

*КРАВЕЦЬ П.І.,
ШИМКОВИЧ В.М.,
ФЕДОРЧУК В.В.,
ГОЙ А.А.*

НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ КОНТРОЛЕР СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ РУХОМОГО ОБ'ЄКТА З АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЮ РЕАЛІЗАЦІЄЮ НА ПЛІС

В даній роботі розроблений та досліджений нейромережевий контролер системи стабілізації рухомого об'єкта з його апаратно-програмною реалізацією на FPGA, а саме розроблено макет балансування кульки на платформі, апаратне та програмне забезпечення даного макету, що демонструє роботу раніше розроблених нейромережевих компонентів систем керування.

In this paper developed and investigated neural network controller stabilization system of a moving object with its hardware and software implementation on FPGA, namely model developed balancing ball on a platform, hardware and software of this model, showing the work previously developed neural components of control systems.

Вступ

Нейромережеві системи управління являють собою новий високотехнологічний напрямок в теорії управління та відносяться до класу нелінійних динамічних систем [1,2]. Висока швидкодія за рахунок розпаралелювання вхідної інформації в поєднанні зі здатністю до навчання нейронних мереж робить цю технологію вельми привабливою для створення пристроїв управління в автоматичних системах [2]. Нейронні мережі можуть бути використані для побудови регулюючих та коректуючих пристроїв, еталонної, адаптивної, номінальної та інверсно-динамічної моделей об'єкта, на основі яких виконується спостереження та оцінка параметрів об'єкта керування (ОК), спостереження та оцінка величини діючих в системі збурень, пошук або обчислення оптимальної програми зміни керуючого впливу, ідентифікація ОК, прогнозування стану ОК та інше [2,3]. Здатність до навчання на будь-який заданий принцип функціонування дозволяє створити системи автоматичного керування, оптимальні по швидкодії, по енергоспоживанню і т. д., при цьому, природно, можлива реалізація декількох принципів функціонування та перехід з одного на інший. Навчені нейронні мережі не потребують для обчислень значних часових затрат, а тому системи з нейронними мережами мають значно кращу динаміку. Вони є універсальним засобом для моделювання складних нелінійних ОК та знаходження рішень в некоректних задачах [2-5].

Засоби реалізації нейромережевих систем управління повинні орієнтуватися на широке

застосування в промислових умовах, бути універсальними і гнучкими, навчатися і адаптуватися в реальному часі, бути простими і дешевими, тому найбільш перспективними засобами можна вважати ПЛІС [6,7]. З появою ПЛІС проектування цифрових мікросхем перестало бути долею виключно великих підприємств з обсягами випуску в десятки і сотні тисяч кристалів. Проектування і випуск невеликої партії унікальних цифрових пристроїв став можливий в умовах проектно-конструкторських підрозділів промислових підприємств, в дослідницьких і навчальних лабораторіях і навіть в умовах домашніх радіоаматорських місць. Промислово випускаються «заготовки» програмованих мікросхем з електричним програмуванням і автоматизованим процесом перекладу схеми користувача в послідовність імпульсів програмування роблять проектування нових цифрових пристроїв порівняним з розробкою програмного забезпечення [8-10].

Для побудови макета нейромережевого контролера в якості об'єкта управління обрано систему балансування кульки на платформі, здатну встановити кульку в задану точку. Платформа нахилиючись по кожній з двох горизонтальних осей, контролює положення кульки на платформі. По кожній осі нахил платформи виконується під дією електричного двигуна. Положення кульки на платформі фіксується за допомогою відеокамери. Таке завдання балансування є розширенням задачі балансування «перевернутого маятника». Такий об'єкт управління є складним багатовимірним, багатозв'язним об'єктом та розроблений для демонстрації роботи нейромережевих систем управління синтезова-

них на розроблених раніше компонентах [11-16].

Метою роботи є розробка макета нейромережевого контролера системи стабілізації кульки на платформі з апаратно-програмною реалізацією на ПЛІС.

Розробка макету

Першочерговим завданням є визначення положення кульки, точно, надійно і в не громіздкий та недорогий спосіб. Різні варіанти, які розглядалися, перераховані нижче. Відносні переваги і недоліки вказані також:

1. За допомогою сенсорної плівки, коли на платформу наклеюється сенсорний екран: не вистачає інформації, може бути складно реалізувати.

