

УДК 656.25:656.256

КУЗЬМЕНКО Д.М., інженер (УкрДАЗТ);  
 ПАНЧЕНКО С.В., д.т.н., доцент (УкрДАЗТ);  
 БОЙНИК А.Б., д.т.н., професор (УкрДАЗТ);  
 ЧЕПЦОВ М.Н., д.т.н., доцент (ДонІЗТ).

## Нейромережеве моделювання та аналіз надійності пристрою керування світлофором

### Вступ, огляд останніх публікацій

Одним з найбільш поширених вузлів систем залізничної автоматики є пристрій керування світлофором [1 - 6]. Його основні функції розглянемо на прикладі схемної реалізації з використанням релейної елементної бази (рисунок 1).

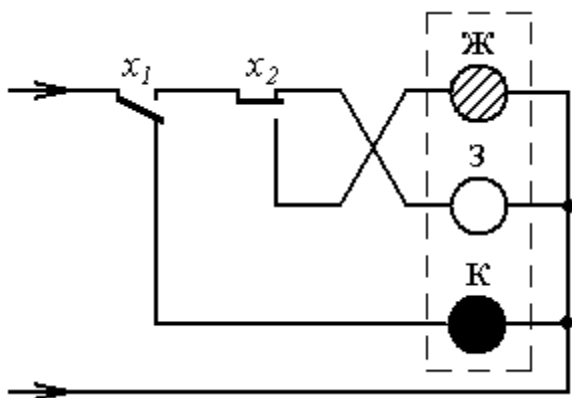


Рисунок 1. - Релейна схема керування світлофором

Показання, яке дозволяє рух, повинно вмикатися на світлофорі тільки в разі виконання всіх умов забезпечення безпеки, що перевіряється системою автоматики. При цьому відповідним сигнальним реле формується вихідний сигнал  $x_1$  [7].

Сигнал  $x_2$  забезпечує вмикання жовтого (Ж) або зеленого (З) показання, тобто встановлює допустиму швидкість прослідування світлофора.

Класичний підхід щодо моделювання функцій пристрою керування світло-

фором орієнтований на використання теорії автоматів, логічних схем та булівої алгебри. При цьому функції вмикання вогнів світлофора формалізуються наступним чином [8]:

$$f_3 = x_1 x_2, f_{\text{Ж}} = x_1 \bar{x}_2 \text{ та } f_{\text{К}} = \bar{x}_1, \quad (1)$$

тобто в моделі використані логічні елементи NOT та AND (рисунок 2).

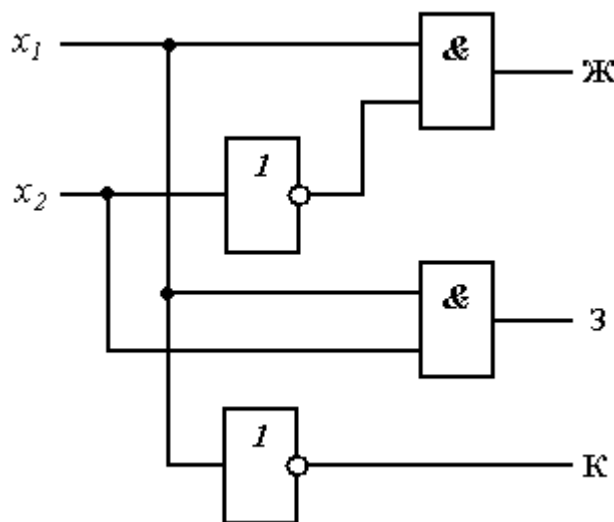


Рисунок 2. - Структура моделі пристрою керування світлофором на основі використання логічних елементів NOT та AND

Як відзначено в публікаціях [6, 7], розглянута модель адекватна тільки за умовою наявності ідеальних логічних сигналів. Крім цього у виразі (1) не враховується час, тобто модель не є динамічною. Якщо передбачається реалізація пристрою керування світлофором, то повинні роз-

глядатися реальні, з урахуванням впливу завад, напруги та струми, що діють у системі.

