

## ВИКОРИСТАННЯ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ АГРЕГАТИВ АВТОМОБІЛЯ

Гурко О.Г.<sup>1</sup>, Михалевич М. Г.<sup>1</sup>, Ярита О.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Наведено огляд розвитку систем керування пневматичною підвіскою, визначено сучасний стан розвитку та місце мехатронних модулів і каналів зв'язку в бортових системах керування колісних транспортних засобів. Представлено концепцію розподіленої системи керування пневматичною підвіскою колісних транспортних засобів визначених категорій з мехатронними модулями. Розглянуті складові компоненти та алгоритм роботи нової системи керування пневматичною підвіскою.*

***Ключові слова:** система керування, пневматична підвіска, мехатронний модуль, пневматичний балон, тиск.*

### Вступ

Останнім часом в автомобілебудуванні широке поширення набули керовані системи підресорювання [1]. Основною метою їх використання є усунення або згладжування недоліків пасивних систем підресорювання, що впливають на найважливіші експлуатаційні властивості колісних транспортних засобів (КТЗ).

Стрімкий розвиток цифрових технологій і, зокрема, мікроконтролерів та високошвидкісних цифрових мереж зв'язку, спонукає до удосконалення існуючих та створення нових бортових систем керування.

Тому на теперішній час залишається актуальною проблема стосовно створення прогресивної концепції системи керування пневматичною підвіскою КТЗ.

У статті розглянуті принципова схема, структура та складові керованої пневматичної підвіски КТЗ визначених категорій, а також алгоритм роботи системи керування нею на основі множини інтелектуальних мехатронних модулів, поєднаних швидкісним каналом передачі даних. Таким чином, буде запропонована нова концепція системи керування пневматичною підвіскою КТЗ.

### Аналіз публікацій

На початкових стадіях розвитку бортових систем керування КТЗ, відповідно до ступеню розвитку електронних компонентів та каналів зв'язку, застосовувалися пристрої, побудовані на аналоговому принципі отримання, обробки, контролю та передачі сигналів. Подальший розвиток електронних технологій дозволив використовувати в системах керування цифрові способи.

З точки зору керованості, існують пасивні, активні, напівактивні та адаптивні системи [2, 3]. У традиційних пасивних системах такі параметри підвіски як ступінь демпфування, жорсткість пружного елемента, висота кузова є постійними параметрами. На відміну від пасивних систем, активні та напівактивні системи дозволяють автоматично керувати своїми параметрами в залежності від стану руху та вимог водія за допомогою спеціального приводу.

Протягом декількох десятиліть пневматична підвіска з електронним керуванням широко застосовується у конструкції КТЗ. Сучасного вигляду система набула після публікації патенту на винахід щодо способу керування пневматичною підвіскою [4], а завдяки публікації технічного документу [5], що описує принципову схему, структуру та алгоритм роботи пневматичної підвіски з електронною системою керування, з'явилося визначення Electronically Controlled Air Suspension (ECAS) – пневматична підвіска з електронним керуванням.

На даний час більшість КТЗ оснащуються системою ECAS компанії WABCO VCS. Незважаючи на зміну декількох поколінь та часткового переходу до цифрової форми передачі даних між компонентами системи, ECAS збережено централізовану структуру системи керування.

У централізованій системі використовується центральний контролер, до якого комплексними каналами передачі інформації під'єднано декілька пасивних пристроїв. Така система важко розширюється. Централізована система керування має низьку надійність через велику кількість проводів. Внаслідок цього, збільшується сумарна про-

тяжність і перевантаженість каналів зв'язку, зростає ризик перешкод. Обрив або замикання одного проводу може призвести до повної відмови системи. Для таких систем важко забезпечити їх надійність на основі резервування апаратурної частини.

Різке зменшення габаритів сучасних електронних пристроїв, при одночасному підвищенні рівня їх функціональної насиченості, багато в чому змінило ідеологію побудови складних систем керування. Сучасні бортові системи керування являють собою високодинамічні системи, які можуть поєднувати в собі механічні, електричні, пневматичні елементи, утворюючи мехатронні модулі.

При застосуванні мехатронних модулів досить легко забезпечується їх інтеграція в систему керування завдяки використанню бортової мережі на основі послідовних цифрових інтерфейсів CAN, Profibus, Modbus, LIN, HART. [6, 7]

На сьогоднішній день спостерігається перехід від централізованих систем, в яких всі процеси керування реалізуються в єдиному центральному контролері, до розподілених систем - коли функції керування розподіляються між окремими компонентами. При цьому, кожен компонент є активним пристроєм (вузлом) і має свій власний локальний блок керування та обчислення для вирішення певної типової задачі.

Модернізація і розширення функціональних можливостей системи може здійснюватися за рахунок перезапису програми роботи контролерів окремих вузлів [8].

Таким чином, досягнення у сфері цифрових систем довели доцільність застосування мехатронних модулів в бортових системах керування КТЗ. Вони забезпечують можливість узгодженої взаємодії між окремими частинами системи.

### Мета та постановка задачі

Метою даної роботи є обґрунтування вибору концепції системи керування пневматичною підвіскою КТЗ визначених категорій та розгляд алгоритму її роботи.

