

# Математичні моделі та методи

УДК 681.5.01.23

DOI: 10.30748/soi.2017.147.12

Т.Ю. Василець<sup>1</sup>, О.О. Варфоломійєв<sup>2</sup>, Р.В. Тютюн<sup>1</sup>, Ю.О. Алфьоров<sup>1</sup>, А.О. Власов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

<sup>2</sup> Технологічний інститут, Нью Джерсі, США

## РОЗРОБКА НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТРЬОХМАСОВОЮ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ

*Розроблена математична модель і проведено моделювання трьохмасової електромеханічної системи на ЕОМ. Для покращення показників якості функціонування трьохмасової електромеханічної системи запропоновано використання нейромережових технологій. Розроблена структурна схема трьохмасової системи з нейромережовим регулятором. Проведено моделювання нейромережової системи з нейрорегулятором з передбаченням NN Predictive Controller і виконаний аналіз динамічних характеристик системи.*

**Ключові слова:** нейромережові технології, нейромережева система управління, трьохмасова електромеханічна система, нейрорегулятор з передбаченням NN Predictive Controller.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Вимоги, що підвищуються, до показників якості функціонування систем управління примушують шукати нові методи синтезу систем. Класичні методи регулювання не в змозі забезпечити якісне регулювання складними динамічними об'єктами. Найбільш ефективним напрямком є розробка систем управління на основі адаптивного підходу у поєднанні з методами теорії штучних нейронних мереж.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** В [1] розглянуті питання теорії і методи синтезу систем управління нелінійними динамічними об'єктами, на основі яких навчають багатозарових мереж. Значну увагу приділено фундаментальним властивостям нелінійних багатозарових нейромереж і алгоритмам їх навчання в реальному часі.

В [2] наведено базові функціональні структури нейромережових динамічних систем управління та ідентифікації стану. Розглянуто приклади, що ілюструють використання багатозарових нейронних мереж як нелінійних регуляторів і приклади комп'ютерного моделювання нейромережових систем управління багатозв'язними нелінійними об'єктами із застосуванням пакету MATLAB.

У численних публікаціях, наприклад [3; 4], показана ефективність використання нейромережових структур для регулювання координат електромеханічних систем з від'ємним в'язким тертям, наведена методика синтезу сучасних регуляторів електромеханічних систем на основі методів фаззи-логіки, нейронних мереж і генетичних алгоритмів. Аналіз останніх досліджень і публікацій з синтезу нейромережових систем управління нелінійними динаміч-

ними об'єктами показує, що даний напрямок є важливим і актуальним.

**Мета статті.** Метою роботи є синтез і дослідження показників якості функціонування нейромережової системи управління трьохмасовою електромеханічною системою з нейрорегулятором з передбаченням NN Predictive Controller.

### 1. Математична модель трьохмасової системи управління

В якості прикладу побудови нейромережової системи розглянемо електромеханічну систему управління механізмом підйому промислової установки. Розрахунок систем регулювання зазвичай виконуються в припущенні нескінченної жорсткості всіх елементів механічної частини системи, включаючи підйомний канат, тобто для одномасової системи. У реальних системах всі зв'язки між елементами схеми мають кінцеву жорсткість, а підйомний канат механізму підйому є пружним елементом з розподіленими параметрами.

Розглядаючи канат як пружний елемент з розподіленою масою, можна не враховувати ряд другорядних чинників. З достатньою точністю, наприклад, канат можна вважати консервативною ланкою, оскільки чинники демпфування за рахунок двигуна і тертя підйомного пристрою об направляючі на порядок перевершують сили внутрішнього тертя в канаті. Неістотна також нерівномірність розподілу маси по довжині каната, обумовлена деформацією від власної ваги.

У прийнятій постановці завдання основне значення мають подовжні коливання каната, поперечні ж і крутильні – другорядні. Оскільки найбільший вплив на процеси в системі надають навантажена

гілка каната при розташуванні підйимального пристрою в крайньому нижньому положенні, а тривалість перехідного режиму при розгоні незначна, та зміна довжини від ваги каната за рахунок навивки його на барабан дуже мала по відношенню до загальної довжини каната. Тому можна прийняти, що довжина пружного елемента, а власне, і жорсткість його в інтервалі часу розгону незмінна.

