

Гуменюк П.О., Лотиш В.В.  
*Луцький національний технічний університет*

## ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МАНЕВРНОСТІ АВТОПОЇЗДА

Розроблена самохідна масштабна модель автомобільного поїзда, що відтворює автопоїзд у складі автомобіля-тягача КамАЗ-6460 і тривісний напівпричіп Schmitz Cargobull AG 24/LZG з керованою задньою віссю. Модель обладнана необхідною контрольно-вимірювальною апаратурою.

**Ключові слова:** автопоїзд, маневреність, фізична модель, програмування.

**Постановка проблеми.** Метою експериментальних досліджень явилася розробка самохідної масштабної моделі автомобільного поїзда для перевірки адекватності математичної моделі і вихідних положень, покладених в основу розрахунку параметрів автомобіля-тягача КамАЗ-6460.

У зв'язку з цим **метою роботи** є отримання фізичної моделі для експериментального дослідження кінематичних параметрів і відхилень траєкторій ланок при сталому круговому русі, поворотах на  $90^\circ$ , на  $180^\circ$  (розворот), зміні смуги руху як при русі вперед, так і заднім ходом.

**Результати досліджень.** Моделювання представляє один з основних методів пізнання, є формою відображення дійсності і полягає в дослідженні властивостей реальних об'єктів, процесів, явищ або з допомогою абстрактного опису.

Фізичною моделлю є зменшена копія об'єкта дослідження, наділена тими ж фізичними властивостями, що і оригінал. Для фізичної моделі не обов'язкова модель математична, отже спрощуються розрахунки, а дані можна отримувати напряму з об'єкта дослідження, використовуючи датчики, записуючі елементи і т.п., а рух задавати виконавчими пристроями. Разом з тим, точність результатів залежить від точності копіювання оригіналу.

При інтегруванні комп'ютерних елементів у системи керування та безпеки транспортних засобів постановка реального експерименту зазвичай непрактична. Наприклад, для перевірки рішень і контролюючих алгоритмів додатків інтелектуальних транспортних систем потрібно було б кілька автомобілів і водіїв, для чого необхідно було б знайти площу для маневрів, кошти на ремонт машин у випадку проблем реалізації алгоритмів і сам експеримент становив би загрозу здоров'ю і життю людей. Тому для проведення експерименту було створено тестовий стенд, що використовує масштабовану копію реального автомобіля.

Модель автомобільного поїзда складається із моделі автомобіля-тягача і напівпричепа [1]. Базою для моделі тягача було обрано сидельний тягач КамАЗ-6460. Це автомобіль з колісною формулою 6x4. Його споряджена маса 9350 кг, допустиме навантаження на сидельно-зчипний пристрій 16500 кг. Повна довжина складає 6580 мм, колія 2550 мм, відстань між першою і другою віссю 3020 мм, між другою і третьою 1430 мм, висота сидла 1300 мм, шини 315/80 R22,5.

Основою для розрахунку моделі напівпричепа є тривісний напівпричіп Schmitz Cargobull AG 24/LZG з керованою задньою віссю. Довжина його кузова 13410 мм, колісна база 8075 мм, відстань від першої до другої осі 1310 мм, від другої до третьої – 1810 мм, колія 2425 мм, загальна ширина 2600 мм, висота зчипки 1150 мм, шини 385/65 R22,5. Повна маса автопоїзда 36 т.

Для розробки моделі перш за все потрібно визначити розмірність елементів (розмірна чи безрозмірна величина) і похідність (які величини будуть прийняті за базові, а які можна визначити з інших). Для вивчення механічних явищ достатньо ввести три основні одиниці виміру: для довжини, маси або сили і часу. Залежність одиниці виміру похідної величини від одиниць виміру базових величин можна представити у вигляді формули розмірності. Для визначення фізичної подібності найбільше поширена на даний час система розмірності СГС (названа за розмірностями базових величин сантиметр, грам, секунда) [2]. У даній системі розмірності всіх фізичних величин мають вигляд степеневого одночлена:

$$L^l M^m T^t \quad (1)$$

При розрахунку подібності прийнято використовувати  $\pi$ -теорему, згідно з якою для побудови моделі необхідно і достатньо  $p=n-k$  безрозмірних величин, де  $n$  – кількість фізичних змінних, які описуються за допомогою  $k$  фундаментальних фізичних величин. З  $\pi$ -теореми випливає, що якщо дві

динамічні системи описані однаковими диференціальними рівняннями, то рішення диференціальних рівнянь буде масштабно незмінним при тих самих  $\pi$  групах. Щоб модель була динамічно подібна до оригіналу, величини цих  $\pi$  груп повинні бути однакові для обох систем. Базуючись на цій ідеї, можна підібрати параметри моделі, відповідні реальним.