Для цього необхідно проаналізувати алгоритм роботи існуючої та найбільш поширеної системи керування пневматичною підвіскою, виявити її позитивні та негативні властивості, сформулювати рекомендації щодо способів усунення недоліків, представити концепцію нової системи керування, розкрити характер алгоритму керування, та його можливий вплив на якість регулювання.

### Концепція кібер-фізичного моделювання роботи складних пристроїв та систем керування ними

Як було визначено раніше, одним з завдань даної роботи є розробка кібер-фізичної системи, що поєднуватиме в собі виконані на фізичному рівні електропневматичний механізм керування трансмісією та моделі елементів трансмісії та власне автомобіля. Це дозволить відпрацьовувати алгоритми керування елементом трансмісії (зчепленням або коробкою передач) в різних умовах без встановлення її на реальне транспортний засіб.

На даному, першому, етапі роботи необхідно відпрацювати процеси взаємодії кібернетичного та фізичного рівнів, побудувати та дослідити спрощені моделі системи керування трансмісією, щоб на їх базі побудувати більш розвинену кібер-фізичну систему.

У даному підрозділі у якості об'єкта дослідження будемо електропневматичний підсилювач (ЕПП) зчеплення, що складається з системи електромагнітний клапан (ЕМК) - пневмоциліндр - шток, якою керує електромагнітний клапан. Переміщення штока перетворюється в кут повороту, який вимірюється потенціометричним датчиком. Отже, кожному переміщенню  $x$  [мм] штока відповідає певне значення кута  $\alpha$  [градуси], що визначається датчиком. Електронний блок керування (ЕБК) повинен забезпечити задане лінійне переміщення штока  $x_3(t)$  [мм] (рис. 3.1).

Керуючий вплив  $u$  ЕБК представляє собою пілотний імпульс+ШІМ-утримання, у якому амплітуда змінюється від 0 В до 24 В.

Для рішення вказаного глобального завдання доцільно здійснити його декомпозицію на декілька більш простих завдань:

- побудова комп'ютерної моделі системи ЕМК - пневмоциліндр - шток;
- відпрацювання процесів взаємодії кібернетичного та фізичного рівнів;

- синтез закону керування для ЕБК для забезпечення позиціонування штока з заданою якістю перехідного та сталого режимів роботи.

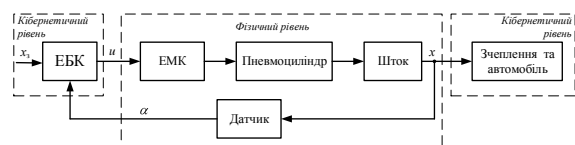


Рисунок 3.1 – Загальна структура кібер-фізичної системи керування зчепленням

Таким чином, у даній постановці завдань, кібернетичним рівнем буде виступати системи ЕМК - пневмоциліндр - шток, а фізичним – потенціометричний датчик кута повороту (рис. 3.2). Таке представлення дозволить вирішити два інших завдання, тобто відпрацювати процеси взаємодії кібернетичного та фізичного рівнів та синтезувати закон керування для ЕБК.

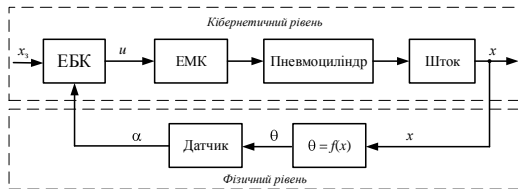


Рисунок 3.2 – Спрощена структура системи

У подальшому модель ЕМК - пневмоциліндр – шток буде реалізована на фізичному рівні у відповідності до рис. 3.1.

### 3.2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕМК-ПНЕВМОЦИЛІНДР-ШТОК

Будемо розглядати систему ЕМК-пневмоциліндр-шток як деяку чорну скриньку (рис. 3.3), входом якої є переміщення  $x_3(t)$  штока датчика положення педалі зчеплення, а виходом – переміщення штока  $x(t)$ .

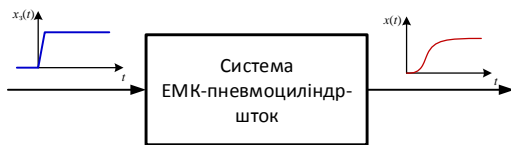


Рисунок 3.3 – Представлення системи ЕМК-пневмоциліндр-шток у вигляді чорної скриньки

В результаті проведення експериментів над реальним ЕПП зчеплення отримана залежність між його входом  $x_3(t)$  і виходом  $x(t)$  (рис. 3.4).

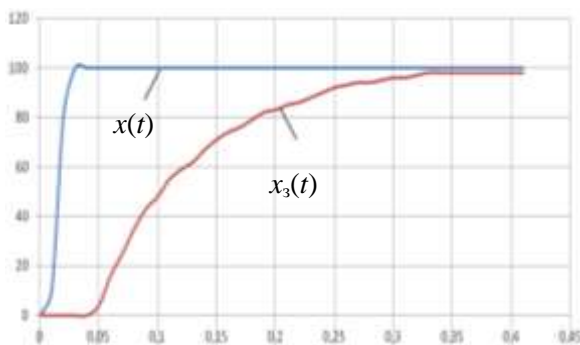


Рисунок 3.4 – Результати експериментальних випробувань ЕПП зчеплення

При проведенні експерименту здійснювалося переміщення  $x_3(t)$  педалі зчеплення в діапазоні від 0 до 100%, що відповідало діапазону від 0 до 23 мм переміщення штока датчика положення педалі зчеплення.

