

DOI: 10.30977/VEIT.2021.20.0

ISSN: 2226-9266



АВТОМОБІЛЬ І ЕЛЕКТРОНІКА СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ



**ЕЛЕКТРОННЕ НАУКОВЕ
СПЕЦІАЛІЗОВАНЕ
ВИДАННЯ**

ВИПУСК



ХАРКІВ

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Кафедра автомобільної електроніки

Автомобіль і Електроніка. Сучасні Технології

**Електронне наукове фахове видання
(друкована версія)**

20/2021

**Vehicle and Electronics.
Innovative Technologies**
Electronic scientific professional edition
(printed version)

ISSN: 2226-9266

DOI: 10.30977/VEIT.2021.20.0

Харків 2021

Журнал засновано в 2011 р. кафедрою Автомобільної електроніки, Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

ISSN: 2226-9266

DOI: 10.30977/VEIT.2021.20.0

Випуск сформовано 30.11.2021.

В журналі публікуються матеріали теоретичних та практичних досліджень присвячених перспективним напрямкам розвитку автомобільної електроніки, впровадженню та удосконаленню гібридних автомобілів та електромобілів, моделюванню транспортних процесів і систем, інформаційним технологіям й інтелектуальним системам на транспорті, сучасним технологіям діагностики систем і агрегатів транспортних засобів, а також методичним дослідженням підготовки спеціалістів у сфері транспорту.

Журнал також включає матеріали доповідей учасників Всеукраїнської науково-методичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку вищої освіти в Україні».

Затверджено: Вченою радою університету від 25.03.2011, протокол № 8

Журнал включено до **Переліку електронних наукових фахових видань України, категорія «Б» за спеціальностями – 113, 121, 122, 133, 151, 274, 275**, наказом Міністерства освіти і науки України № 612 від 07.05.2019 та **141, 142**, наказом Міністерства освіти і науки України № 975 від 11.07.2019.

Спеціальності: 113 - Прикладна математика
 121 - Інженерія програмного забезпечення
 122 - Комп'ютерні науки
 133 - Галузеве машинобудування
 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
 274 - Автомобільний транспорт
 275 - Транспортні технології (за видами)
 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 142 - Енергетичне машинобудування

Редакційна колегія

Головний редактор: Дзюбенко Олександр Андрійович, к.т.н., доц.

Заступник головного редактора: Аргун Щасяна Валіковна, д.т.н., проф.

Відповідальний секретар: Трунова Ірина Сергіївна, к.т.н., доц.

Члени редколегії: Абрамчук Ф. І. (д-р техн. наук, проф.), Алексієв О. П. (д-р техн. наук, проф.), Бажинов О. В. (д-р техн. наук, проф.), Батигін Ю. В. (д-р техн. наук, проф.), Богаєвський О. Б. (д-р техн. наук, проф.), Богомолов В. О. (д-р техн. наук, проф.), Вдовиченко В. О. (канд. техн. наук, доц.), Волков В. П. (д-р техн. наук, проф.), Воронков О. І. (д-р техн. наук, проф.), Врублевський О. М. (д-р техн. наук, проф.), Гнатів А. В. (д-р техн. наук, проф.), Гурко О. Г. (д-р техн. наук, проф.), Горбачов П. Ф. (д-р техн. наук, проф.), Двадненко В. Я. (д-р техн. наук, проф.), Далека В. Х. (д-р техн. наук, проф.), Клименко В. І. (д-р техн. наук, проф.), Клец Д. М. (д-р техн. наук, проф.), Колодязний В. М. (д-р фіз.-мат. наук, проф.), Корогодський В. А. (д-р техн. наук, проф.), Мигаль В. Д. (д-р техн. наук, проф.), Михалеви́ч М. Г. (канд. техн. наук, доц.), Наглюк І. С. (д-р техн. наук, проф.), Нагорний Є. В. (д-р техн. наук, проф.), Ніконов О. Я. (д-р техн. наук, проф.), Подригало М. А. (д-р техн. наук, проф.), Полянський О. С. (д-р техн. наук, проф.), Сарасєв О. В. (д-р техн. наук, проф.), Смирнов О. П. (д-р техн. наук, проф.), Солодов В. Г. (д-р техн. наук, проф.), Тропіна А. А. (д-р техн. наук, проф.), Чаплигін Є. О. (канд. техн. наук, доц.), Шуклінов С. М. (д-р техн. наук, проф.), Янютін Є. Г. (д-р техн. наук, проф.)