Масштаб для зменшення 1:20. Довжина шасі реального і зменшеного автомобіля є фіксованою. Повна довжина моделі тягача 330 мм, колісна база 150 мм, відстань між середньою і задньою осями 70 мм, колія 125 мм, висота сидла 65 мм. Повна довжина напівпричепа 670 мм, відстань від точки зчеплення з тягачем до першої осі 404 мм, від першої до другої осі 65 мм, від другої осі до задньої, керованої 90 мм, від третьої осі до кінця причепа 96 мм, колія 120 мм. Розмір шин моделі розраховується прирівнюванням  $\pi$  групи, що відповідає розміру шин зменшеної копії, до  $\pi$  групи реального автомобіля, що є

$$(R/l)_{\text{оригіналу}} = (R/l)_{\text{моделі}} \quad (2)$$

Розмір шин тягача 315/80 R22,5; напівпричіп використовує шини 385/65 R22,5. Підставляючи значення оригіналу, отримуємо  $R_{\text{моделі}} = 52$  мм. Ширина шин моделі тягача 16 мм, напівпричепа 20 мм. Для обчислення маси моделі припускаємо, що густина моделі і оригіналу однакова, тоді з подібності

$$(\rho l^3/m)_{\text{моделі}} = (\rho l^3/m)_{\text{оригіналу}} \quad (3)$$

отримуємо споряджену масу моделі тягача 1,17 кг, масу моделі напівпричепа при максимальному завантаженні 4,5 кг.

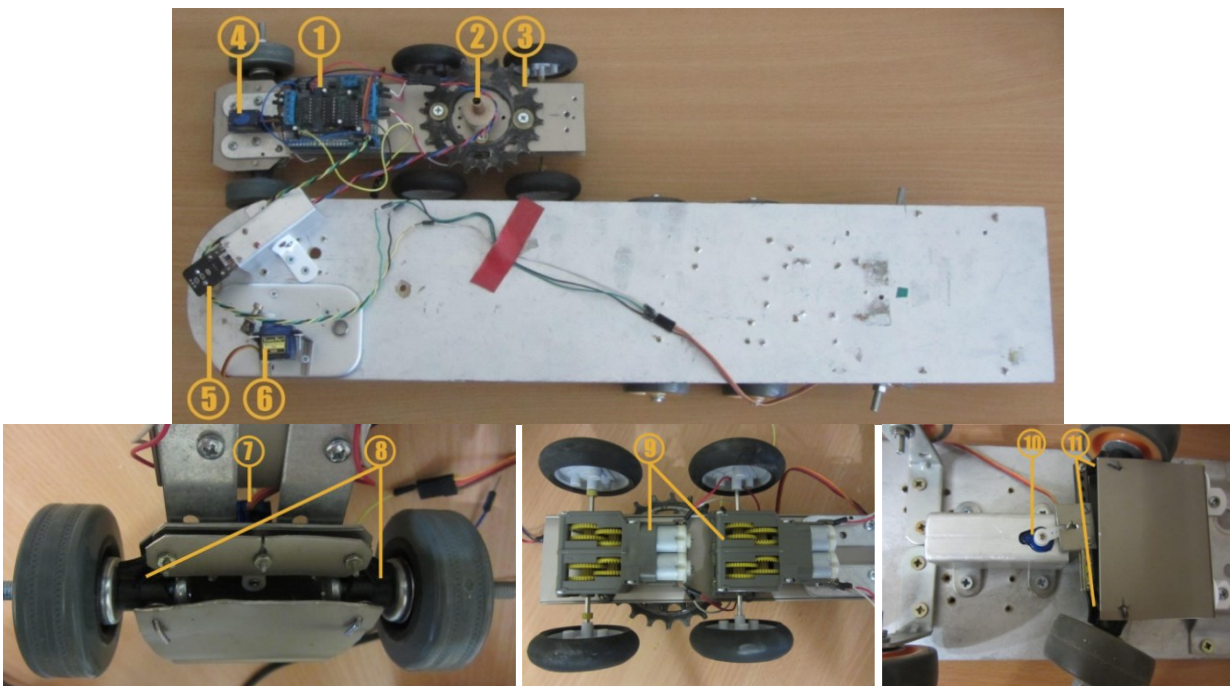


Рис. 1. Основні елементи моделі:

1 – контролер Arduino з платою MotorShield; 2 – зчпний пристрій; 3 – пристрій для блокування кута складання; 4, 7 – сервопривід для управління керованою віссю моделі тягача; 5 – датчик кута повороту; 6 – сервопривід пристрою блокування кута складання; 8, 11 – поворотні кулаки керованих осей; 9 – електромотори з редукторами; 10 – сервопривід для управління керованою віссю моделі напівпричепа.

Рама тягача зроблена з алюмінієвих пластин товщиною 2 мм. Даний матеріал легко піддається обробці, дозволяє швидко і просто замінити елементи, а також підгонку отворів для кріплення зчитуючих пристроїв. Для керованої осі з наявних коліс було обрано найбільш підходящі за розмірами, їхня ширина становить  $d=17$  мм, радіус  $R=50$  мм. Поворотом керує сервопривід TowerPro SG90, який приводить у рух поздовжню тягу рульової трапеції, котра, у свою чергу, повертає пластмасові поворотні кулаки із болтами, що виконують роль півосей, - таким чином задається кут  $\gamma_0$ . Рульова трапеція виконана із алюмінієвої пластини товщиною 1 мм із вузьким поперечним отвором

для перетворення обертового руху вала сервопривода у поступальний рух трапеції. Модель приводиться у рух двома електромоторами, від яких крутний момент передається через редуктор Dual Motor GearBox на півосі. Редуктор складається з чотирьох шестерень на кожну піввісь, одна з яких входить у зчеплення з шестернею на моторі. Дана система залежно від розміщення шестерень дозволяє отримати передатне відношення 203:1 або 58:1 при максимальній потужності мотора 12,6 Вт і швидкості обертання 12300 об/хв. Редуктори встановлено на другу і третю осі тягача, таким чином модель має колісну формулу 6x4. Шини ведучих осей мають діаметр 58 мм і ширину 15 мм, оскільки це найближча подібність до потрібних розмірів серед наявних коліс, що запресовані під використовуваний редуктором шестигранні 3 мм осі виробництва Tamiya. Зчипний пристрій зроблено з алюмінієвої трубки, у яку вставляється шворінь напівпричепа. Маса тягача становить 0,7 кг, тому при проведенні заїздів використовується додаткове навантаження 0,5 кг на передній частині моделі.

Модель напівпричепа виконано із МДФ з використанням алюмінієвих кріплень. Передній звис укорочений через габарити керівних плат, що розміщені на тягачі. Зчипним шворнем виступає датчик кута повороту V1, що використовується для вимірювання кута складання  $\gamma_1$ . На напівпричепі використовуються колеса з шинами шириною  $d = 20$  мм і радіусом  $R = 50$  мм.

Колеса першої і другої осей жорстко закріплені, третя вісь керована. Принцип керування аналогічний керованій осі тягача: обертовий рух сервопривода перетворюється у поступальний рух рульової трапеції, котра обертає поворотні кулаки з півосями і задає величину  $\gamma_1$ . Площа платформи напівпричепа дозволяє використовувати потрібне додаткове навантаження. Модель обладнана необхідною контрольно-вимірною і реєструючою апаратурою [3 - 6].

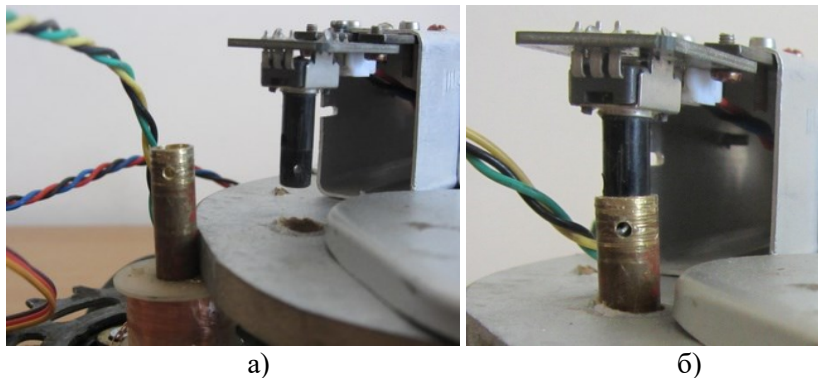


Рис.2. Точка зчипки у роз'єднаному (а) та з'єднаному (б) вигляді

Зважаючи на те, що модель розроблялася для оцінки маневрених властивостей автопоїзда за розробленого закону управління на задню вісь напівпричепа при русі з невеликою швидкістю і русі заднім ходом, елементи підвіски не моделювались.