2. Відстеження положення кульки цифровою камерою: не дорогий, вимагає використання додаткового програмного забезпечення, вимагає використання додаткової конструкції, щоб встановити камеру.

3. Використання резистивної сітки на платформі (2D потенціометра): спосіб є надмірний і громіздкий.

4. Сітка інфрачервоних датчиків: спосіб є громіздким та надмірним.

5. Відстеження 3D-руху з кулі за допомогою інфрачервоного ультразвукової транспондера, прикріпленою до кульки, який обмінюється

сигналами з трьома дистанційно розташованими вежами: дуже точні вимірювання, потрібен додатковий апарат у цілому, дуже дорого.

На підставі перелічених вище достоїнств і недоліків, пов'язаних з кожним вибором, було прийнято рішення відстежувати положення кульки за допомогою цифрової відеокamera.

Наступним завданням було спроектувати механізм нахилу пластини. Пластина має нахилитися по двох своїх осях, щоб мати можливість збалансувати кульку. Для цієї конструкції, були розглянуті наступні варіанти:

1. Два приводи прикріплюються по двох кутах пластини, яка підтримується кульовим шарніром в центрі, в якості двох необхідних ступенів руху.

2. Встановлення пластини на кільця підвісу. Один двигун перетворює карданний підвіс, що забезпечує одну ступінь обертання; другий двигун обертає пластину по відношенню до кільця забезпечуючи тим самим другий кут повороту.

3. Використання пристрою – ремінь та шків, повертати пластину за допомогою двох двигунів.

У цьому випадку, обрано перший варіант. На рисунку 1 показаний вигляд всієї системи в зборі, включаючи механізм нахилу пластини і зчитування положення кульки за допомогою відеокamera.



Рис. 1. Механізм керування платформою та відеокamera

Система балансування кульки на платформі складається з пластикової пластини обклеєної чорною акриловою плівкою на якій буде знахо-

дитись біла кулька для настільного тенісу, приводним механізмом для нахилу пластини навколо двох осей, цифрової відеокamera, для

відстеження положення кульки, апаратного та програмного забезпечення, що опрацьовує інформацію та керує системою в режимі реального часу.

Кожен двигун приводить в одну вісь кута пластини обертання і з'єднаний з пластиною, за допомогою просторового механізму зв'язку, як показано на рисунку 1. Кожна зі сторін механізму просторової ув'язки складається з паралелограма. Це гарантує, що для малих рухів по всьому рівноваги, кути плити дорівнюють відповідним кутам двигуна. Пластина з'єднана з підставкою за допомогою центральної рухомої опори.

Для приведення в рух пластини використовуються крокові двигуни ПБМГ 200-265, які мають наступні характеристики:

- Тип двигуна: кроковий, уніполярний.
- Кут повороту за один крок: 1.8 градуса.
- Кількість кроків на повний оберт вала: 200.
- Кількість виводів: 6.
- Кількість обмоток: 2 з середньою точкою.
- Напруга живлення: 12В.
- Опір обмоток: 70Ом.
- Споживаний струм: 0,17 А.

Для відстеження положення кульки на платформі використано цифрову відеокамеру OV7670.



Рис. 2. Цифрова відеокамера OV7670

VGA камера моделі OV7670 з максимальною роздільною здатністю 640x480 пікселів (0,3 Мегапікселя), низькою напругою живлення, однокристальним CMOS датчиком зображення має широкий спектр форматів кадру і контролюється з допомогу шини Serial Camera Control Bus (SCCB), яка є аналогом шини I2C, ПС.

Камера OV7670 використовується для захоплення, первинної обробки та передачі зображення на контролер, дисплей, інший пристрій обробки зображення. Вона може управлятися за допомогою мікропроцесорного керуючого пристрою, а також з комп'ютера за допомогою спеціальних програм для управління послідовними портами.

Камера OV7670 формує зображення з максимальною роздільною здатністю 640x480 і може видати його зі швидкістю до 30 кадрів в секунду. Відеоінтерфейс використовує синхронізовані імпульси по кадрам VSYNC, по рядках HREF і по пікселям PCLK. Дані пікселя, що представляють собою закодовану інформацію про його колір, видаються по 8-ми розрядному паралельному інтерфейсу D7-D0 по тактам PCLK. Один піксель не дорівнює одному байту. У разі кодування RGB дані про колір пікселя видаються у двох байтах. Також можливе YCbCr кодування. Для OV7670 існують безліч налаштувань. Наприклад, можна використовувати такі формати кадру:

- VGA (640 x 480);
- QVGA (320 x 240);
- CIF (352 x 240);
- QCIF (176 x 144);
- Ручне масштабування.