Прийнявши вказані допущення, розрахункову схему механічної частини підйомної установки можна представити двома приведеними зосередженими масами  $m_1$  і  $m_2$ , сполученими між собою ідеально пружним стержнем. Методика розрахунку вказаного завдання для практичного застосування достатньо складна. В цілях спрощення можна розглядати механічну частину підйомної установки як трьохмасову систему з представленням підйомного каната зосередженою масою  $m_k$ , пов'язаною з двома іншими масами еквівалентними невагомими пружними зв'язками, а також як двохмасову систему, в якій канат приведений до зосереджених мас.

У інженерних розрахунках розглядають підйомний канат, що володіє розподіленою масою, пов'язаною з масами  $m_1$  і  $m_2$  еквівалентними невагомими пружними зв'язками з жорсткістю  $c_1$  і  $c_2$ , тобто розглядають трьохмасову систему. В цілях спрощення досліджень трьохмасова система може бути замінена двомасовою з приведеними масами  $m'_1 = m_1 + m_k / 2$  і  $m'_2 = m_2 + m_k / 2$ , сполученими невагомими канатом з жорсткістю  $c_{12}$ .

Динамічні процеси в механічній частині підйомної установки, представленою трьохмасовою системою, описуються рівняннями

$$\begin{cases} J_{д\Sigma} \frac{d\omega_d}{dt} = k\Phi I_d - M_{\Sigma 1}; \\ J_k \frac{d\omega_k}{dt} = M_{\Sigma 1} - M_{\Sigma 2}; \\ J_m \frac{d\omega_m}{dt} = M_{\Sigma 2} - M_{ст}; \\ \frac{dM_{пр1}}{dt} = c_1 (\omega_d - \omega_k); \\ \frac{dM_{пр2}}{dt} = c_2 (\omega_k - \omega_m), \end{cases} \quad (1)$$

де  $J_{д\Sigma}$ ,  $J_k$ ,  $J_m$  – сумарний момент інерції двигуна і жорстко пов'язаних з ним елементів системи, приведені моменти інерції канату і механізму відповідно;  $\omega_d$ ,  $\omega_k$ ,  $\omega_m$  – кутові швидкості двигуна, каната і механізму;  $k$ ,  $\Phi$ ,  $I_d$  – конструктивний коефіцієнт, магнітний потік і струм двигуна;  $M_{ст}$  – момент статичного навантаження;  $M_{\Sigma 1}$ ,  $M_{\Sigma 2}$  – сумарні моменти, що передаються пружними передачами

$$M_{\Sigma 1} = M_{пр1} + M_{вт1}, \quad M_{\Sigma 2} = M_{пр2} + M_{вт2}; \quad (2)$$

$M_{пр1}$ ,  $M_{пр2}$  – моменти пружної взаємодії між масами трьохмасової системи;  $M_{вт1}$ ,  $M_{вт2}$  – моменти в'язкого тертя

$$M_{вт1} = \beta_1 (\omega_d - \omega_k); \quad M_{вт2} = \beta_2 (\omega_k - \omega_m), \quad (3)$$

$\beta_1$ ,  $\beta_2$  – коефіцієнти внутрішнього в'язкого тертя ділянок каната між масами.

Для двомасової системи рівняння мають вид:

$$\begin{cases} J'_m \frac{d\omega_m}{dt} = M_{\Sigma} - M_{ст}; \\ \frac{dM_{пр}}{dt} = c_{12} (\omega_d - \omega_m); \\ J'_{д\Sigma} \frac{d\omega_d}{dt} = k\Phi_n I_d - M_{\Sigma}, \end{cases}$$

де  $M_{\Sigma}$  – сумарний момент, що передається пружною передачею, який рівний сумі пружного моменту  $M_{пр}$  і моменту в'язкого тертя  $M_{вт} = \beta (\omega_d - \omega_m)$ :

$$M_{\Sigma} = M_{пр} + \beta (\omega_d - \omega_m);$$

$\beta$  – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя каната між масами.