Як впливає з форми вихідного сигналу на рис. 3.4, розглянуту систему можна в першому наближенні описати у вигляді послідовного з'єднання аперіодичної ланки 1-го і ланки запізнювання, тобто

$$W(s) = \frac{k}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}, \quad (3.1)$$

де  $k$ ,  $T_1$  та  $\tau$  – коефіцієнт посилення, постійна часу та час запізнювання, відповідно, що підлягають ідентифікації.

Проте, можливо, що кращий результат надасть аперіодична ланка 2-го порядку):

$$W(s) = \frac{k}{T_2 s^2 + T_3 s + 1} e^{-\tau s}, \quad (3.2)$$

де  $T_2$  та  $T_3$  – коефіцієнти, що підлягають ідентифікації.

Розглянемо спочатку варіант (3.1), оскільки саме така модель широко використовується на практиці при наближеному описі динаміки аперіодичних систем навіть досить високого порядку [101]. З рис. 3.4 можна визначити наближені значення  $k$ ,  $T_1$  і  $\tau$ :  $k = 0,98$ ,  $T_1 = 0,06$  с (за критерієм 2% точності),  $\tau = 0,04$  с.

Ці значення можна уточнити за допомогою будь-якого з числових методів оптимізації, що дозволяють мінімізувати помилку між виходами реальної системи і її моделі на основі відомої інформації про входи і виходи реальної системи (рис. 3.5).

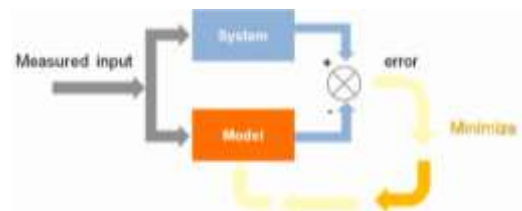


Рисунок 3.5 – Процедура ідентифікації моделі системи

Автоматизувати цю процедуру дозволяє додаток до пакета MATLAB System Identification Toolbox [102].

В результаті ідентифікації отримані наступні параметри передавальної функції:  $k = 0,98$ ,  $T_1 = 0,077$  с,  $\tau = 0,03$  с. Результат моделювання надано на рис. 3.6.

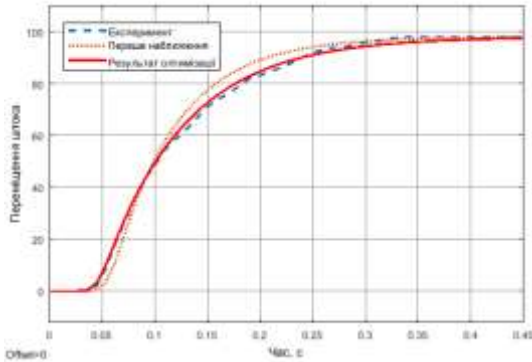


Рисунок 3.6 – Результат апроксимації ЕПП зчеплення системою 1-го порядку

При описі системи за допомогою залежності (3.2) отримані наступні значення параметрів:  $k = 0,98$ ,  $T_2 = 8,52 \cdot 10^{-5}$ ,  $T_3 = 0,079$ ,  $\tau = 0,03$  с. Як бачимо, значення параметрів  $k$  та  $\tau$  не змінилися, значення  $T_3$  незначно відрізняється від  $T_1$  у (3.1), а значення  $T_2$  достатньо мале, тому перехідна функція системи (3.2) практично не відрізняється від перехідної функції системи (3.1) (рис. 3.7).

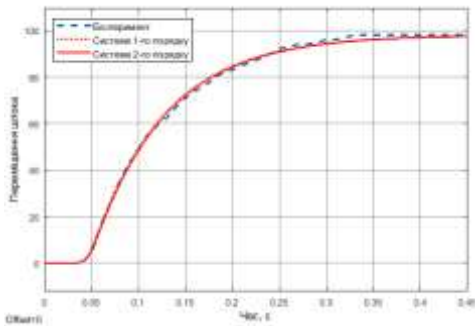


Рисунок 3.7 – Порівняння перехідних функцій системи 1-го та 2-го порядків

Таким чином, оскільки значення  $T_2$  дуже мале у порівнянні з  $T_3$  і ним можна знехтувати, а, в свою чергу,  $T_3 \approx T_1$ , то можна вважати, що система має 1-й порядок, тобто описується залежністю (3.1).

### 3.3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПЕРЕМІЩЕННЯ-КУТ ПОВОРОТУ

#### 3.3.1 Математична модель двигуна постійного струму

На даному етапі виконання роботи зв'язок між переміщенням  $x(t)$  штока віртуального пневмоцилиндра та кутом  $\alpha(t)$  повороту вала датчика (рис. 3.2), який потім перетво-

рюється у зміну напруги  $U_d(t)$ , реалізується за допомогою двигуна постійного струму (ДПС) з магнітоелектричним збудженням, тобто зі збудженням від постійних магнітів. Розглянемо ДПС з інерційним навантаженням (рис. 3.8), що керується по ланцюгу якоря. Керування ДПС зміною якірної напруги найкраще за лінійністю характеристик і за енергетичними показниками.