RGB доступна в наступних варіантах: RGB565, RGB555 і RGB444. Цифри позначають, кількість біт на кожен колір. Приміром, RGB565 – 5 біт на червоний, 6 біт на зелений і 5 біт на синій. Крім зазначених є ще безліч налаштувань (регулювання підсилення за кольорами, рівні сірого, полярності сигналів, внутрішня PLL та інші)

Камера OV7670 має один 18-піновий інтерфейс для підключення вхідних, вихідних сигналів та живлення:

- VDD – живлення;
- GND – загальний;
- SDIOC – (вхід) тактовий сигнал послідовного інтерфейсу SCCB управління камерою;
- SDIOD – (вхід / вихід) інформаційний сигнал (дані) послідовного інтерфейсу SCCB управління камерою;
- VSYNC – (вихід) імпульс кадрової синхронізації;
- HREF – (вихід) імпульс рядкової синхронізації;
- PCLK – (вихід) тактовий імпульс видачі байта з паралельного порту D7-D0;
- XCLK – (вхід) головний тактовий імпульс для роботи з OV7670;
- D7-D0 – 8-ми бітний паралельний відеовихід;
- RESET (Скидання) – виведення апаратного скидання камери;
- PWDN – висновок апаратного включення / вимикання камери.

Живлення камери може здійснюватися від мікропроцесорного керуючого пристрою, зов-

нішнього джерела живлення (блоку живлення, батарей). Напруга живлення модуля 3 - 5 В.

Фізичне моделювання системи

Наступні припущення використовуються в моделюванні вищеприписаної фізичної системи:

1. Передбачається, що тертя-ковзання між кулею і пластиною досить високе, щоб запобігти кульку від ковзання на пластині. Це обмежує ступені свободи системи, а також робить рівняння руху простішим.
2. Обертання кулі навколо своєї вертикальної осі, як передбачається, буде незначним.
3. Тертям-ковзанням між кулькою та пластиною – знехтувати.

4. Передбачається, що буде невеликий рух пластини при рівноважній конфігурації. Це гарантує, що кути пластини будуть приблизно рівні кутам двигуна.
5. Пластина, як передбачається, має максимальну симетрію.

Фізична модель керованого об'єкта представлена на рисунку 3, де X-Y-Z є підставою рами. Платформа має два ступені свободи, а його орієнтація визначається двома кутами (q_1 і q_2), які представляють собою тіла (1-2) обертання. Рамка x'-y'-z' є пластина, закріплена система відліку, в той час як x''-y''-z'' є проміжними.