Для дослідження руху заднім ходом у моделі реалізовано механізм блокування кута складання, що складається із двох частин: на моделі тягача нерухомо розміщена зірка велосипедної передачі, на напівпричепі знаходиться запірний елемент, що приводиться у рух сервоприводом. Коли контролер посилає сигнал блокування, сервопривід опускає запірний елемент між зубці зірки і кут складання блокується. Для розблокування сервопривід піднімає запірний елемент.

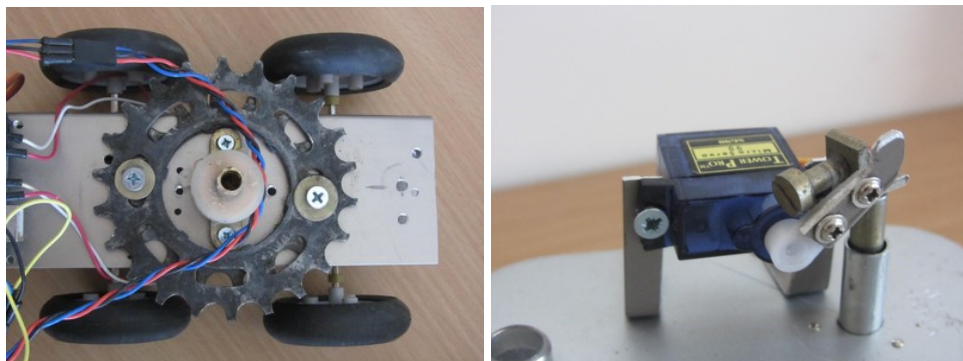


Рис.3. Механізм блокування кута складання:  
а) - зірка, жорстко закріплена у точці зчипки на тягачеві;  
б) – запірний механізм, розміщений на напівпричепові