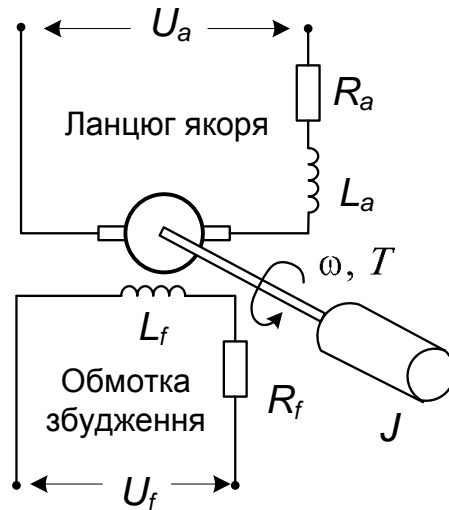


Рисунок 3.8 – Двигун постійного струму з навантаженням

ДПС умовно можна розбити на дві частини: електричну і механічну. Вхідною величиною електричної частини є напруга  $U_a(t)$ , що подається на якірну обмотку двигуна, а вихідною – електромагнітний момент  $\tau_m(t)$ , що розвивається двигуном. Для механічної частини входом є момент, а виходом – кутова швидкість  $\omega(t)$  інерційної маси.

Будемо розглядати ідеалізовану модель двигуна, зневажаючи такими другорядними ефектами, як гістерезис і падіння напруги на щітках, а також будемо вважати магнітне поле постійним.

На підставі другого закону Кірхгофа електрична частина двигуна описується наступним рівнянням

$$U_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e(t) \quad (3.3)$$

де  $R_a$  і  $L_a$  - опір і індуктивність ланцюга якоря, відповідно;  
 $i_a(t)$  – струм якоря;

$e(t)$  - протиЕРС, що виникає в обмотці якоря в результаті його обертання у магнітному полі.

У свою чергу, протиЕРС пропорційна швидкості  $\omega(t)$  обертання вала (якщо магнітний потік вважати постійним)

$$e(t) = K_e \cdot \omega(t), \quad (3.4)$$

де  $K_e$  – постійний коефіцієнт, що залежить від певних фізичних властивостей двигуна.

Двигун перетворює струм, що протікає в ланцюгу якоря, в обертовий момент  $\tau_m(t)$ , який, якщо магнітний потік вважати постійним, пропорційний струму якоря:

$$\tau_m(t) = K_m i_a(t), \quad (3.5)$$

де  $K_m$  – постійна якоря, яка залежить від фізичних властивостей двигуна, таких як напруженість магнітного поля, кількість витків дроту в котушці тощо.

З іншого боку, обертанню вала перешкоджають сила в'язкого тертя  $b\omega$  ( $b$  – коефіцієнт тертя) та збурюючий момент  $\tau_L(t)$ . Тоді, на підставі другого закону Ньютона, механічна частина двигуна описується наступним рівнянням:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = \tau_m - \tau_L(t) - b\omega, \quad (3.6)$$

де  $J$  - сумарний момент інерції якоря і навантаження,

У одиницях СІ константи  $K_m = K_e$ , тому ми будемо використовувати коефіцієнт  $K$  для представлення як постійної якоря двигуна, так і постійної протиЕРС. Зневажаємо також збурюючим моментом, тобто прийmemo  $\tau_L(t) = 0$ . Тоді, на підставі рівнянь (3.3) – (3.6), остаточно, запишемо

$$\begin{cases} L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) = U_a(t) - K\omega(t), \\ J \frac{d\omega(t)}{dt} + b\omega(t) = K i_a(t). \end{cases} \quad (3.7)$$

Так як модель системи пневмоциліндр - шток знайдена у вигляді передаточної функції, то доцільно модель ДПС також перетворити у передаточну функцію.

Застосувавши перетворення Лапласа наведені вище рівняння (3.7), можуть бути виражені через змінну Лапласа  $s$ :

$$(L_a s + R_a) I_a(s) = U_a(s) - K\Omega(s), \quad (3.8)$$

$$(Js + b)\Omega(s) = K I_a(s). \quad (3.9)$$

Виключивши з цих рівнянь  $I_a(s)$  одержимо передаточну функцію ДПС, якщо входом є напруга  $U_a(t)$  у ланцюгу якоря, а виходом – швидкість  $\omega(t)$  обертання вала:

$$W(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{K}{(L_a s + R_a)(Js + b) + K^2} \cdot \left[ \frac{\text{рад/с}}{\text{В}} \right]. \quad (3.10)$$

Однак, так як в даному випадку нас цікавить положення вала ДПС, розділимо наведену вище передаточну функцію  $W(s)$  на  $s$ :

$$G(s) = \frac{\Theta(s)}{U_a(s)} = \frac{K}{((L_a s + R_a)(Js + b) + K^2)s} \cdot \left[ \frac{\text{рад}}{\text{В}} \right]. \quad (3.11)$$

Передаточна функція (11) буде потрібна при синтезі регулятора, що забезпечить поворот вала ДПТ на потрібний кут у кіберфізичній системі (рис. 2).

3.3.2 Визначення зв'язку між переміщенням віртуального штока з кутом повороту ДПС

В якості датчика зворотного зв'язку в кіберфізичній системі керування зчепленням використовується потенціометричний датчик (рис. 3.9). У відповідності до рис. 3.2 поступальний рух  $x(t)$  моделі штока пневмоциліндра перетворюється у кут повороту  $\theta$  вала ДПС, що потім й вимірюється датчиком на рис. 3.9.