$$J'_{д\Sigma} = J_{д\Sigma} + \frac{J_k}{2}; \quad J'_m = J_m + \frac{J_k}{2}; \quad c_{12} = c_k \rho^2.$$

Розглянемо трьохмасову систему регулювання швидкості електроприводу підйимальної установки. У якості привідного двигуна застосовано двигун постійного струму незалежного збудження. Якірна обмотка живиться від генератора постійного струму. Для живлення обмотки збудження генератора використовується тиристорний збудник. Система управління електроприводом побудована за принципом підлеглого регулювання і містить три контури: контур регулювання напруги, струму і контур регулювання швидкості. У якості послідовних коректуючих пристроїв в кожний контур включені ПІ-регулятори. Замкнені контури напруги і струму настроєні на модульний оптимум, а контур швидкості – на симетричний оптимум.

Представимо рівняння (1) з урахуванням (2) і (3) у формі Коші

$$\begin{cases} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_m} M_{пр2} + \frac{\beta_2}{J_m} \omega_k - \frac{\beta_2}{J_m} \omega_m - \frac{1}{J_m} M_{ст}; \\ \frac{dM_{пр1}}{dt} = c_1 \omega_d - c_1 \omega_k; \\ \frac{d\omega_k}{dt} = \frac{1}{J_k} M_{пр1} - \frac{\beta_1}{J_k} \omega_d + \frac{\beta_1}{J_k} \omega_k - \frac{1}{J_k} M_{пр2} - \frac{\beta_2}{J_k} \omega_k + \frac{\beta_2}{J_k} \omega_m; \\ \frac{dM_{пр2}}{dt} = c_2 \omega_k - c_2 \omega_m; \\ \frac{d\omega_d}{dt} = \frac{k\Phi_n I_d}{J_{д\Sigma}} - \frac{1}{J_{д\Sigma}} M_{пр1} - \frac{\beta_1}{J_{д\Sigma}} \omega_d + \frac{\beta_1}{J_{д\Sigma}} \omega_k. \end{cases} \quad (4)$$

Запишемо рівняння стану системи регулювання без урахування пружності елементів механічної частини, а потім, доповнивши їх рівняннями трьохмасової системи, отримаємо систему диференціальних рівнянь стану системи управління з урахуванням пружного зв'язку.

Рівняння стану одно масової системи:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\omega_d}{dt} &= \frac{k\Phi_H}{J_{д\Sigma}} I_d - \frac{1}{J_{д\Sigma}} M_{ст}; \\ \frac{dI_d}{dt} &= -\frac{k\Phi_H}{R_\Sigma T_e} \omega_d - \frac{1}{T_e} I_d + \frac{1}{R_\Sigma T_e} U_\Gamma; \\ \frac{dU_\Gamma}{dt} &= -\frac{1}{T_\Gamma} U_\Gamma + \frac{k_\Gamma}{T_\Gamma} U_{тп}; \\ \frac{dU_{тп}}{dt} &= -\frac{k_{ш}k_{пш}k_{пт}k_{пн}k_{тп}}{T_{\muн}} \omega_d - \frac{k_\Gamma k_{пт}k_{пн}k_{тп}}{T_{\muн}} I_d - \\ &\quad - \frac{k_H k_{пн}k_{тп}}{T_{\muн}} U_\Gamma - \frac{1}{T_{\muн}} U_{тп} - \frac{k_{тп}}{T_{\muн}} U_{рн} - \\ &\quad - \frac{k_{пн}k_{тп}}{T_{\muн}} U_{пт} + \frac{k_{пн}k_{пт}k_{тп}}{T_{\muн}} U_{рш} + \frac{k_{пш}k_{пт}k_{пн}k_{тп}}{T_{\muн}} U_3; \\ \frac{dU_{рн}}{dt} &= -k_{ш}k_{пш}k_{пт}k_{ін} \omega_d - k_\Gamma k_{пт}k_{ін} I_d - k_H k_{ін} U_\Gamma + \\ &\quad + k_{ін} U_{пт} + k_{пт}k_{ін} U_{рш} + k_{пш}k_{пт}k_{ін} U_3; \\ \frac{dU_{пт}}{dt} &= -k_{ш}k_{пш}k_{ін} \omega_d - k_{ін}k_\Gamma I_d + k_{ін} U_{рш} + k_{пш}k_{ін} U_3; \\ \frac{dU_{рш}}{dt} &= -k_{ш}k_{ін} \omega_d + k_{ін} U_3. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

