков, отклонения угла  $\varphi$  от установившегося значения в системе с нейрорегулятором составляют в среднем  $\pm 0,003$  рад, что соответствует  $\Delta\varphi = \pm 0,17^\circ$ , т.е. применение нейрорегулятора в контуре скорости позволило уменьшить  $\Delta\varphi$  в 30 раз.

**Выводы.** В статье выполнен синтез и проведены исследования динамических характеристик нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин при наличии внешних возмущающих воздействий, обусловленных колебаниями корпуса при движении машин по пересечённой местности. Разработана схема модели объекта управления, позволяющая проводить исследования с учётом внешних возмущающих воздействий. Случайные изменения возмущающего момента формируются от источника случайного сигнала типа белого шума с заданной интенсивностью с помощью формирующего фильтра с передаточной функцией колебательного звена. Выполнено моделирование системы без нейрорегулятора и системы с нейрорегулятором при различных значениях интенсивности белого шума. Предлагаемая нейросетевая система обладает одним из основных качеств систем - является нечувствительной к внешним возмущающим воздействиям. Применение

нейрорегулятора позволило уменьшить ошибку регулирования в 30 раз.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александров Е.Е., Борисюк М.Д., Кузнецов Б.И. Параметрическая оптимизация многоканальных систем автоматического управления. - Харьков: Основа, 1995. - 272 с.
- [2] Цифровое робастное управление дискретно-континуальным объектом. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А. // Сб. научн. трудов Днепродзержинского гос. технич. университета (технические науки). Тематический выпуск "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". - Днепродзержинск, 2007. - С. 373-374.
- [3] Клепиков В.Б., Махотило К.В., Сергеев С.А. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами// Электротехника. - 1999. - №5. - С. 2-6.
- [4] Нейро-фаззи регулятор для электроприводов с проскальзыванием: Клепиков В.Б., Клепиков А.В., Глебов О.Ю., Моисеенко П.Л., Полянская И.С. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ"ХПІ". - 2002. - №9, Т.4- С. 47-52.
- [5] Александров С.С., Козлов Е.П., Кузнецов Б.И. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. - Харків: НТУ "ХПІ", 2002. - 490 с.

Поступила 16.03.2008