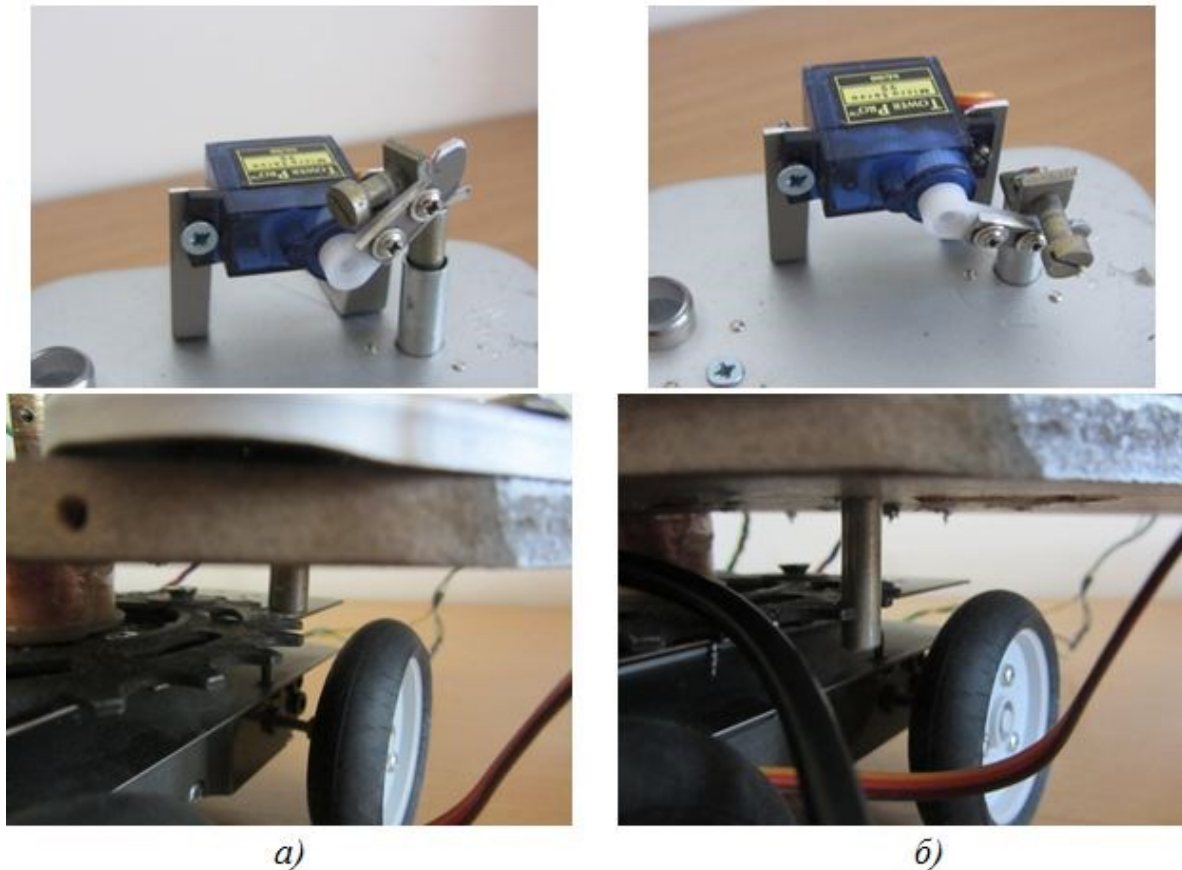


Рис.4. Розблоковане (а) та заблоковане (б) положення елементів механізму блокування кута складання

**Виконавчі елементи моделі** - контролер Arduino Uno, сервопривід Mini Servo SG-90, плата розширення Arduino Motor Shield L293D, редуктор Dual Motor GearBox, аналоговий датчик обертання V1, інфрачервоний датчик вимірювання відстані GP2Y0A21.

Arduino Uno це апаратна плата, побудована на базі мікроконтролера ATmega328. Платформа має 14 цифрових входів/виходів (6 з яких можуть використовуватись як виходи ШІМ), 6 аналогових входів, кварцовий генератор 16МГц, роз'єм USB, силовий роз'єм, роз'єм ICSP та кнопку перезавантаження. Для роботи необхідно підключити платформу до комп'ютера за допомогою кабелю USB, або подати живлення за допомогою адаптера AC/DC або батареї.

У фізичній моделі для повороту керованих коліс використовується сервопривід Mini Servo SG-90. Даний пристрій підключається по трипровідній схемі. Один провідник (чорний або коричневий) приєднується на землю (GND), живлення (червоний провідник) на +5 V, і ще один провідник, по якому передаються сигнали (оранжевий або жовтий) підключається до одного із виходів контролера Arduino Uno.

Плата розширення Arduino Motor Shield виготовлена на основі мікросхеми L293, що є подвійним повномостовим драйвером, розробленим для керування індуктивними навантаженнями, такими як реле, соленоїди, сервоприводи, двигуни постійного струму і крокові двигуни. Вона дозволяє керувати чотирма двигунами постійного струму за допомогою плати Arduino, незалежно регулюючи швидкість і напрям кожного з них.

Редуктор Dual Motor GearBox, представляє собою подвійну коробку передач виробництва Tamiya. Даний редуктор може керувати двома колесами у прямому чи зворотному напрямі. Можливі два варіанти співвідношення передач - 58:1 і 203:1. Двигуни працюють від напруги 3-6В.

Аналоговий датчик обертання V1 Arduino – сумісний датчик обертання, максимальний кут повороту 300°, точність вимірів 0,2°. У даній системі використовується для визначення кута складання між тягачем і напівпричепом. Підключення датчика відбувається по трьох контактах: на живлення 5В, на землю і на аналоговий вхід мікроконтролера. У моделі автопоїзда датчик обертання жорстко закріплений на напівпричепові, а його обертальний елемент відіграє роль шворня, що вставляється у зчпний пристрій

тягача і фіксується у ньому. Під час руху положення ручки датчика відповідає напрямку тягача, а положення плати – напрямку причепа. Таким чином, покази датчика рівні куту складання автопоїзда.

Для вимірювання швидкості перед виконанням маневру використано інфрачервоний датчик GP2Y0A21. Принцип роботи датчика полягає у генеруванні і прийнятті відбитих інфрачервоних імпульсів. Світлодіодна схема генерує інфрачервоні імпульси, які відбиваються від об'єкта і потрапляють на модуль обробки вхідного сигналу з фотоелементом, який генерує вихідну величину від 0 до 3,5В. Програмно вихідна величина може бути переведена у розмірність відстані. Діапазон вимірювання датчика від 0,1 до 0,8 м, час відклику 38мс, робоча напруга 5В.