---

**Задача дослідження**

---

Є розробка функціональної динамічної нейромережевої моделі, побудованої на основі базового елементу систем СЦБ [9], прототипом якої доцільно обрати наведену на рисунку 1 структуру.

---

**Основний матеріал**

---

Виконаємо перетворення функцій кон'юнкції та інверсії у відповідні динамічні з використанням нейронної мережі з логістичною функцією збудження нейронів та мінімально можливою топологією [9].

Структура моделі динамічної нейромережевої функції кон'юнкції (ДНФ AND) складатиметься з двох нейронів першого шару, трьох – другого та одного вихідного. Навчання цієї моделі за модифікованим методом зворотного поширення помилки складалося з трьох ітерацій. Середньоквадратична енергія помилки, розрахована відповідно наведеної в роботі [9] методики, прийняла значення  $E_{ГП} = 2,76312 \cdot 10^{-16}$ . Вагові коефіцієнти та параметри нахилу логістичної функції наступні:

$$\begin{aligned} s_1^{(1)} &= 0,1769311, \\ w_{11}^{(1)} &= -41,42415, \\ w_{12}^{(1)} &= -42,17706, \\ s_2^{(1)} &= -0,0952330, \\ w_{21}^{(1)} &= 36,85195, \\ w_{22}^{(1)} &= 38,73086, \\ s_1^{(2)} &= 0,02855007, \\ w_{11}^{(2)} &= 930,6558, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{12}^{(2)} &= 224,6750, \\ s_2^{(2)} &= 0,03828547, \\ w_{21}^{(2)} &= -2891,223, \\ w_{22}^{(2)} &= -3250,934, \\ s_3^{(2)} &= -0,2811823, \\ w_{31}^{(2)} &= -1245,983, \\ w_{32}^{(2)} &= 1789,803, \\ s_3^{(1)} &= 0,1235542, \\ w_{31}^{(1)} &= -1577,959, \\ w_{32}^{(1)} &= 46,36807, \\ w_{33}^{(1)} &= 2694,305. \end{aligned}$$

Структура моделі динамічної нейромережевої функції інверсії (ДНФ NOT) складатиметься з одного нейрону першого шару, двох – другого та одного вихідного. При навчанні моделі ДНФ NOT отримано значення середньоквадратичної помилки  $E_{ГП} = 6,18143 \cdot 10^{-18}$ . Розраховані вагові коефіцієнти та параметри нахилу логістичної функції:

$$\begin{aligned} s_1^{(1)} &= -0,4082308, \\ w_{11}^{(1)} &= 175,6699, \\ s_1^{(2)} &= 0,1036256, \\ w_{11}^{(2)} &= 930,6558, \\ s_2^{(2)} &= 0,1504105, \\ w_{21}^{(2)} &= -536,8004, \\ s_3^{(1)} &= 0,4668569, \\ w_{31}^{(1)} &= 37,57515, \\ w_{32}^{(1)} &= -171,3893. \end{aligned}$$

Для фільтрації короткотривалих завад, забезпечення стійкості та надійності функціонування пристрою керування світлофором до структури моделі доцільно додати три базових елемента [9] за вихідними сигналами  $f_3(t)$ ,  $f_{\text{Ж}}(t)$ ,  $f_{\text{К}}(t)$ . З урахуванням наведеного, структура нейромережевої динамічної моделі пристрою керування світлофором (НДМ ПКС) набуває вигляду, наведеного на рисунку 3.

