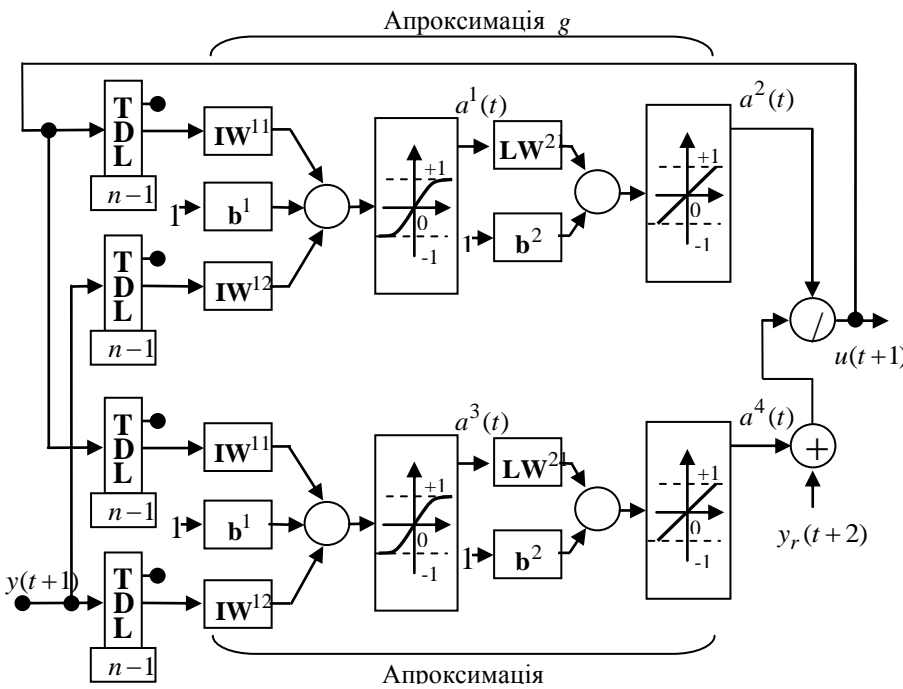


Нейрорегулятор NARMA-L2 Controller обчислює поточне управління динамічним об'єктом наступним чином

$$u(k+1) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]}{g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]}, \quad (1)$$

де  $y(k)$  - вихід моделі об'єкта управління;  $d$  - число тактів передбачення;  $u(k)$  - вхід моделі,  $y_r(k)$  - бажана траєкторія,  $m, n$  - кількість елементів запізнення на вході та виході моделі. На рис.1



та виході моделі. На рис.1 показано структуру відповідного регулятора із застосуванням нейронних мереж. Тут слід звернути увагу на ділянки мережі, які виконують апроксимацію нелінійних операторів  $g$  і  $f$  як виходів  $\hat{g} = a^2(t)$  і  $\hat{f} = a^4(t)$ . Входами регулятора є сигнали  $y(t+1)$  і  $u(t+1)$  (останній реалізований у вигляді зворотного зв'язку), а також еталонний сигнал  $y_r(t+2)$ . Блоки затримки TDL здійснюють запам'ятовування відповідних

Рис. 1. Структура NARMA-L2 регулятора з застосуванням нейронних мереж

последовностей входу та виходу, а потім використовуються двохарові нейронні мережі, які формують оцінки нелінійних операторів та обчислюють сигнал управління у формі (1).

Загальна структурна схема системи з регулятором NARMA - L2 показано на рис.2. На схемі явно виділено еталонна модель, яка задає бажану траєкторію для виходу керованого об'єкта.

При синтезі нейрорегулятора NARMA-L2 Controller за допомогою пакету прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB спочатку формується статична мережа netn [1]. Як приклад розглянемо мережу, яка використовує 1 вектор входу із 6 елементами. На перші