Адреса редакції: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Автомобільний факультет, Кафедра автомобільної електроніки, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002,

Тел.: (057) 707-36-96;

e-mail: ae.hnadu@gmail.com

Статті друкуються в авторській редакції. Редакція не несе відповідальності за орфографічні, стилістичні чи інші помилки, допущені автором публікації.

ЗМІСТ

**ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ І ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ**

С. В. Войтків <i>Методика оптимізації основних технічних параметрів перспективних міських електробусів типу ОНС.....</i>	6-16
А. Гнатов, Щ. Аргун, Р. Багач, Г. Гнатова, В. Тарасова, О. Ручка <i>Аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем.....</i>	17-26

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМИ
СИСТЕМАМИ. СИНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ЕКОМОБІЛІВ**

О. Гурко, О. Сергієнко, Л. Лінднер <i>Робастна система позиціонування лазера в системі машинного зору мобільного робота (англ.).....</i>	27-36
---	-------

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ В АВТОМОБІЛЕБУДУВАННІ
І ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ**

І. Г. Ільге <i>Метод вибору системи автоматичного управління автогрейдера.....</i>	37-44
О. Осетров, Б. Чучуменко <i>Моделювання впливу параметрів легкового автомобіля на процес його розгону.....</i>	45-53

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

А. В. Гайдамака, Ю. Д. Музикін, В. В. Клітної <i>Експертні дослідження порушень умов експлуатації автомобільних двигунів при використанні їх в авіації.....</i>	54-61
--	-------

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

В. І. Фастовець <i>Аналіз та програмна реалізація модифікованого криптографічного шифру Вернама та шифру Цезаря.....</i>	62-67
---	-------

**ІНШІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ І РЕМОНТУ АВТОТРАНСПОРТУ
ТА ПІДГОТОВКИ ВІДПОВІДНИХ СПЕЦІАЛІСТІВ**

С. Понікаровська <i>Особливості практики викладання англійської мови студентам електротехнічної спеціальності (англ.).....</i>	74-80
---	-------

CONTENT

WAYS TO IMPROVE THE ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF MOTOR VEHICLES. ENERGY SAVING TECHNOLOGIES

- Staniskav Voytkiv** *The method of optimizing the main technical parameters of the promising city electric buses of ONC Type*..... 6-16
- Andrii Hnatov, Shchasianna Arhun, Ruslan Bagach, Hanna Hnatova, Valentina Tarasova, Oleksandr Ruchka** *Analysis of the most common methods for determining the stability of energy systems*..... 17-26

INTELLECTUAL TRANSPORT SYSTEM MANAGEMENT SYSTEMS. SYNERGETIC ECOMOBILE SYSTEMS

- Alexander Gurko, Oleg Sergiyenko, Lars Lindner** *Robust laser positioning in a mobile robot machine vision system*..... 27-36

MODELING APPLIED TASKS IN AUTOMOBILE INDUSTRY AND TRANSPORT SYSTEMS

- Igor Ilge** *Method of selecting automatic control system of a motor grader*..... 37-44
- Oleksandr Osetrov, Bohdan Chuchumenko** *Simulation of a car parameters impact on the process of its acceleration*..... 45-53

MECHANICAL ENGINEERING

- Anatoliy Gaydamaka, Yurii Muzykin, Volodymyr Klitnoi** *Diagnostics of the technical condition and prediction of accident-free guaranteed operating time of heavily loaded machines gear wheels*..... 54-59

INFORMATION TECHNOLOGY

- Valentyna Fastovets** *Analysis and software implementation of the modified cryptographic Vernam cipher and the Caesar cipher*..... 62-67

OTHER PROBLEMS OF OPERATION AND REPAIR OF VEHICLES AND TRAINING OF RELEVANT SPECIALISTS

- Svitlana Ponikarovska** *Peculiarities of English-teaching practice for students of electrical engineering*..... 68-75

Методика оптимізації основних технічних параметрів перспективних міських електробусів типу ONC