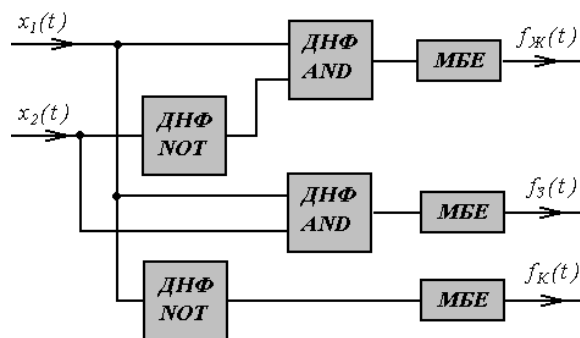


Рисунок 3. - Структура нейромережевої динамічної моделі пристрою керування світлофором

Розглянемо функціонування НДМ ПКС у штатному режимі (при відсутності спотворень сигналів та завад). Так, після перевірки умов безпеки, в момент часу  $t_1$  система автоматики формує команду на відкриття світлофора шляхом зміни рівня сигналу  $x_1(t)$  (рисунок 4). Після встановленої при навчанні МБЕ часової затримки [9] рівень вихідного сигналу  $f_{\text{К}}(t)$  зменшується до нульового та одночасно зростає значення  $f_{\text{Ж}}(t)$ , тобто світлофор відкривається на жовте показання.

В момент часу  $t_2$  збільшується значення сигналу  $x_2(t)$ , це призводить до вимикання жовтого та вмикання зеленого вогню світлофора. Зі зникненням  $x_1(t)$ , незалежно від  $x_2(t)$ , світлофор переключається на червоний (момент часу  $t_3$ ).

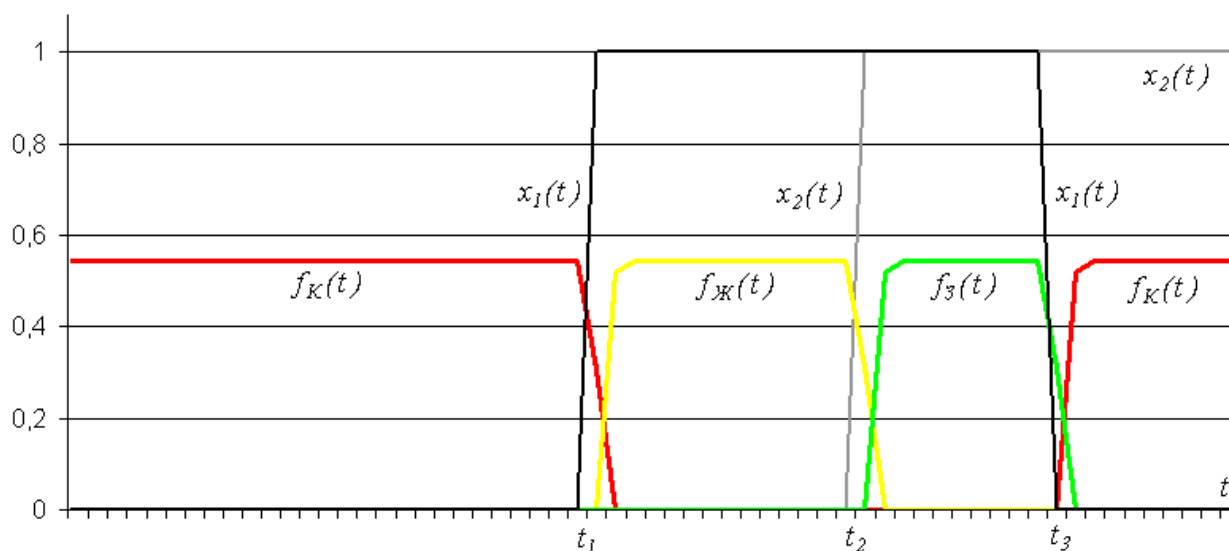


Рисунок 4. - Часова діаграма функціонування нейромережевої динамічної моделі пристрою керування світлофором при зміні вхідних сигналів

Таким чином, при відсутності спотворень вхідних сигналів, НДМ ПКС адекватно відтворює необхідні функціональні вимоги [1, 2, 8]. Аналіз часової діаграми (рисунок 4) свідчить про співпадання результатів роботи нейромережевої та ідеальної логічної (1) моделей (за винятком рівня вихідних сигналів та часових затримок). З іншого боку, в реальних умовах експлуатації пристрою керування світлофором не виключена можливість виникнення завад, в першу чергу короткотривалих. У зв'язку з цим необхідно виконати

оцінку адекватної реакції НДМ ПКС за таких умов.