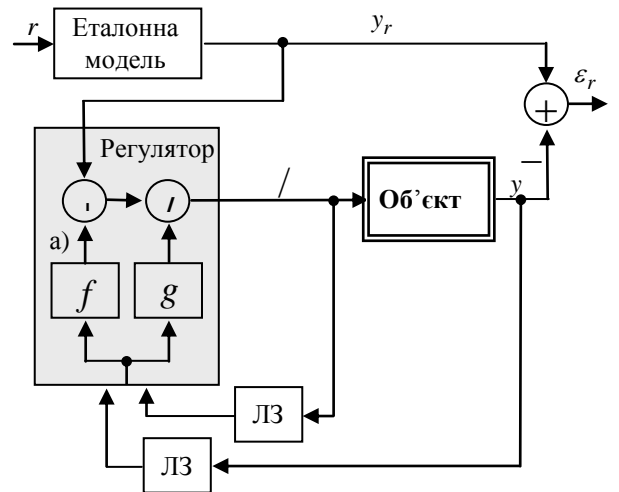


Рис.2. Структурна схема системи з регулятором NARMA-L2

$N_j$  входи подаються вихідні сигнали системи  $y(k), y(k-1), \dots, y(k-N_j+1)$  (наприклад  $y(k), y(k-1), y(k-2), y(k-3)$ ), на наступні  $(N_i-1)$  входи подаються вхідні сигнали системи  $u(k-1), \dots, u(k-N_i+1)$  (наприклад  $u(k-1), u(k-2)$ ). Мережа має 6 шарів з 8 нейронами в першому та третьому шарах та 1 нейроном у другому, четвертому, п'ятому та шостому шарах. Функції активації, що використовуються: гіперболічного тангенсу ( $\text{tansig}$ ) - в 1 і 3 шарі, лінійна ( $\text{purelin}$ ) - в 2, 4, 5 і 6 шарах. Після створення мережі  $\text{netn}$  відбувається її перетворення за допомогою наступних операторів:

```
netn.numInputs=2; netn.numInputs=3; netn.inputs{2}.size=netn.inputs{1}.size;
netn.inputs{2}.range=netn.inputs{1}.range; netn.inputs{3}.range=minmax(ptr{3,1});
netn.biasConnect(5:6)=0; netn.layers{5}.netInputFcn='netprod'; netn.inputConnect(3,2)=1;
netn.inputConnect(5,3)=1; netn.layerConnect(6,2)=1; netn.layerConnect(3,2)=0.
```

В результаті формується мережа, показана на рис.3. Мережа використовує 3 вектори входу з 6 елементами у першому та другому векторах та 1 елементом у третьому векторі. Другий вектор входу формується так само, як і перший описаний вище. На третій вхід подаються сигнали  $u(k)$ . Замість лінійної функції активації ( $\text{purelin}$ ) у п'ятому шарі встановлюється функція активації  $\text{netprod}$ , що виконує функцію поелементного добутку зважених входів.

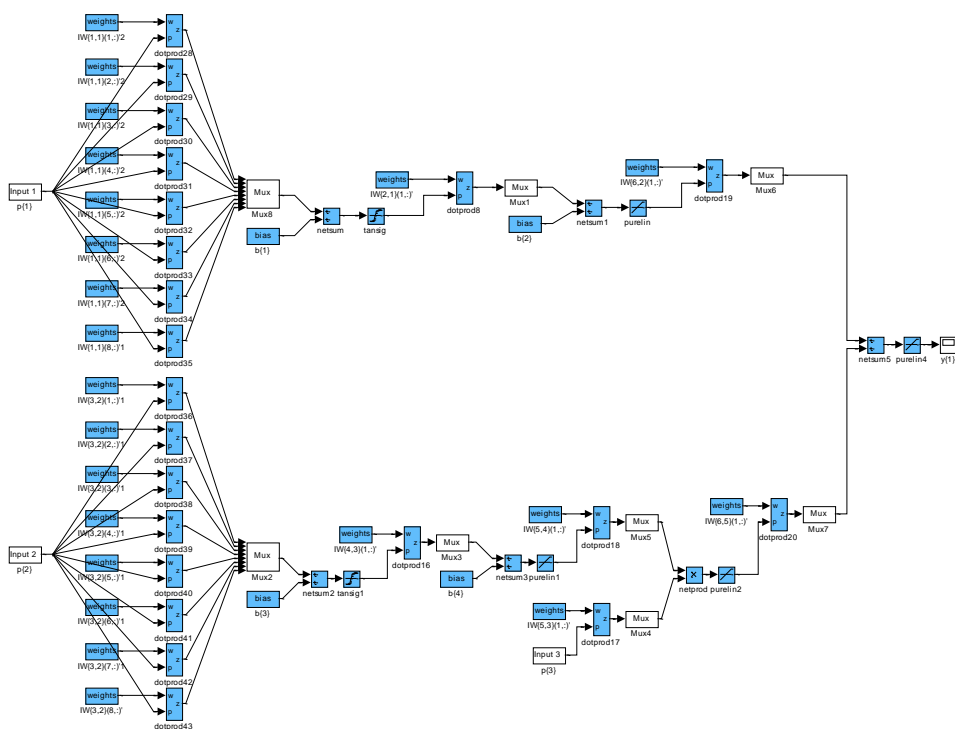


Рис. 3 Модель динамічної мережі  $\text{netn}$  нейрорегулятора NARMA-L2 Controller

Після створення мережі виконується процес навчання. Вектори входу представляються як числові масиви вибірок у форматі  $\text{double}$ , що відповідає груповому представленню даних. Навчання здійснюється з використанням функції  $\text{trainlm}$ , що відповідає алгоритму Левенберга-Марквардта. Після закінчення процесу навчання числові значення елементів матриць ваг  $IW \{1,1\}, IW \{3,2\}, IW \{5,3\}, LW \{2,1\}, LW \{4,3\}, LW \{5,4\}, LW \{6,5\}, LW \{6,2\}$  та зміщень  $b \{1\}, b \{2\}, b \{3\}, b \{4\}$  вводяться в блок NARMA-L2 Controller системи Simulink.

Література:

1. Технології нейронних мереж та нечіткого моделювання в системах управління: підруч. для здобувачів вищої освіти спец. 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Г.І. Канюк, Б.І. Кузнєцов, Т.Ю. Василець, А.Ю. Мезеря, О.О. Варфоломійєв. - Харків: Типографія Мадрид, 2020. - 306 с.