Рисунок 3.9 – Потенціометричний датчик кута повороту

В результаті проведення експериментів отримана залежність (рис. 3.10) між переміщенням  $x(t)$  штока реального пневмоциліндра та кутом  $\alpha(t)$  повороту вала потенціометричного датчика.

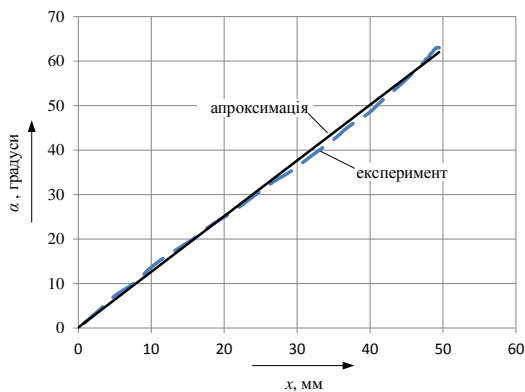


Рисунок 3.10 – Зв'язок між переміщенням  $x(t)$  штока пневмоциліндра та кутом  $\alpha(t)$  повороту вала датчика

Як видно з рис. 10 залежність  $\alpha = f(x)$  є практично лінійною та доволі добре описується наступним рівнянням

$$\alpha = 1,2502x + 0,1363. \quad (3.12)$$

Рівняння (12) доцільно використовувати для визначення кута повороту ДПС у кіберфізичній системі.

### 3.4 РОЗРОБКА КІБЕР-ФІЗИЧОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗЧЕПЛЕННЯМ

#### 3.4.1 Вибір програмно-апаратних засобів

Як зазначалося вище, під кібер-фізичною системою мається на увазі поєднання модельного рівня, що реалізовано за допомогою ЕОМ, із фізичним рівнем. На модельному рівні, як правило, реалізуються моделі складних об'єктів керування для відпрацювання та вдосконалення алгоритмів керування, що розробляються [103]. У разі досягнення алгоритмом поставленого завдання виконується автоматична генерація програмного коду для цільової платформи.

Частіше за все таке проектування проводять в середовищах LabVIEW компанії National Instruments і MATLAB/Simulink компанії Mathworks, у яких передбачені комунікаційні функції. Різні датчики і виконавчі пристрої можуть підключатися через COM порт або USB. Це дозволяє перейти від імітаційних моделей до гібридних, в яких поєднуються як моделі складних об'єктів, так і реальні фізичні пристрої. Однак використання зазначених функцій при необхідності реалізації протоколів обміну викликає певні труднощі, і до недавнього часу було доступно лише фахівцям вузького профілю, тому зустрічалося досить рідко.

Більш доцільно використовувати певну проміжну ланку між ЕОМ та апаратурою фізичного світу системи, що розробляється. Така проміжна ланка є мікропроцесорним пристроєм, що приймає сигнали від різноманітних датчиків, перетворює їх у цифровий код та передає до ЕОМ для подальшої обробки. ЕОМ, у свою чергу, виробляє керуючі сигнали на виконавчі пристрої, що реалізовані на фізичному рівні. Для передачі вказаних керуючих сигналів, вони також повинні бути прийняті та перетворені проміжним мікропроцесорним пристроєм. У якості такого мікропроцесорного пристрою у даній роботі використано Arduino.

Arduino – це мікропроцесорна платформа для проектування електронних пристроїв, що включає в себе як безпосередньо плати Arduino, так і програмне забезпечення для ЕОМ, а також периферійні плати, які можна підключати до основної плати Arduino. На платі Arduino є роз'єми для підключення зовнішніх пристроїв, а також роз'єм для зв'язку з ЕОМ, за яким і здійснюється програмування мікроконтролера. Особливості мікроконтролерів ATmega фірми Atmel, що використовуються на більшості плат Arduino, програмувати їх без застосування спеціальних програматорів.

Таким чином, Arduino дозволяє користувачеві зосередитися на розробці проєктів, а не на вивченні пристрою і принципів функціонування окремих елементів. Немає потреби і в створенні закінчених плат і модулів. Розробник може використовувати готові плати розширення або просто безпосередньо підключити до Arduino необхідні елементи. Всі інші зусилля будуть спрямовані на розробку і налагодження керуючої програми на мові високого рівня. Саме тому Arduino використовують не лише аматори, але й професіонали для швидкого прототипування.

Уніфіковані функції взаємодії з сервером на Arduino отримали підтримку в MATLAB шляхом розробки програми «Arduino Support from MATLAB». Нижче розглянуто реалізацію взаємозв'язку моделі ЕМК-пневмоциліндр-шток, виконаної у середовищі Simulink пакету MATLAB із фізичним світом у відповідності до рис. 3.2.

#### 3.4.2 Реалізація фізичного рівня

Як було зазначено у п. 1.3 на даному етапі виконання роботи зв'язок між переміщенням  $x(t)$  штока віртуального пневмоциліндра та кутом  $\alpha(t)$  повороту вала датчика (рис. 2) реалізується за допомогою ДПС, кут повороту якого вимірюється потенціометричним датчиком (рис. 9). Безпосередньо керування ДПТ, так само як і реєстрацію результатів виміру від потенціометричного датчика, здійснюватиме мікропроцесорна платформа Arduino.