Так, якщо вхідні послідовності  $x_1(t)$  та  $x_2(t)$  містять випадкові поодинокі імпульси, то реакція моделі дещо змінюється (рисунок 5). Наприклад, у момент часу  $t_1$ , при червоному показанні світлофору, замість нульового значення  $x_1(t)$  з'являється короткотривале одиничне. Реакція моделі – зменшення рівня вихідного сигналу  $f_K(t)$ . Аналогічна ситуація відбувається в інших випадках.

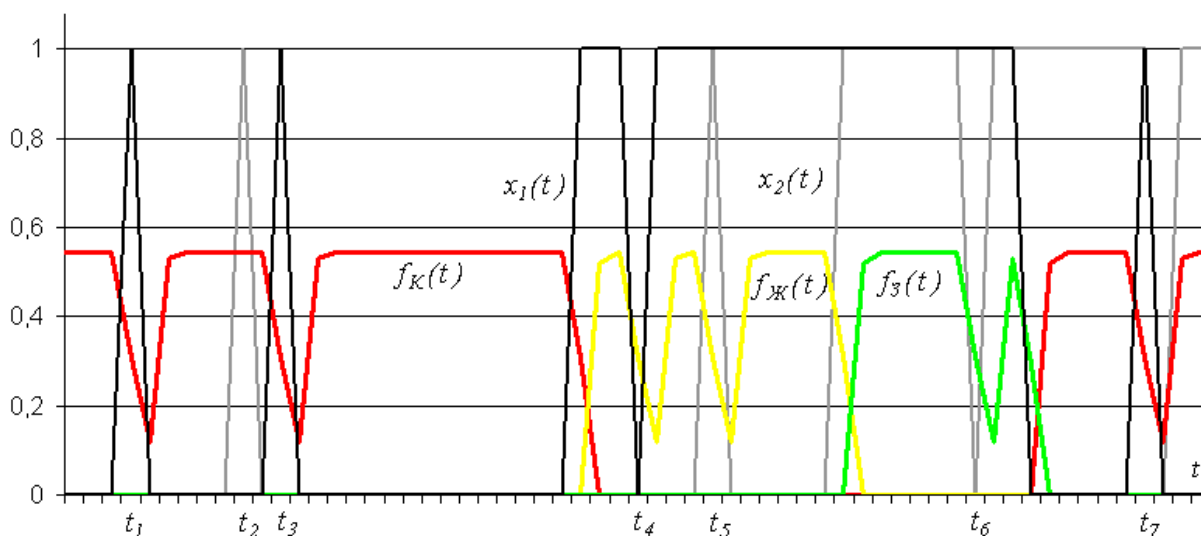


Рисунок 5. - Часова діаграма функціонування НДМ ПКС при наявності завад у вхідних сигналах

Слід відзначити, що зменшення рівня вихідних сигналів складає приблизно 70% від максимального. Враховуючи інерцію ниток накалювання світлофорних ламп та реакцію зорової системи людини [6], такі явища не призведуть до відмови пристрою в цілому. При більш жорсткіших проектних вимогах зменшення рівня вихідних сигналів при впливі завад може бути повністю усунуте, якщо замість МБЕ з мінімальною конфігурацією (див. рис. 3) використовувати модель зі складнішою структурою, з двома або трьома парами ліній затримки [9].