Датчик визначає відстань до найближчої перешкоди, після чого починає прямолінійний рух протягом наперед заданого проміжку часу. Після зупинки знову вимірюється відстань до перешкоди і, маючи відстань, пройдено за певний час, розраховується швидкість моделі.

Оскільки частота обертання моторів редуктора є сталою, тому достатньо визначити швидкість один раз перед проведенням маневру або при зміні вказаних вище значущих умов.

**Програмне забезпечення.** Скетч записаний безпосередньо у мікроконтролер Arduino, після успішної компіляції програма керування моделлю передається у процесор засобами віртуального СОМ-порта. Він дозволяє діалог із користувачем, котрий вводить команди із клавіатури для виконання руху, поворот коліс чи певних маневрів. Дані про кути повороту керованих коліс, кут складання, напрям і сторону руху виводяться один раз на дві секунди.

У програмі керування використовуються дві зовнішні бібліотеки: AFMotor.h і Servo.h для роботи моторної плати із двигунами постійного струму і сервоприводами відповідно. Бібліотека AFMotor.h дозволяє задати частоту мотора 1, 2, 4, 8, 16 або 64 КГц. У даному випадку встановлено 8 КГц на обидва мотори.

У функції setup ініціалізуються змінні, визначаються режими роботи виводів, встановлюється тип з'єднання і т.п. Для виведення отриманих даних на екран використовується послідовне з'єднання серійного порту. Його швидкість може бути 300, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600 або 115200 біт/с, для даного випадку достатньо з'єднання на 9600 біт/с. Функція setup викликається при запуску скетча, тому в ній також обнуляються масиви даних руху і таймери, встановлюються початкові кути повороту керованих осей.

Функція data використовується для виведення на екран і/або запису даних про рух моделі у форматі, зручному для подальшої обробки. Всього виводиться 6 величин: час від початку роботи контролера у секундах, кути повороту коліс керованих осей (передньої у тягача і задньої у напівпричепа) в градусах, кут складання, напрям руху автопоїзда і напрям повороту. Таймер роботи контролера дозволяє записувати час безперервної роботи контролера до 50 днів, чого достатньо для розглядуваних задач.

Функція Key використовується для обробки вхідної команди з клавіатури і генерування вихідної команди відповідно до запиту. Описані команди: вирівнювання керованих коліс, поворот вправо і вліво керованих коліс тягача і причепа окремо, встановлення напрямку руху вперед-назад або зупинка, вимірювання поточної швидкості, виконання маневру кола, повороту на 90° або переставки.

Функція loop викликається після функції setup і циклічно виконує всі описані в ній оператори. В ній прописані виклики всіх інших функцій і встановлена частота виведення отриманих даних 2с.

Вбудований у середовище розробки монітор дозволяє реалізувати зворотній зв'язок із платою у процесі виконання програми. Можлива передача команд процесору, а також зчитування і відображення даних. Разом з тим, серійний монітор не має графічної оболонки чи механізму збереження відображуваних даних.

Для полегшення роботи з моделлю і нарощування її функціональності було розроблено Windows-сумісний додаток, написаний мовою Delphi. Застосовуючи даний додаток, керування моделлю здійснюється через панель управління натисканням на відповідні кнопки замість введення команди із клавіатури, що зручніше і економить час користувача.

**Висновки.** Розроблена самохідна масштабна модель автомобільного поїзда, що відтворює автопоїзд у складі автомобіля-тягача КамАЗ-6460 і тривісний напівпричіп Schmitz Cargobull AG 24/LZG з керованою задньою віссю. Модель обладнана необхідною контрольно-вимірювальною апаратурою.

1. Седов А.В. Моделирование объектов с дискретно-распределенными параметрами. – М.:Наука. – 2010.
2. Гуменюк П.О. Апаратне забезпечення системи моніторингу автоперевезень /П.О.Гуменюк, В.В.Лотиш //Луцький національний технічний університет: Наукові нотатки. – Луцьк. – 2010. – С. 169-171.
- 3.Сахно В.П. До вибору приводу управління напівпричепом довгобазового автопоїзда-контейнеровоза /В.П.Сахно, Р.М.Марчук, В.М. Сондак, П.О.Гуменюк // Автошляховик України. Вісник центрального наукового центру транспортної академії України. - №14, 2011. – с.87-90.