При записі системи (5) прийняті наступні позначення:  $U_\Gamma$ ,  $U_{тп}$  – напруга генератора і тиристорного перетворювача;  $U_{рн}$ ,  $U_{пт}$ ,  $U_{рш}$  – напруги на виході інтегральної частини ПІ регуляторів напруги, струму і швидкості відповідно;  $U_3$  – напруга задання;  $T_e$  – електромагнітна постійна часу електроприводу;  $R_\Sigma$  – сумарний активний опір якірного кола;  $k_d$ ,  $k_\Gamma$ ,  $k_{тп}$  – коефіцієнти посилення двигуна, генератора і тиристорного перетворювача;  $k_{ш}$ ,  $k_\Gamma$ ,  $k_H$  – коефіцієнт посилення зворотного зв'язку за швидкістю, струмом і напругою;  $T_{\muш}$ ,  $T_{\muт}$ ,  $T_{\muн}$  – малі некомпенсуємі постійні часу контуру швидкості і струму і напруги, постійними часу датчиків напруги  $T_{дн}$ , струму  $T_{дт}$  і швидкості  $T_{дш}$  нехтуємо;  $k_{пш}$ ,  $k_{ін}$ ,  $k_{пт}$ ,  $k_{іт}$ ,  $k_{пн}$ ,  $k_{ін}$  – коефіцієнти підсилення пропорційної і інтегральної частин регулятора швидкості, струму і напруги відповідно; значення указаних параметрів можуть бути отримані з виразів передатних функцій регуляторів:

$$W_{рш}(p) = \frac{T_M k_\Gamma}{8T_{\muш}^2 k_{ш} k_d R_\Sigma} \frac{1 + 4T_{\muш} p}{p} = \frac{4T_{\muш} T_M k_\Gamma}{8T_{\muш}^2 k_{ш} k_d R_\Sigma} + \frac{T_M k_\Gamma}{8T_{\muш}^2 k_{ш} k_d R_\Sigma} \frac{1}{p} = k_{пш} + \frac{k_{ін}}{p},$$

$$k_{пш} = \frac{4T_{\muш} T_M k_\Gamma}{8T_{\muш}^2 k_{ш} k_d R_\Sigma}, \quad k_{ін} = \frac{T_M k_\Gamma}{8T_{\muш}^2 k_{ш} k_d R_\Sigma}.$$

$$W_{пт}(p) = \frac{k_H \cdot R_\Sigma \cdot T_e p + 1}{2T_{\muт} k_\Gamma p} =$$

$$= \frac{k_H R_\Sigma T_e}{2T_{\muт} k_\Gamma} + \frac{k_H R_\Sigma}{2T_{\muт} k_\Gamma} \frac{1}{p} = k_{пт} + \frac{k_{іт}}{p},$$

$$k_{пт} = \frac{k_H R_\Sigma T_e}{2T_{\muт} k_\Gamma}, \quad k_{іт} = \frac{k_H R_\Sigma}{2T_{\muт} k_\Gamma}.$$

$$W_{рн}(p) = \frac{1}{2T_{\muн} k_\Gamma k_{тп} k_H} \frac{T_\Gamma p + 1}{p} = \frac{T_\Gamma}{2T_{\muн} k_\Gamma k_{тп} k_H} + \frac{1}{2T_{\muн} k_\Gamma k_{тп} k_H} \frac{1}{p} = k_{пн} + \frac{k_{ін}}{p},$$

$$k_{пн} = \frac{T_\Gamma}{2T_{\muн} k_\Gamma k_{тп} k_H}, \quad k_{ін} = \frac{1}{2T_{\muн} k_\Gamma k_{тп} k_H}.$$