Крім наведеного, слід відзначити позитивну особливість моделі, яка розглядається, а саме – відсутність проблиску іншого показання замість діючого у дійсний момент часу при наявності завад. На відміну від реалізації ідеальної логічної моделі, де подібне явище усунуто за рахунок використання релейної елементної бази, в НДМ ПКС фільтрація є властивістю моделі й виконується базовими елементами, встановленими на виходах.

Розглянемо показники надійності нейродинамічної моделі пристрою керування світлофором. З урахуванням реалі-

зації НДМ ПКС на мікропроцесорній елементній базі, застосуємо розроблений деградаційний метод [10].

Вважаємо, що при ушкодженні МП елементу випадковим чином змінюється значення одного вагового коефіцієнту

якогось одного зі структурних складових НДМ ПКС. Після розрахунку середньоквадратичної енергії помилки, значення ушкодженого вагового коефіцієнту відновлюється. Приклад фрагменту процесу деградації наведений у таблиці 1.

Таблиця 1. - Фрагмент процесу деградації вагових коефіцієнтів

Елемент структури моделі	№ шару	№ нейрону	№ вагового коефіцієнту	Попереднє значення	Змінене значення
NOT2	0	0	0	175,67	876,736
AND1	2	0	0	-1577,96	505,692
NN1	0	0	1	-674,081	641,408
NN3	0	2	0	3717,41	-22,309
AND2	1	2	1	1789,8	529,893
NN3	1	0	1	-8727,49	-868,16

В процесі досліджень застосовані вхідні  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  та еталонні вихідні  $f_3(t)$ ,  $f_{Ж}(t)$ ,  $f_K(t)$  послідовності. Зміна кожного значення вагового коефіцієнту приводить до збільшення енергії середньоквадратичної помилки за відповідним виходом моделі (рисунок 6).

Відповідні енергії середньоквадратичної помилки на кожній ітерації процесу деградації вагових коефіцієнтів НДМ ПКС розраховуються наступним чином

$$E_3 = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^T [f_3(t_j) - f_3^D(t_j)]^2, (2)$$

$$E_{Ж} = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^T [f_{Ж}(t_j) - f_{Ж}^D(t_j)]^2, (3)$$

$$E_K = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^T [f_K(t_j) - f_K^D(t_j)]^2, (4)$$

де  $E_3$ ,  $E_{Ж}$ ,  $E_K$  - енергії помилки за відповідним виходом моделі;  $f_3(t_j)$ ,  $f_{Ж}(t_j)$ ,  $f_K(t_j)$  - еталонні значення

виходів у дискретні моменти часу  $t_j$  (розрахунок проводився при  $T = 63$ ).

Розіб'ємо діапазони значень  $E_3$ ,  $E_{Ж}$ ,  $E_K$  на 20, від 0 до максимального ( $\max(E_3) = 16,63536376$ ,  $\max(E_{Ж}) = 7,62516224$ ,  $\max(E_K) = 9,42689994$ )

та розглянемо розподілення кількості ітерацій процесу деградації до перевищення відповідного порогу  $E_3^{\Pi}$ ,  $E_{Ж}^{\Pi}$ ,  $E_K^{\Pi}$ . Тоді поверхні щільності розподілу  $f_3^{\Phi}(iter)$ ,  $f_{Ж}^{\Phi}(iter)$ ,  $f_K^{\Phi}(iter)$  набувають вигляду, наведеного на рисунку 7.

Аналіз поверхонь показує, що без відсутності структурної надлишковості деградація кожного функціонального елементу призводить до збільшення загальної енергії середньоквадратичної помилки. З іншого боку, пристрою керування світлофором властивий бінарний принцип функціонування за виходами, тобто відповідне показання може бути увімкнено або вимкнено. Такий спосіб забезпечують ключові елементи, безпосередньо підключені до ламп світлофору. З цього впли-

ває, що виконується фільтрація спотворень вихідних сигналів, які мають проміжні значення. Тоді, якщо за номінальний рівень вихідного сигналу вмикання пока-

зання прийняти 0,5, то значення порогу спрацювання встановимо на рівні 0,4, тобто 80% номінального.