Войтків С. В.¹

¹Науково-технічний центр «Автополіпром», Україна

Анотація. *Проблема.* Міські електробуси типу ONC, які широко застосовуються для перевезень пасажирів на міських маршрутах, навіть за збільшення допустимої повної маси на 1500 кг мають суттєво меншу пасажиромісткість ніж автобуси великого класу, на базі яких вони створені. **Мета.** Визначення оптимальних величин основних конструктивних та експлуатаційних параметрів перспективних електробусів. **Методологія.** На основі аналізу технічних параметрів міських електробусів сучасних конструкцій та регламентованих технічних вимог до пасажирських транспортних засобів великої вмістимості встановлені залежності їх пасажиромістимості від розмірних параметрів кузова, параметрів мас та величини автономного пробігу електробусів. **Результати.** Розроблені три варіанти методики оптимізації параметрів проєктованих міських електробусів за одним із заданих параметрів – номінальною пасажиромістимістю, середнім добовим автономним пробігом або довжиною кузова електробуса. **Оригінальність.** Запропонований алгоритм визначення оптимізованих параметрів проєктованих електробусів на стадії розроблення ескізних пропозицій та ескізних проєктів. **Практичне значення.** Запропонована методика забезпечує проєктування перспективних міських електробусів типу ONC, які найбільш придатні для застосування у містах України, з заданою або максимально можливою номінальною пасажиромістимістю з умови забезпечення заданого або максимально можливого автономного пробігу.

Ключові слова: електробус I-го класу; міський електробус; пасажиромістимість електробуса; параметри мас електробуса; оптимізація параметрів; автономний пробіг.

Вступ

Більшість моделей сучасних електробусів I-го класу провідних європейських виробників, зокрема, і двох вітчизняних підприємств – концерну «Електрон» та корпорації «Богдан», призначених для перевезень пасажирів на міських маршрутах, створені на основі застосування кузовів міських автобусів з довжиною кузова $12,0 \pm 0,3$ м. Необхідність застосування автономних джерел електроенергії (ДЕЕ) для живлення тягових електродвигунів (ТЕД), систем їх підзаряджання під час перебування на маршрутах та комплексувальних виробів системи керування тяговим приводом, призвела до зменшення їх номінальної пасажиромістимості. Адже сумарна маса автономних ДЕЕ та інших складових частин тягового приводу електробусів

значно більша ніж маса силового агрегату з відповідними системами міських автобусів. Навіть за умови узаконеного збільшення допустимої повної маси електробусів на 1500 кг по відношенню до допустимої повної маси двомостових автобусів, вмістимість електробусів I-го класу у залежності від типу за енергопотужністю тягових акумуляторних батарей (АКБ) значно менша. При цьому, більша пасажиромістимість електробусів забезпечується за рахунок значного зменшення величини середньодобового автономного пробігу.

Отже, проєктування конструкцій сучасних перспективних міських електробусів з метою організації їх виробництва на вітчизняних підприємствах повинно базуватися виключно на оптимізації їх основних конструктивних і

експлуатаційних параметрів – номінальної пасажировмістимості, розмірних параметрів, параметрів мас та автономного пробігу.

Аналіз публікацій

Ефективність експлуатації електробусів I-го класу залежить, зокрема, від оптимізації їх основних конструктивних та експлуатаційних параметрів: номінальної пасажировмістимості, розмірних параметрів кузова, особливо його довжини, параметрів мас та автономного ходу. Дослідження різних аспектів ефективності експлуатації сучасних міських електробусів різних типів наведені у багатьох роботах. Оцінка сумарних витрат на застосування електробусів для перевезень пасажирів на конкретному маршруті та необхідні обсяги річної витрати електроенергії наведені у [1]. Залежність витрат електроенергії, необхідної для руху електробусів на маршруті, від типових циклів, кліматичних умов та стилю водіння конкретного водія розглянута у роботі [2]. Аналіз переваг та недоліків автобусів з гібридним приводом та електробусів, обладнаних тяговими АКБ або паливними елементами наведений у [3, 4]. Аналіз процесу заряджання ДЕЕ, зокрема, тягових АКБ електробусів типу ONC у нічний час розглянута у роботах [5, 6]. Напрямки подовження термінів експлуатації тягових АКБ запропоновані у [7]. Вплив основних конструктивних, експлуатаційних та інших факторів на споживання електроенергії міськими електробусами під час перевезень пасажирів розглянутий у роботах [8-10].