Об'єднаємо системи (4) і (5), одержимо наступну систему диференціальних рівнянь стану трьохмасової системи.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\omega_M}{dt} &= \frac{1}{J_M} M_{пп2} + \frac{\beta_2}{J_M} \omega_K - \frac{\beta_2}{J_M} \omega_M - \frac{1}{J_M} M_{ст}; \\ \frac{dM_{пп1}}{dt} &= c_1 \omega_d - c_1 \omega_K; \\ \frac{d\omega_K}{dt} &= \frac{1}{J_K} M_{пп1} - \frac{\beta_1}{J_K} \omega_d + \frac{\beta_1}{J_K} \omega_K - \frac{1}{J_K} M_{пп2} - \\ &\quad - \frac{\beta_2}{J_K} \omega_K + \frac{\beta_2}{J_K} \omega_M; \\ \frac{dM_{пп2}}{dt} &= c_2 \omega_K - c_2 \omega_M; \\ \frac{d\omega_d}{dt} &= \frac{k\Phi_H}{J_{д\Sigma}} I_d - \frac{1}{J_{д\Sigma}} M_{пп1} - \frac{\beta_1}{J_{д\Sigma}} \omega_d + \frac{\beta_1}{J_{д\Sigma}} \omega_K; \\ \frac{dI_d}{dt} &= -\frac{k\Phi_H}{R_\Sigma T_e} \omega_d - \frac{1}{T_e} I_d + \frac{1}{R_\Sigma T_e} U_\Gamma; \\ \frac{dU_\Gamma}{dt} &= -\frac{1}{T_\Gamma} U_\Gamma + \frac{k_\Gamma}{T_\Gamma} U_{тп}; \\ \frac{dU_{тп}}{dt} &= -\frac{k_{ш}k_{пш}k_{пт}k_{пн}k_{тп}}{T_{\muн}} \omega_d - \frac{k_\Gamma k_{пт}k_{пн}k_{тп}}{T_{\muн}} I_d - \\ &\quad - \frac{k_H k_{пн}k_{тп}}{T_{\muн}} U_\Gamma - \frac{1}{T_{\muн}} U_{тп} - \frac{k_{тп}}{T_{\muн}} U_{рн} - \\ &\quad - \frac{k_{пн}k_{тп}}{T_{\muн}} U_{пт} + \frac{k_{пн}k_{пт}k_{тп}}{T_{\muн}} U_{рш} + \frac{k_{пш}k_{пт}k_{пн}k_{тп}}{T_{\muн}} U_3; \\ \frac{dU_{рн}}{dt} &= -k_{ш}k_{пш}k_{пт}k_{ін} \omega_d - k_\Gamma k_{пт}k_{ін} I_d - k_H k_{ін} U_\Gamma + \\ &\quad + k_{ін} U_{пт} + k_{пт}k_{ін} U_{рш} + k_{пш}k_{пт}k_{ін} U_3; \\ \frac{dU_{пт}}{dt} &= -k_{ш}k_{пш}k_{ін} \omega_d - k_{ін}k_\Gamma I_d + k_{ін} U_{рш} + k_{пш}k_{ін} U_3; \\ \frac{dU_{рш}}{dt} &= -k_{ш}k_{ін} \omega_d + k_{ін} U_3. \end{aligned} \right.$$

Алгоритмічна схема трьохмасової системи показана на рис. 1.



### 3. Структурна схема нейромережевої системи

Для забезпечення задовільних показників якості функціонування трьохмасової електромеханічної системи застосовуємо нейромережевий підхід до

побудови системи. Структурна схема нейромережевої системи показана на рис. 4. На вхід нейрорегулятора подається сигнал завдання і сигнал зворотного зв'язку за швидкість механізму. Вихідний сигнал нейрорегулятора подається на вхід трьохмасової електромеханічної системи.