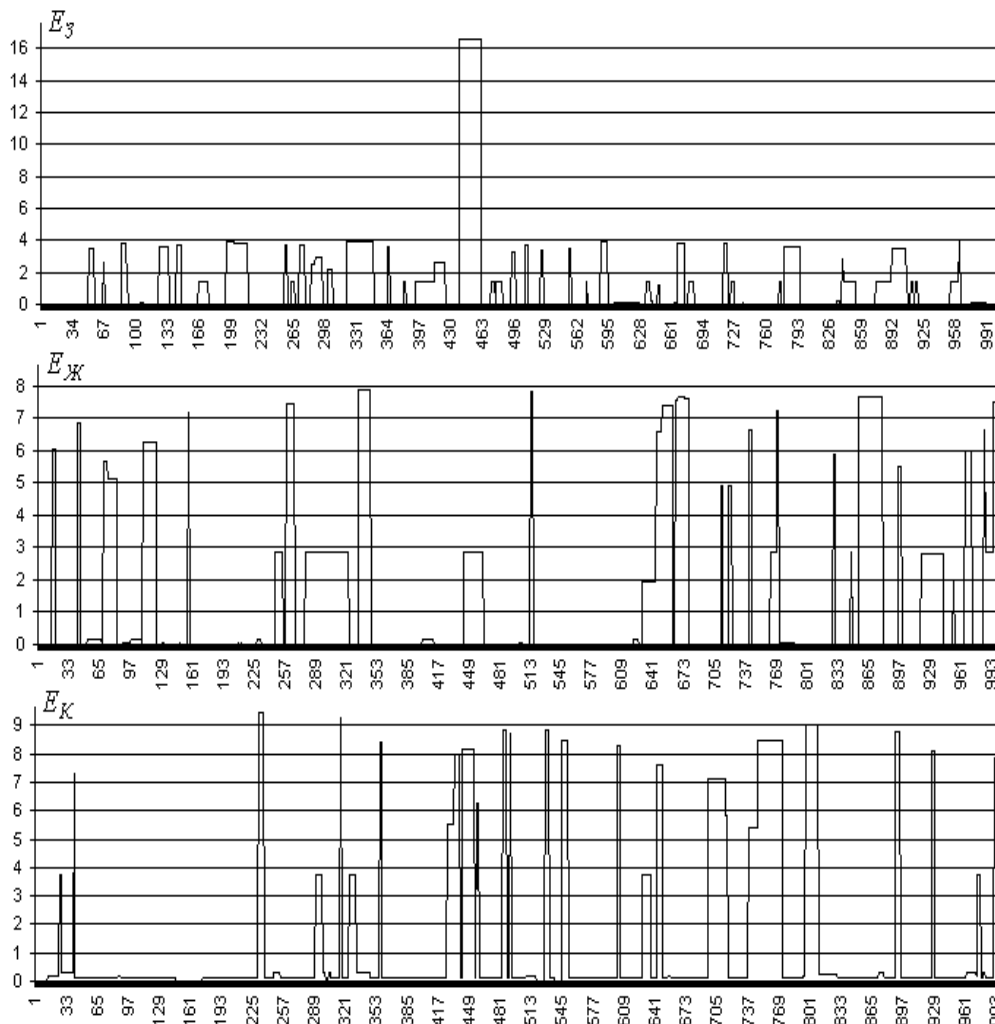


Рисунок 6. - Гістограми розподілу середньоквадратичної енергії помилки за ітераціями процесу деградації

З урахуванням цього, з множини щільностей розподілу кількості ітерацій процесу деградації беремо до уваги значення  $0,8 \cdot \max(E)$ . Апроксимація дискретних функцій  $f_3^\Phi(iter)$ ,  $f_{Ж}^\Phi(iter)$ ,  $f_K^\Phi(iter)$  за вказаним рівнем Пуасонівським законом розподілу першого порядку дозволила перейти до