Зазвичай ДПС споживають струм більше ніж може видати Arduino. Також вони створюють небезпечні викиди напруги, тому необхідно ізолювати ДПС від плати Arduino і живити його через окремий блок живлення. Чи безпечно керувати ДПС за допомогою ШІМ дозволяє використання транзистора, наприклад, 2N2222. Транзистор працює як простий електрично керований перемикач. Кожен біполярний транзистор має три контакти: емітер, базу та колектор. Між колектором і емітером тече великий струм, при малому струмі бази. Змінюючи струм бази, ми можемо регулювати струм через колектор-емітер і міняти швидкість обертання двигуна. Оскільки двигун має інерцію, швидке перемикання транзистора за допомогою ШІМ призведе до регулювання швидкості обертання.

Недоліком використання транзистора для керування ДПС є неможливість зміни напрямку його обертання. Щоб керувати напрям-

ком обертання ДПС без перепідключення живлення до його виводів.

Якщо розглядати принцип дії, то Н-міст є логічною схемою, що складається з чотирьох логічних елементів релейного або напівпровідникового типу та має два стани – відкритий та закритий. Попарною зміною станів цих елементів, можна змінювати напрямок руху струму а, отже, напрямок обертання вала ДПС. Н-міст можна зібрати, наприклад, за допомогою, MOSFET транзисторів, однак на ринку існують спеціалізовані мікросхеми Н-мостів. Вони з часом стають все дешевше і мають більше можливостей і більш безпечні. Однією з таких мікросхем Н-моста є мікросхема L298. L298 може керувати швидкістю і напрямком обертання ДПС і крокових двигунів, і може керувати двома двигунами одночасно. Допустимий струм для кожного з двигунів становить 2 А. Більше того, на ринку широко розповсюджені модулі на основі мікросхеми L298 (рис. 3.11). Використання такого модуля дозволяє мінімізувати кількість з'єднань та підвищити надійність системи.



Рисунок 3.11 – Модуль для керування моторами на базі мікросхеми L298N

Підключення ДПС через модуль L298N до плати Arduino наведено на рис. 3.12.

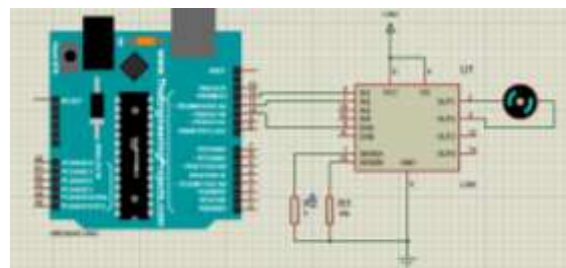


Рисунок 3.12 – Підключення ДПС до плати Arduino

Потенціометричний датчик підключається до аналогового порту A0 Arduino. Зовнішній

вигляд фізичної частини системи наведено на рис. 3.13.

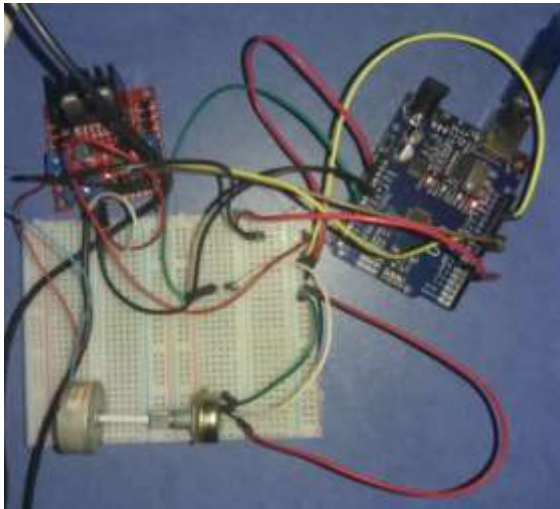


Рисунок 3.13 – Макет фізичної частини системи

### 3.4.3 Реалізація кібернетичного рівня

Програма для реалізації кібернетичного рівня системи реалізована у пакеті Simulink програмного комплексу MATLAB (рис. 3.14). Програма складається з наступних елементів.

1) Блок «Analog Input» – забезпечує прийом коду з аналогового виходу А0 мікропроцесорної платформи Arduino у діапазоні від 0 до 1023, які відповідають крайнім положенням вала потенціометричного датчика.

2) Блок «code\_2\_alpha» – забезпечує перерахунок коду, отриманого з потенціометричного датчика в кут повороту вала двигуна.

3) Блок «Clutch and Controller» – містить в собі:

- модель системи ЕМК-пневмоциліндр-шток, реалізованої за формулою (3.1) зі значеннями параметрів, визначеними у п. 3.2;

- П-регулятор, що забезпечує керування кутом повороту вала ДПС на підставі моделі (11) для імітації залежності  $\alpha = f(x)$ .

4) Блок «Motor» – забезпечує передачу керуючих впливів на цифрові виводи 9 та 10 Arduino.

5) Блок «Motor Speed» – встановлює швидкість обертання ДПС за допомогою ШІМ-сигналу. У нашому випадку швидкість задається постійною.