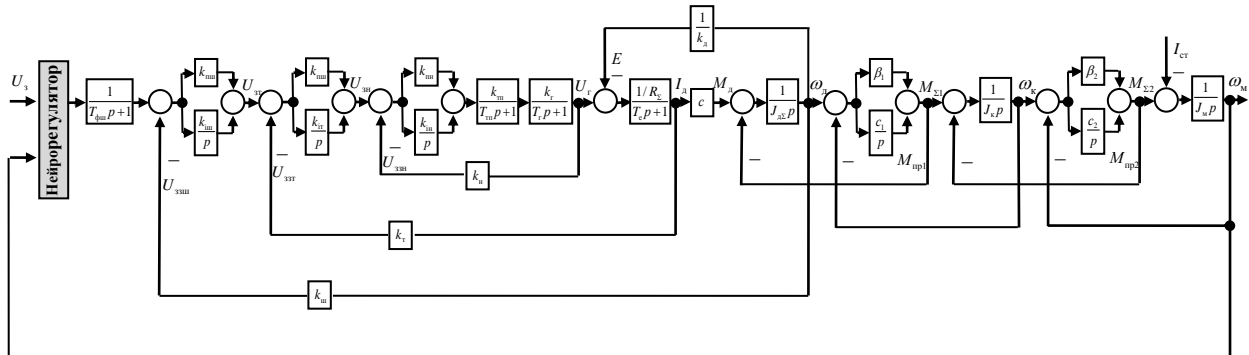


Рис. 4. Структурна схема нейромережевої системи управління

В якості нейрорегулятора вибрано регулятор з передбаченням NN Predictive Controller; реалізований в пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB.

Застосування нейронних мереж для вирішення завдань управління дозволяє виділити 2 етапи проектування: етап ідентифікації керованого об'єкту; етап синтезу закону управління. На етапі ідентифікації розробляється модель керованого об'єкту у вигляді нейронної мережі, яка на етапі синтезу використовується для синтезу регулятора.

При управлінні з прогнозом моделі керованого об'єкту використовується для того, щоб передбачити його майбутню поведінку, а алгоритм оптимізації застосовується для розрахунку такого управління, яке мінімізує різницю між бажаними і дійсними змінами виходу моделі.

Схема підсистеми ідентифікації показана на рис. 5. Вона включає модель об'єкту управління у вигляді нейронної мережі, яка повинна бути навчена в автономному режимі так, щоб мінімізувати помилку між реакціями об'єкту і моделі  $e = y - y_n$  на послідовність пробних сигналів  $u$ .



Рис. 5. Схема підсистеми ідентифікації

Нейронна мережа регулятора об'єкту управління представлена на рис. 6.

Вона має 2 шари нейронів і використовує лінії затримки (ЛЗ), щоб запам'ятати попередні значення входів і виходів об'єкту і передбачити майбутнє значення виходу.

Настройка параметрів цієї мережі виконується автономно методом групового навчання, використовуючи дані, отримані при випробуваннях реального об'єкту. Для навчання мережі може бути використаний будь-якому з навчальних алгоритмів для нейронних мереж. У даній роботі використаний алгоритм Левенберга-Марквардта. У ППП Neural Network Toolbox даний алгоритм реалізований у вигляді М-функції trainlm.

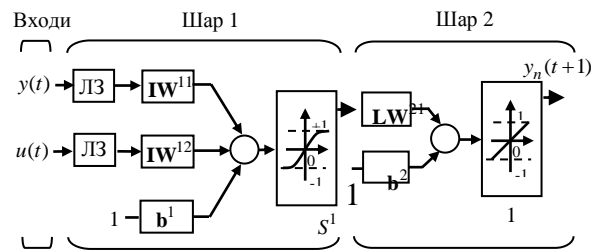


Рис. 6. Нейронна мережа регулятора

Управління з прогнозом використовує принцип горизонту, що віддаляється, коли нейромережева модель керованого об'єкту передбачає реакцію об'єкту на певному інтервалі часу в майбутньому. Прогноз використовується програмою чисельної оптимізації для того, щоб обчислити сигнал, що управляє, який мінімізує критерій якості

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

де константи  $N_1$ ,  $N_2$  і  $N_4$  задають межі, усередині яких обчислюються помилки стеження і потужність сигналу, що управляє. Змінна  $u'$  описує пробний сигнал, що управляє;  $y_T$  – очікувана, а  $y_m$  – дійсна реакція моделі даної системи. Величина  $\rho$  визначає внесок, який вносить потужність управління в критерій якості.