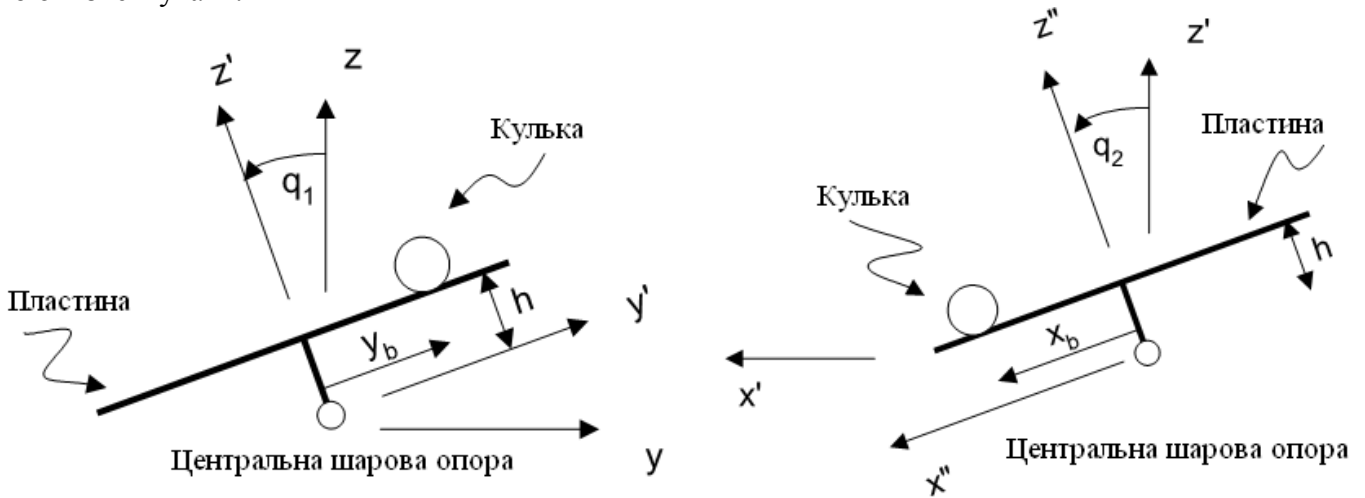


Рис. 3. Фізичне моделювання руху кульки по платформі

Схема просторового зв'язку показана на рисунку 4. З'єднання жорстко прикріплене до основи пластини і з'єднане з землею в точці О. Два двигуни з'єднані з тягами нерухомими з'єднаннями. Решта на шарових шарнірах.

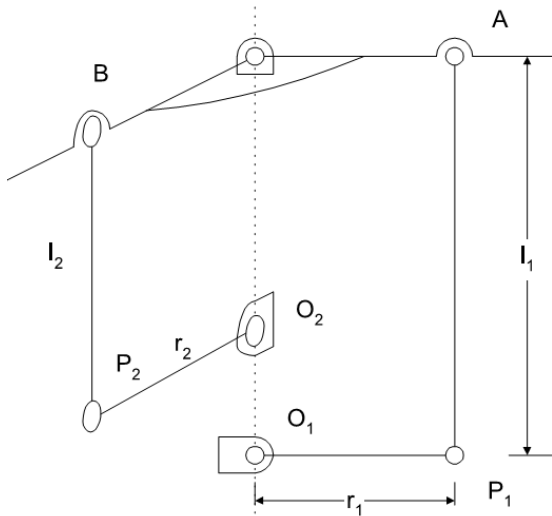


Рис. 4. Механізм керування платформою

Розрахунок ступеня свободи: кількість твердих тіл (N) = 5; кількість осей (P) = 2; кількість U-образних сполук (U) = 1; кількість шарових з'єднань = 4;

Кількість надлишкових ступенів свободи два (Повороти двох вертикальних зв'язків по своїх осях складають два резервних ступеня свободи, так як вони не впливають на стан системи в будь-якому випадку)

Таким чином, плита і механізм просторового зв'язку мають два ступені свободи, як і очікувалося. Це також дорівнює числу входів в систему, керуючий сигнал двома двигунами.

Виходячи з вищевикладеного, очевидно, що з чотирьох змінних – $\theta_{m1}, \theta_{m2}, q_1, q_2$, але тільки дві є незалежними, так як механізм має два ступені свободи. Таким чином, існують наступні два кінематичні рівняння зв'язку, які трансформують кут повороту валів двигунів в кут нахилу платформи

$$\begin{aligned}
 & (r_1 \cos q_1 - r_1 \cos \theta_{m1})^2 + \\
 & + (r_1 \sin q_1 - r_1 \sin \theta_{m1} + l_1)^2 = l_1^2, \\
 & (r_2 \cos \theta_{m2} - r_2 \sin q_2 \cos q_1 + l_2)^2 + \\
 & + (r_2 \cos q_2 - r_2 \cos \theta_{m2})^2 + r_2 \sin q_2 \sin q_1 = l_2^2.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Помічено, що, в загальному випадку кут повороту пластини q_2 пов'язаний з кутами повороту двигунів θ_{m1} та θ_{m2} складними нелінійними рівняннями, наведеними вище. Проте, для малих рухів на рівновагу кульки на платформі, можна зазначені вирази звести до наступних лінійних виразів:

$$\begin{aligned} q_1 &= \theta_{m1}, \\ q_2 &\cong \theta_{m2}. \end{aligned}$$

x – координата:

$$m_b g r_b \sin q_2 \cos q_1 - m_b r_b \left[(h+r) \ddot{q}_2 - y_b \ddot{q}_1 \sin q_2 - x_b \dot{q}_2^2 - x_b \dot{q}_1^2 \sin^2 q_2 + \right. \\ \left. + (h+r_b) \dot{q}_1^2 \sin q_2 \cos q_2 - 2 \dot{y}_b \dot{q}_1 \sin q_2 + \ddot{x}_b \right] - I_b ((\ddot{x}_b/r_b) + \ddot{q}_2) = 0 \quad (2)$$