4.Гуменюк П.О. Програмне забезпечення для керування фізичною моделлю багатоланкового транспортного засобу /П.О.Гуменюк, В.В.Лотиш //Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць. Серія Машиноприладобудування та транспорт. Випуск 142/2013. – С. 23 - 26.

5.Лотиш В.В. Методологія застосування модельно-базового дизайну для розробки системи ESP /В.В.Лотиш, П.О.Гуменюк //LXVIII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. Київ.: НТУ. - 2012. - С.46.

6.Гуменюк П.О. Система управління автомобільного поїзда /П.О.Гуменюк //LXVII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. Київ. НТУ. 2013.

7.Сахно В.П. До розробки алгоритму управління напівприцепом сідельного автопоїзда /В.П.Сахно, В.М.Босенко, П.О.Гуменюк // Вісник Національного транспортного університету.- К.: НТУ, 2013.- Випуск 26.

## REFERENCES

1. Sedov, A.V. (2010). *Modeling objects with discrete distributed parameters*. Moscow, Science Publ.
2. Gumeniuk, P. & Lotysh, V. (2010). Hardware for monitoring transportation systems. *Naukovi Notatky, Lutsk*. pp. 169-171.
- 3.Sakhno, V., Marchuk, R., Sondak, V. & Gumeniuk, P. (2011). Selection of control of long-base container trailer. *Avtoshliakhovyk Ukrainy. Visnyk tseentralnoho naukovoho tsentru transportnoi akademii Ukrainy*, No. 14, pp.87-90.
4. Gumeniuk, P. & Lotysh, V. (2013). Software to manage model of multi-link physical vehicle. *Bulletin of SevNTU. Collected Works. Series Instrumentation and Transport*. Issue 142, pp. 23 - 26.
5. Lotysh, V. & Gumeniuk, P. (2012). Methodology of use of model-base design for the development of ESP. *LXVIII Scientific conference of faculty members, graduate students and employees of structural subdivisions University*. Kyiv, National Transport University, pp. 46.
6. Gumeniuk, P. 2013. Control system of road vehicle. *LXVII Scientific conference of faculty members, graduate students and employees of structural subdivisions University*. Kyiv, National Transport University.
7. Sakhno V. Bosenko, V. & Gumeniuk, P. (2013). By developing the control algorithm for semitrailer truck train. *Bulletin of the National Transport University*. Kyiv, National Transport University, Issue 26.

### **Гуменюк П.О., Лотиш В.В., Физическая модель для исследования маневренности автопоезда.**

Разработана самоходная масштабная модель автомобильного поезда воспроизводящая автопоезд в составе автомобиля-тягача КамАЗ-6460 и трехосного полуприцепа Schmitz Cargobull AG 24/LZG с управляемой задней осью. Модель оборудована необходимой контрольно-измерительной аппаратурой.

**Ключевые слова:** автопоезд, маневренность, физическая модель, программирование..

### **Gumeniuk P.O., Lotysh V.V., Physical model for the study of road train maneuverability.**

Developed a scale model of a road train including truck KamAZ-6460 and three-axle semi-trailer Schmitz Cargobull AG 24/LZG with a controlled rear axle. The model is equipped with the necessary test equipment.

**Keywords:** trailer, maneuverability, physical model, programming.

## **АВТОРИ:**

**ЛОТИШ Володимир Вячеславович**, к.т.н., доцент кафедри автоматизованого управління виробничими процесами Луцького НТУ, e-mail: admin@lntu.edu.ua

**ГУМЕНЮК Павло Олександрович**, к.т.н., асистент кафедри автоматизованого управління виробничими процесами Луцького НТУ, e-mail: nacacom@gmail.com

## **AUTHORS:**

**Volodymyr LOTYSH**, Ph.D. in Engineering, Assoc. Professor of the Automated Management of Production Processes Department, Lutsk National Technical University; e-mail: admin@lntu.edu.ua

**Pavlo HUMENIUK**, Ph.D. in Engineering, Professor Assistant of the Automated Management of Production Processes Department, Lutsk National Technical University; e-mail: nacacom@gmail.com

Стаття надійшла в редакцію 14.04.2016р.