Структурна схема на рис. 7 ілюструє процес управління з прогнозом. Регулятор складається з нейромережевої моделі керованого об'єкта і блоку оптимізації. Блок оптимізації визначає значення  $u'$ , які мінімізують критерій якості управління, а відповідний управляючий сигнал  $u$  управляє процесом.

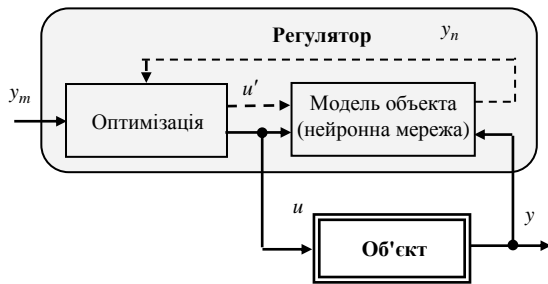


Рис. 7. Структурна схема системи з регулятором, що використовує принцип прогнозу

### 3. Моделювання нейромережевої системи і аналіз отриманих результатів

Для визначення показників якості функціонування нейромережевої системи управління проведено моделювання системи при ступінчатому вхідному сигналі з випадковою амплітудою, що знаходиться в межах від +24 В до -24 В. Графіки перехідних процесів перших шести змінних стану нейромережевої системи по задаючій дії приведені на рис. 8.

Як видно з графіків, перехідні процеси змінних стану трьохмасової електромеханічної системи з нейрорегулятором NN Predictive Controller мають задовільний характер.

### Висновки

У статті вирішена задача синтезу нейромережевої системи управління багатомасовою електромеханічною системою, що має високі показники якості функціонування.

Розроблена математична модель трьохмасової системи управління електроприводом механізму підйому промислової установки, проведено моделювання системи на ЕОМ. Встановлено, що перехідні процеси змінних стану системи мають характер слабозатухаючих коливань.