безперервних функцій щільності розподілу часу безвідмовної роботи [10]

$$f_\Phi(t) = \lambda_\Phi e^{-\lambda_\Phi t}, \quad (5)$$

де  $\lambda$  - інтенсивність функціональних відмов, яка набуває наступних значень:  $\lambda_3 = 0,5122$ ,  $\lambda_{Ж} = 0,75$ ,  $\lambda_3 = 0,7778$

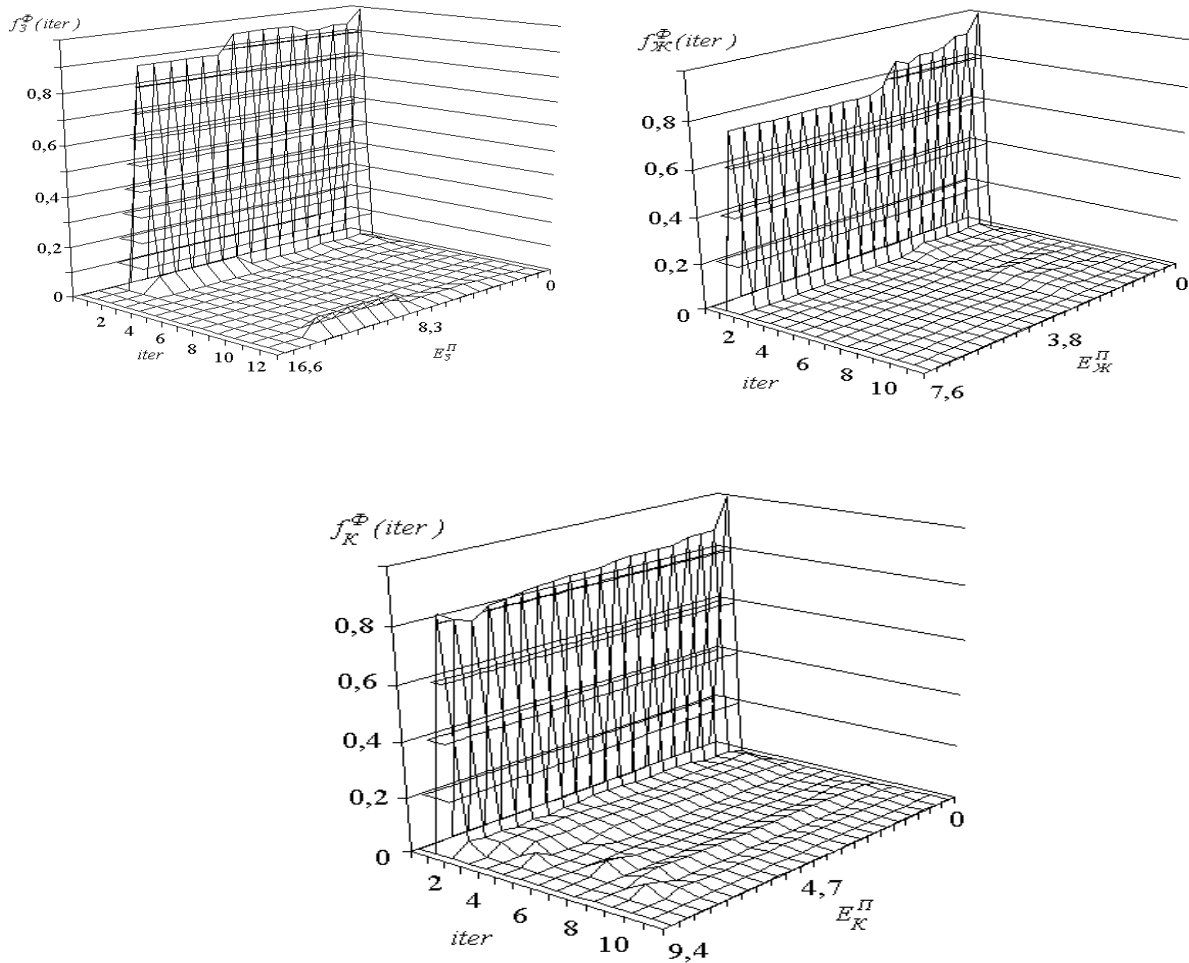


Рисунок 7. - Поверхні щільності розподілу  $f_3^\Phi(iter)$ ,  $f_Z^\Phi(iter)$ ,  $f_K^\Phi(iter)$