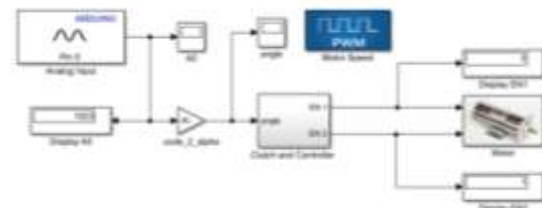


Рисунок 3.14 – Програмна частина системи

Працездатність та ефективність розробленої системи ілюструє рис. 3.15 на якому показана залежність кута повороту ДПС від часу. У якості завдання система повинна відпрацювати переміщення штока пневмоциліндра  $x(t) = 35$  мм, що відповідає куту повороту ДПС  $\theta = 45^\circ$  (рис. 10). Після стабілізації вихідного сигналу до вала двигуна прикладено збурюючі моменти, що відхиляли вал ДПС до  $35^\circ$  в обидві сторони. Як видно з рис. 15 навіть такі віλικі за модулем збурюючі моменти компенсуються впродовж менш ніж 2 с, ефективність розробленої системи керування.

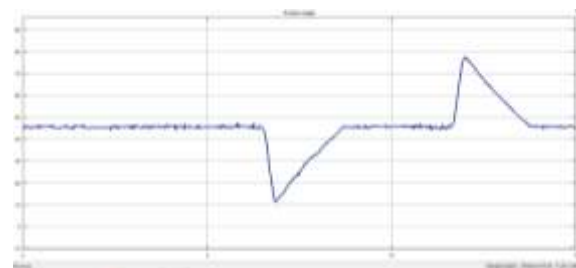


Рисунок 3.15 – Відпрацювання системою зовнішніх збурень

### Висновки

Запропоновано новий підхід до підвищення ефективності функціонування і забезпечення працездатності системи керування пневматичною підвіскою КТЗ на основі використання інформаційного мережевого середовища. На відміну від традиційного підходу, запропонований підхід має більшу ступінь гнучкості механізму його реалізації та функціонування.

Реалізовано перспективний метод контролю, моніторингу та підвищення ефективності функціонування бортової розподіленої системи керування пневматичною підвіскою КТЗ на основі організації автономних вузлів.

Запропонована система передбачає можливість модернізації існуючих КТЗ, не обладнаних електронними системами керування пневматичною підвіскою, із збереженням структури існуючого пневматичного приводу



з невеликою довжиною трубопроводів, за рахунок уніфікації місць кріплення механічного крану керування пневматичною підвіскою з кріпленням мехатронного модуля нової системи керування підвіскою.

Запропонована система дозволяє знизити витрати стисненого повітря через електропневматичні клапани в процесі експлуатації, менш чутлива до зміни зовнішніх кліматичних умов, більше захищена від помилкових спрацьовувань підчас дії випадкових факторів, не вимагає складного переналаштування в процесі ремонту, містить мінімальну кількість зовнішніх електричних контактів і пневматичних з'єднань. Це дозволяє рекомендувати її для використання на КТЗ визначеної категорії.

Порівняно з існуючою системою керування, реалізованою в системі ECAS WABCO, запропонована система забезпечує реалізацію основної функції керування пневматичною підвіскою та відомих додаткових функцій.

### Література

1. Акопян Р.А. Пневматическое поддресоривание автотранспортных средств (вопросы теории и практики). Ч.1. Львов: Вища школа, 1979. 218 с.
2. Fischer, D., Isermann R. Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions. Control Engineering Practice. 2004. Vol. 12. No. 11. p. 1353-1367.
3. Isermann, R. Mechatronic Systems: Fundamentals. London. Springer-Verlag, 2005. 624 p.
4. Schonfeld K., Geiger H., Hesse K., Electronically Controlled Air Suspension (ECAS) for Commercial Vehicles. SAE Technical Paper 912671, 1991. URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/912671/> (дата звернення 15.11.2020).
5. Patent № DE 3815612 A1. Method for controlling an air-assisted vehicle suspension. Оубл. 16.11.1989.
6. CAN application layer for industrial application. CiA, DS201-207, ver. 1.1. 1996. 182 p.
7. HART field communication protocol. Application guide HCF LIT 34. HART Communication Foundation, 1999. 80 p.
8. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Мехатронные модули. Расчёт и конструирование: Учебное пособие. Москва. МГТУ «Станкин». 2004. 360 с.
9. ECAS в грузовых автомобилях. Описание системы и инструкции по установке. URL: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/27/8150800273.pdf> (дата звернення 15.11.2020).
10. Электронная система управления уровнем пола (ECAS) для автобусов с пневматической подвеской. URL: [<http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/28/8150800283.pdf> \(дата звернення 15.11.2020\).](http://inform.wabco-</a></li></ol></div><div data-bbox=)

11. Пат. 144686 України. Система керування пневматичною підвіскою Оубл. 27.10.2020.