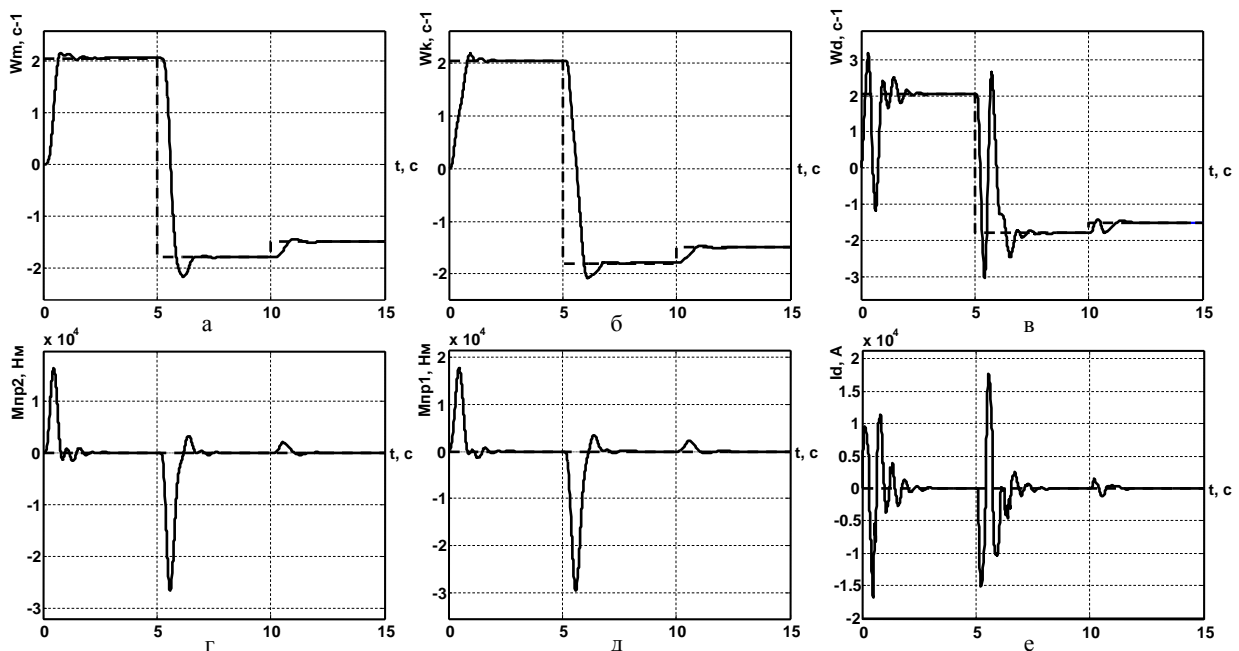


Рис. 8. Графіки перехідних процесів змінних стану нейромережевої системи:

а – швидкість механізму  $\omega_M$ ; б – швидкість каната  $\omega_K$ ; в – швидкість двигуна  $\omega_D$ ;

г – другий момент пружності  $M_{pp2}$ ; д – перший момент пружності  $M_{pp1}$ ; е – струм двигуна  $I_D$

Для забезпечення вимог, що пред'являються до сучасних систем управління, запропоновано застосування нейромережевих технологій. Розроблено структурну схему нейромережевої системи. Виконано

синтез нейрорегулятора з передбаченням NN Predictive Controller, реалізованим в системі MATLAB. Шляхом моделювання системи встановлено

лено, що нейромережева система має високі динамічні характеристики.

### Список літератури

1. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – М.: ИПРЖР, 2003. – 480 с.
2. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі: навчальний посібник / О.Г. Руденко, Е.В. Бодянский. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404 с.
3. Клепиков В.Б. К созданию интеллектуального электропривода для управления машинами с нелинейным

трением / В.Б. Клепиков, Ф. Палис, А.В. Клепиков // Вестник НТУ «ХПИ». – 2001. – №6. – С. 415-417.

4. Клепиков В.Б. Гибридные нейронные сети в управлении электромеханическими системами / В.Б. Клепиков, Ф. Палис, Ю.А. Цепковский // Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – №10. – С. 29-33.

Надійшла до редколегії 16.01.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Д. Сахацький, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків.

### РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРЁХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Т.Е. Василец, А.А. Варфоломеев, Р.В. Тютюн, Ю.А. Алфёров, А.А. Власов

*Разработана математическая модель и проведено моделирование трёхмассовой электромеханической системы на ЭВМ. Для улучшения показателей качества функционирования трёхмассовой электромеханической системы предложено использование нейросетевых технологий. Разработана структурная схема трёхмассовой системы с нейросетевым регулятором. Проведено моделирование нейросетевой системы с нейрорегулятором с предсказанием NN Predictive Controller и выполнен анализ динамических характеристик системы.*

**Ключевые слова:** нейросетевые технологии, нейросетевая система управления, трёхмассовая электромеханическая система, нейрорегулятор с предвидением NN Predictive Controller.

### SYNTHESIS AND STUDY OF THE NEURAL NETWORK MODEL REFERENCE CONTROLLER FOR THE AIMING AND STABILIZING SYSTEM OF THE LIGHT-ARMORED MACHINE

T.E. Vasilets, A.A. Varfolomiyev, R.V. Tyutuyn, Y.A. Alfyorov, A.A. Vlasov

*Mathematical model of the three-mass electromechanical system is derived and computer simulations is performed. It is proposed to use the neuro technologies to improve the quality of the three-mass electromechanical system performance. Designed a block diagram of the three-mass system with the neuro controller. Further modeling of the neural system with NN Predictive Controller is performed and analysis of the system dynamic performance is conducted.*

**Keywords:** neural network technology, neural network control system, three-mass electromechanical system, with foresight neuroregulators NN Predictive Controller.