y – координата:

$$m_b g r_b \sin q_1 - m_b r_b \left[x_b (\ddot{q}_1 \sin q_2 + \dot{q}_2 \dot{q}_1 \cos q_2) - (h+r_b) (\ddot{q}_1 \cos q_2 + \dot{q}_2 \dot{q}_1 \sin q_2) + \right. \\ \left. + \dot{q}_2 \dot{q}_1 (h+r_b) \sin q_2 - \dot{y}_b \dot{q}_1^2 + x_b \dot{q}_2 \dot{q}_1 \cos q_2 + 2 \dot{x}_b \dot{q}_1 \sin q_2 + \ddot{y}_b \right] - \\ - I_b (\ddot{y}_b/r_b + \ddot{q}_1 \cos q_2 \dot{q}_2 \dot{q}_1 \sin q_2) = 0 \quad (3)$$

Рівняння руху є нелінійними та малоприсадибними для синтезу системи управління на базі лінійної теорії управління. Такий об'єкт управління, як кулька на платформі є складним нелінійним об'єктом, як видно з рівнянь (2) та (3), тому для управління ним потрібна нейромережева система управління, яка відноситься до класу нелінійних динамічних систем. Далі розглянемо загальну структурну схему нейронконтролера.

Загальна структурна схема нейронконтролера

Сучасні засоби управління технічними та технологічними об'єктами мають в своєму складі обчислювальне ядро, засоби вводу аналогової та цифрової інформації, засоби виводу аналогової та цифрової інформації, засоби обміну даними з іншими обчислювальними пристроями, елементи візуалізації та оперативного управління. Такі засоби управління будуються на основі промислових комп'ютерів, вільно програмованих контролерів, спеціалізованих контролерів та мікроЕОМ. Далі розглядається контролер для управління динамічними об'єктами, в якому в якості обчислювального ядра ПЛІС (англ. FPGA).

На рисунку 5 представлена узагальнена структурна схема нейронконтролера, де в якості обчислювального ядра використовується нейрообчислювач на основі ПЛІС, що реалізує штучні нейронні мережі.

Справедливість цього припущення також перевірена експериментально. Встановлено, що для відповідного діапазону роботи, відповідність між кутом повороту двигуна і кутом нахилу є задовільною.

Рівняння руху для цієї системи можуть бути отримані за допомогою законів Ньютона або рівнянь Лагранжа. Для цього випадку ці методи були використані для перевірки остаточних результатів. Повна нелінійна математична модель описується системою рівнянь:

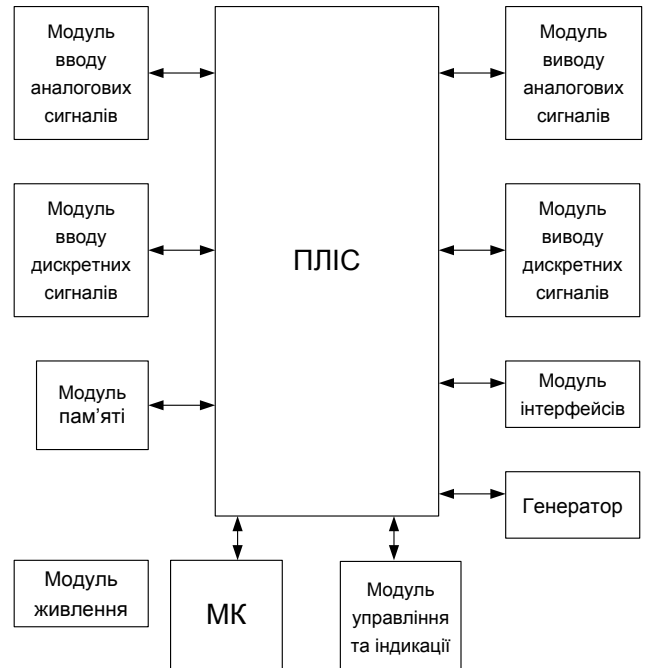


Рис.5. Загальна структурна схема нейронконтролера

До складу нейронконтролера входять: ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема; МК – мікроконтролер; модуль вводу аналогових сигналів; модуль виводу аналогових сигналів; модуль вводу дискретних сигналів; модуль виводу дискретних сигналів; модуль пам'яті; модуль інтерфейсів; модуль управління та індикації; генератор;

ПЛІС є центральним елементом даної структури, яка реалізує нейромережеві алгоритми управління, включаючи алгоритм навчання мережі в режимі «on line».