### References

1. Akopyan R.A. (1979). Pnevmaticheskoe podresorivanie avtotransportnyih sredstv (voprosy teorii i praktiki). [Pneumatic suspension of vehicles (theory and practice)]. Ch.1. Lvov: Vischa shkola, 1979. [in Russian]
2. Fischer, D., Isermann R. (2004). Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions. Control Engineering Practice. 12 (11). 1353-1367.
3. Isermann, R. (2005). Mechatronic Systems: Fundamentals. London. Springer-Verlag, 624 p.
4. Schonfeld K., Geiger H., Hesse K., (1991). Electronically Controlled Air Suspension (ECAS) for Commercial Vehicles. SAE Technical Paper 912671. URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/912671/> (access date: 15.11.2020).
5. Patent № DE 3815612 A1. (1989). Method for controlling an air-assisted vehicle suspension. publication. 16.11.1989.
6. CAN application layer for industrial application. (1996). CiA, DS201-207, ver. 1.1.
7. HART field communication protocol. (1999). Application guide HCF LIT 34. HART Communication Foundation.
8. Egorov O.D., Poduraev Yu.V. (2004). Mehatronnyie moduli. RaschYot i konstruirovanie. [Mechatronic modules. Calculation and design]. Uchebnoe posobie. Moskva. MGTU «Stankin». [in Russian]
9. ECAS v gruzovyih avtomobilyah. Opisaniie sistemyi i instruksii po ustanovke. [ECAS in trucks. Description of the system and installation instructions.]. URL: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/27/8150800273.pdf> (access date: 15.11.2020). [in Russian]
10. Elektronnyaya sistema upravleniya urovнем пола (ECAS) dlya avtobusov s pnevmaticheskoy podveskoy. [Electronic floor control system (ECAS) for buses with air suspension.]. URL: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/28/8150800283.pdf> (access date: 15.11.2020). [in Russian]
11. Pat. 144686 Ukrayini. Sistema keruvannya pnevmatichnoyu pidviskoyu [Pat. 144686 of Ukraine. Pneumatic suspension control system]. publication 27.10.2020. [in Ukrainian].

**Михалевич Микола Григорович<sup>1</sup>**, к.т.н., доц. каф. автомобілів ім. А.Б. Гредескула, [mkolyag@gmail.com](mailto:mkolyag@gmail.com), тел. +38 050-343-18-27,  
**Савченко Євген Лукич<sup>1</sup>**, аспірант, тел. +38 050-343-81-00, [ev.gentleman@ukr.net](mailto:ev.gentleman@ukr.net),

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

### Концепция системы управления пневматической подвеской КТС категории N<sub>3</sub>, M<sub>3</sub>

**Аннотация.** Приведен обзор систем управления пневматической подвеской, определено современное состояние бортовых системах управления колесных транспортных средств. Представлена концепция распределенной системы управления пневматической подвеской колесных транспортных средств с мехатронными модулями. Рассмотрены компоненты и алгоритм работы новой системы управления пневматической подвеской.

**Ключевые слова:** система управления, пневматическая подвеска, пневматический контур, пневматический баллон, давление.

Михалевич Николай Григорьевич<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. автомобилей им. А.Б. Гредескула, [mkoly-ag@gmail.com](mailto:mkoly-ag@gmail.com), тел. +38 050-343-18-27,

Савченко Евгений Лукич<sup>1</sup>, аспирант, тел. +38 050-343-81-00, [ev.gentleman@ukr.net](mailto:ev.gentleman@ukr.net),

Гармаш Антон Андреевич<sup>1</sup>, аспирант, [expertgaranto@gmail.com](mailto:expertgaranto@gmail.com), тел. +380997310390

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, м. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

### Air suspension control system concept for N<sub>3</sub>, M<sub>3</sub> category vehicles

**Abstract. Problem.** In the automotive industry, controlled suspension systems are widely used. At the initial stages of development of onboard control systems, in accordance with the degree of development of electronic components and communication channels, devices based on the analog principle of receiving, processing, monitoring and transmitting signals were used. The rapid development of digital technologies and, in particular, microcontrollers and high-speed digital communication channels, encourages the improvement of existing and the creation of new on-board control systems. At present, the problem of creating a progressive concept of the air suspension control system for wheeled vehicles of this category remains urgent. **Goal.** The purpose of the work is to substantiate the choice of the concept of

the control system of the air suspension for wheeled vehicles of a certain category and to consider the algorithm of its operation. **Methodology.** The perspective method of control, monitoring and increase of efficiency of functioning of the onboard distributed control system of a pneumatic suspension bracket of wheeled vehicles on the basis of the organization of autonomous knots is realized. **Results.** The schematic diagram, structure and components of the controlled air suspension of wheeled vehicles of a certain category, as well as the algorithm of the distributed control system based on a set of intelligent mechatronic modules connected by a high-speed data channel are presented. **Originality.** A new concept of the pneumatic suspension control system of wheeled vehicles is proposed. A new approach to improving the efficiency of operation and ensuring the efficiency of the control system of air suspension of wheeled vehicles based on the use of information network environment is proposed. Unlike the traditional approach, the proposed approach has a greater degree of flexibility in the mechanism of its implementation and operation. **Practical value.** The proposed system provides for the possibility of upgrading existing wheeled vehicles not equipped with electronic air suspension control systems, while maintaining the structure of the existing pneumatic drive with a short length of pipelines, by unifying the mounting points of the mechanical control valve.

**Key words:** control system, air suspension, air circuit, air cylinder, pressure.

Mikhalevich Mikolaii<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof., of the Department of Automobiles named after A.B. Gredeskul, [mkolyag@gmail.com](mailto:mkolyag@gmail.com), tel. +38 050-343-18-27,

Savchenko Ievhen<sup>1</sup>, graduate student, tel. +38 050-343-81-00, [ev.gentleman@ukr.net](mailto:ev.gentleman@ukr.net),

Harmash Anton<sup>1</sup>, graduate student, [expertgaranto@gmail.com](mailto:expertgaranto@gmail.com), tel. +380997310390

<sup>1</sup>Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.