При апроксимації функцій (5) перевірялась відповідність критерію  $\chi^2$ , при цьому отримано  $\chi_3^2 = 1,66407$ ,  $\chi_Z^2 = 1,58675$ ,  $\chi_K^2 = 1,49901$ .

му, отримано результати, які свідчать про зменшення інтенсивності відмов пристрою керування зеленим, жовтим та червоним вогнем світлофору приблизно на 49%, 25%, 22% відповідно.

### Література

1. Правила технічної експлуатації залізниць України. Затв. наказом Міністерства транспорту України від 20 грудня 1996 р. №411. Із змінами і доповненнями, внесеними наказом Міністерства транспорту України від 8 червня 1998 р. №226, від 23 липня 1999 р. №386, від 19 березня 2002 р. №179. – Київ, 2003. – 134 с.

### Висновки та практичні рекомендації

Таким чином, отримані результати свідчать про адекватність динамічної нейромережевої моделі пристрою керування світлофором критеріям функціональної спроможності та показникам надійності з урахуванням реалізації НДМ ПКС на мікропроцесорній елементній базі. При цьо-

2. Автоматизированные системы интервального регулирования движения поездов / [А.А. Казаков, В.Д. Бубнов, Е.А. Казаков и др.]. – М.: Транспорт, 1995. – 320 с.

3. Бойник А.Б. Безопасность железнодорожных поездов: Монография. / А.Б. Бойник - Харьков.: ХФИ “Транспорт Украины”, – 2003. – 204 с.

4. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / [Вл. В. Сапожников, В.В. Сапожников, Х.А. Христов, Д.В. Гавзов]; Под. ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, – 1995. – 342 с.

5. Путевая блокировка и авторегулировка / Н.Ф. Котляренко, А.В. Шишляков, Ю.В. Соболев, И.З. Скрыпин. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.

6. Чепцов М.М., Бойник А.Б., Кузьменко Д.М. Методы синтеза сигнально-процессорной централизации стрелок і сигналів: Монографія. – Донецьк: “ДонІЗТ”, – 2010. – 181 с.

7. Чепцов М.М. Моделі пристроїв керування станційними світлофорами / М.М. Чепцов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – №3/8(39), – С. 20-24.

8. Станционные системы автоматики и телемеханики: [Учеб. для вузов ж.-д.

трансп.] / [Вл.В.Сапожников, Б.Н. Елкин, И.М. Кокурин и др.]; Под ред. Вл.В.Сапожникова. – М.: Транспорт, – 1997. – 432 с.

9. Кузьменко Д.М., Блиндюк В.С., Чепцов М.М. Нейромережеве моделювання функцій систем залізничної автоматики / Д.М. Кузьменко, В.С. Блиндюк, М.М. Чепцов // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. Випуск 122, – Харків, – 2011, – С. 33-43.

10. Кузьменко Д.М., Блиндюк В.С., Чепцов М.М. Деградаційний аналіз надійності нейродинамічної функціональної моделі / Д.М. Кузьменко, В.С. Блиндюк, М.М. Чепцов // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. Випуск 124, – Харків, – 2011, – С. 68-77.

#### Анотації:

В работе представлены результаты нейросетевого моделирования функций устройства управления светофором.

В роботі представлені результати нейромережевого моделювання функцій пристрою керування світлофором.

In work presented results of neural network modeling functions device of traffic light governing.