Мікроконтролер (МК) виконує допоміжні функції, такі як завантаження конфігураційної послідовності в мікросхему ПЛІС, реалізує функцію спостереження.

Модулі вводу/виводу аналогових та цифрових сигналів для вводу/виводу інформації з/в систему або об'єкт управління.

Модуль пам'яті забезпечує зберігання даних та конфігураційної послідовності ПЛІС.

В даній структурній схемі присутні два обчислювальних ядра: мікроконтролер (МК) і ПЛІС. В залежності від задач управління, мікроконтролер може бути: основним елементом нейромережевого контролера, а ПЛІС відводиться роль «швидкого» обчислювача фрагментів загального алгоритму роботи контролера пов'язаного з нейрообчисленнями; доповнювати на рівних програму роботи ПЛІС, або бути чисто технічним елементом нейромережевого контролера, що забезпечує режими роботи ПЛІС. Але, в усіх випадках ПЛІС призначена для реалізації нейромережевих елементів системи управління, тому в подальшому основну увагу будемо приділяти обчислювачу на ПЛІС.

Апаратна реалізація системи управління

Для управління кроковими двигунами розроблені драйвери, схема електрична принципова яких зображена на рисунку 6. На рисунку dir – сигнал, який вказує напрямок обертання, якщо dir=1(2.6-5В) – обертання в одну сторону, 0 – обертання в іншу, step – сигнал, що задає кількість кроків.

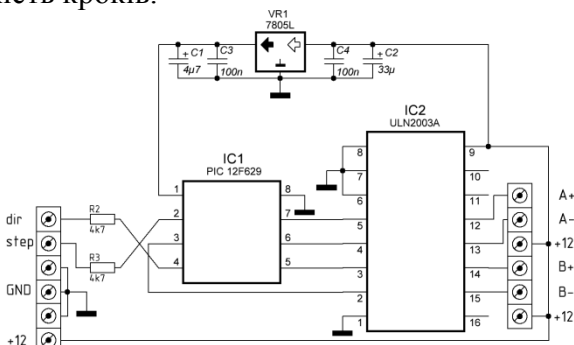


Рис.6. Схема електрична принципова драйвера крокового двигуна

В якості МК та модулів вводу/виводу аналогових сигналів обрано плату STM32F4 Discovery. Дана плата є відлагодною платою на мікроконтролері ARM Cortex M4 від ST Microelectronics. Параметри плати:

–Мікроконтролер STM32F407VGT6 з частотою 168Mhz на 32-бітному ядрі ARM Cortex-M4F, 1 Мб флеш-пам'яті, 192 Кб оперативної пам'яті в корпусі LQFP100.

–Вбудований ST-LINK / V2 з можливістю використання ST-LINK / V2 як окремого пристрою (з SWD роз'ємом для програмування і налагодження). Не впевнений в ньому, т.к. JTAG є перевіреним методом налагодження, і потрібно побачити, що можна робити з новим роз'ємом.

–LIS302DL, ST MEMS датчик руху, 3-осьовий акселерометр з цифровим виходом.

–MP45DT02, ST MEMS датчик звуку, всенаправлений цифровий мікрофон.

–CS43L22, аудіо ЦАП з вбудованим підсилювачем класу D.

–Чотири світлодіода, LD3 (помаранчевий), LD4 (зелений), LD5 (червоний) і LD6 (синій).

–Дві кнопки (призначена для користувача і reset)

–Порт USB OTG FS і конектор мікро-AB

–Штирі для швидкого з'єднання з іншими пристроями підключення до всіх висновків LQFP100.



Рис.7. Плата STM32F4 Discovery

До даної плати підключено цифрову відеокамеру OV7670 по 18-ти піновому інтерфейсу та шині SCCB, яка є аналогом шини I²C, ІС. В STM32F4 виконується початкова обробка зображення, виділення координат кульки на платформі та передача їх до ПЛІС та інші функції. Плата STM32F4 Discovery зображена на рисунку 7.

В якості ПЛІС обрано плату Xilinx Spartan-3 з чіпом – XC3S200. Інструментальний модуль Xilinx Spartan-3 Starter Kit може використовуватися для реалізації автономних систем керування, збору і обробки цифрової інформації, вбудованих цифрових пристроїв з різними комп'ютерними інтерфейсами.

Плата має три додаткові 40-ка пінові роз'єми для вводу та виводу дискретних сигналів. На ПЛІС сімейства FPGA даної плати розміщено нейромережеву систему управління на основі компонентів розроблених в попередніх роботах

[16]. Інструментальний модуль Xilinx Spartan-3 Starter Kit зображений на рисунку 8.

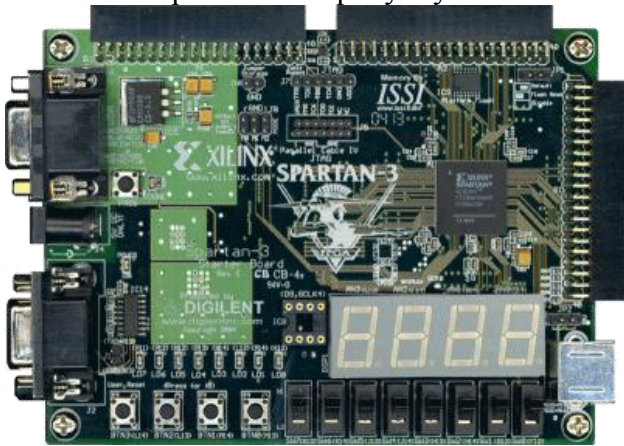


Рис.8. Плата Xilinx Spartan-3 Starter Kit

Функціональні можливості і конструктивне виконання інструментального модуля дозволяють не тільки виконувати налагодження проек-

тів, що реалізуються на основі ПЛІС сімейства Spartan-3, але і використовувати його в якості промислового серійного варіанту розроблюваного пристрою. Застосування серійно випускаємих модулів дозволяє значно скоротити сумарну тривалість розробки макета за рахунок виключення етапів проектування, виготовлення друкованої плати пристрою і монтажу компонентів.

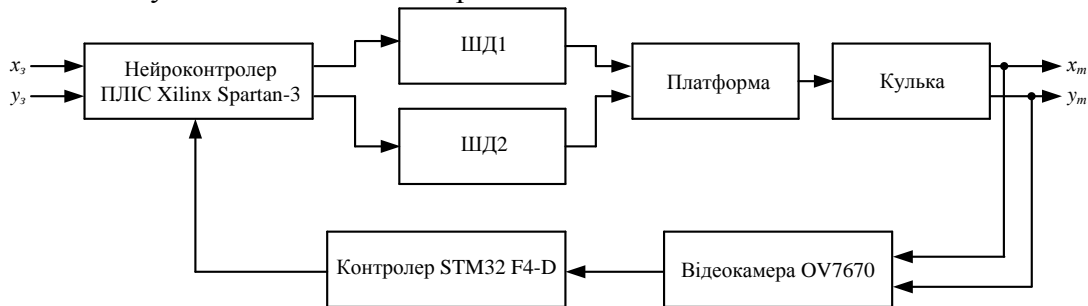


Рис.9. Система управління кульки на платформі

Розробка системи управління і ПО

Для керування положенням кульки на платформі розроблено неймережеву систему управління з зворотнім зв'язком, представлену на рисунку 10. Схема є класичною схемою спеціалізованого інверсного навчання. За методом описаним в [16] синтезуємо неймережевий компонент такий як, обернена(інверсна) модель об'єкта управління. На рисунку 11 нейроконтролер включає в себе інверсну модель об'єкта керування, компонент її налагодження, розроблений за методом описаним в [14] та обернений зв'язок.

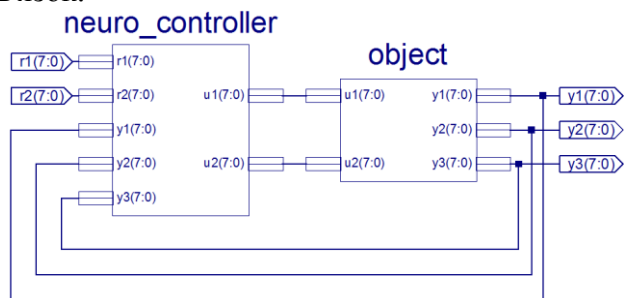


Рис.10. Модель системи управління

Схема представлена на рисунку 10 є моделлю всієї системи управління включно з об'єктом на основі розроблених раніше неймерере-

жевих компонентах, в FPGA завантажено сам нейроконтролер.

Висновок

Розроблено узагальнену структурну схему нейроконтролера на основі ПЛІС, що реалізує базові компоненти неймережевих систем управління.

Реалізовано макет нейроконтролера для системи стабілізації рухомого об'єкта на обмеженій площині та проведено його дослідження, які підтвердили високу ефективність роботи.

Такий об'єкт управління, як кулька на платформі є складним нелінійним об'єктом тому для управління ним розроблено неймережеву систему управління, яка відноситься до класу нелінійних динамічних систем. Розроблена в даній роботі неймережева система управління функціонує та адаптуються в режимі реального часу та формує досить складні функції управління. Коли система управління ввімкнена, кулька буде збалансована в будь-якій заданій точці платини. Вона також може бути спрямована на перехід від однієї точки до іншої, і залишитися там. Використовуючи цю систему управління можна задати траєкторію

руху кульки по платформі, наприклад рух по колу.

Побудовану і випробувану систему можна додатково використовувати як відмінний випробувальний стенд для тестування різних ін-

ших схем управління. В подальшому можуть бути розроблені на базі ПЛІС більш оптимальні контролери для досягнення ще більш високої продуктивності.

Перелік посилань

1. Саймон Хайкин. Нейронные сети. Полный курс. – М.: Вильямс, 2006. – 1104с.
2. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления: Учеб. пособие для вузов. – М: Высшая школа. 2002. – 183с.
3. Сигеру Омату. Нейроуправление и его приложения. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272с.
4. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 452 с.
5. Егупов Н.Д. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 744 с.
6. Гильгурт С.Я. Анализ применения реконфигурируемых вычислителей на базе ПЛИС для реализации нейронных сетей // Моделивання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип. 37. – Київ: 2006. – С. 168-174 с.
7. Логовский А. Технология ПЛИС и ее применение для создания нейрочипов. // Открытые системы. – 2000. – № 4. – С. 100-102 с.
8. Соловьев В. Проектирование цифровых систем на основе ПЛИС. – М.: Радио и связь, 2003. – 376с.
9. Тарасов И.Е. Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС Xilinx® с применением языка VHDL. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2005. – 252 с.
10. Сергиенко А.М. VHDL для проектирования вычислительных устройств – К ЧП «Корнейчук», ООО «ТИД «ДС», 2003. – 208 с.
11. Petr I. Kravets, Tatyana I. Lukina, Valeriy A. Zherebko, Vladimir N. Shimkovich. Methods of Hardware and Software Realization of Adaptive Neural Network PID Controller on FPGA-Chip. // Journal of Automation and Information Sciences. New York, USA, 2011, Vol. 43 / Issue 4, P. 70-77.
12. Кравець П.І., Шимкович В.М., Зубенко Г.А. Технологія апаратно-програмної реалізації штучного нейрона та штучних нейронних мереж засобами FPGA / Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр. – К.: Век+, – 2012. – №55. – С.174-180.
13. Кравець П.І., Лукіна Т.Й., Шимкович В.М., Ткач І.І. Розробка та дослідження технології оцінювання показників нейромережевих моделей МІМО-об'єктів управління / Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр. – К.: Век+, – 2012. – №57. – С.144-150.
14. Кравець П.І., Шимкович В.Н. Метод оптимізації весових коефіцієнтів нейронних мереж з допомогою генетического алгоритма при реалізації на програмуємих логічєских інтегральних схемах / Международный научно-технический журнал «Электронное моделирование». – 2013. – 35, №3. – С. 65-75.
15. Кравець П.І., Шимкович В.М., Зубенко Г.А. Моделі штучних нейронних мереж при їх апаратно-програмній реалізації на FPGA / Сборник трудов XIV международной научной конференции им. Т.А.Таран «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2014», К., 14-16.05.14.
Кравець П.І., Шимкович В.М., Омельченко П. Нейромережеві компоненти систем керування динамічними об'єктами з їх апаратно-програмною реалізацією на FPGA / Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр. – К.: Век+, – 2013. – №59. – С.78-85.