У наведених роботах авторами показано, що експлуатаційна ефективність електробусів залежить, зокрема, від основних конструктивних параметрів – маси спорядженого електробуса, маси тягових АКБ та номінальної пасажировмістимості.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є розроблення методики оптимізації основних конструктивних та експлуатаційних параметрів перспективних електробусів типу ONC – номінальної пасажировмістимості, розмірних параметрів кузова, зокрема, довжини, маси тягових АКБ та автономного пробігу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити залежність маси кузовів

електробусів без урахування маси тягових АКБ від їх розмірних параметрів та від основних конструкційних матеріалів;

- визначити залежність номінальної пасажировмістимості від площі пасажирського салону, параметрів горизонтальної проекції кузовів електробусів і від кількості встановлених одинарних пасажирських сидінь;

- визначити залежність максимально допустимої пасажировмістимості за параметрами мас – допустимої повної маси електробусів і маси у спорядженому стані, та від автономного пробігу.

Аналіз пасажировмістимості сучасних електробусів типу ONC

Електробуси типу ONC (англ. *Over Night-Charging*) характеризуються наявністю великої кількості тягових АКБ, розміщених на даху кузовів, або безпосередньо, у кузовах – у задній частині або у відокремлених відсіках, сформованих під пасажирськими сидіннями. Вона пов'язана з застосуванням системи заряджання тягових АКБ виключно від зарядних станцій розміщених, зазвичай, на територіях автотранспортних підприємств або поблизу них. Заряджання тягових АКБ таких електробусів здійснюється, здебільшого, у нічну пору доби.

Основними недоліками сучасних міських електробусів усіх типів, особливо типу ONC, являються суттєво збільшена маса у спорядженому стані та значно менша пасажировмістимість у порівнянні з міськими автобусами аналогічної довжини. Та, незважаючи на значно меншу пасажировмістимість електробусів великого класу з довжиною кузовів $12,0 \pm 0,2$ м, яка становить всього 65-80 чол., у порівнянні з міськими автобусами аналогічної довжини – 100-105 чол., саме цей тип електробусів являється найбільш доцільним для створення нових перспективних моделей, організації їх виробництва та експлуатації на міських маршрутах.

Але навіть збільшення регламентованої допустимої повної маси електробусів до $[M_{\text{п}}^{\text{е}}] = 19500$ кг, тобто на 1500 кг, оскільки для двомостових автобусів $[M_{\text{п}}^{\text{а}}] = 18000$ кг, їх номінальна пасажировмістимість все ж на 20-45 чол. менша.

Отже, проектування, виробництво та експлуатація перспективних міських електробу-

сів типу ОНС на основі застосування кузовів міських автобусів великого класу з довжиною $12,0 \pm 0,2$ м являється економічно недоцільним. Проектування перспективних міських електробусів типу ОНС, який найбільш придатний для застосування в Україні, повинно здійснюватися, принаймні, двома шляхами:

- оптимізацією основних конструктивних та експлуатаційних параметрів – номінальної пасажировмістимості, довжини кузова та автономного пробігу, зокрема, і при застосуванні компоновальних схем з колісною формулою 4x2.2 (зі здвоєними колесами тягового моста);
- застосуванням компоновальних схем з колісною формулою 4x2.1 (з одинарними колесами тягового моста) та розміщенням пасажирських дверей у межах колісної бази електробусів.

Параметри пасажировмістимості міських електробусів

До параметрів пасажировмістимості міських електробусів (автобусів, тролейбусів) належать: номінальна вмістимість, кількість встановлених у салоні пасажирських сидінь, кількість пасажирів, яких допускається перевозити у стоячому положенні, кількість місць для розміщення пасажирів у інвалідних візках.

Вимогами Правил ЄЕК ООН № 107 [11] регламентовані наступні параметри:

- мінімальна кількість пасажирських сидінь, яка повинна бути встановлена у пасажирських салонах міських електробусів без урахування сидіння для службової особи;
- питома площа для розміщення 1-го стоячого пасажиря, яка для міських електробусів становить $q_{\text{пас}} = 0,125 \text{ м}^2/\text{пас.}$;
- площа ділянки підлоги пасажирського салону для розміщення пасажиря у інвалідному візку, розміри якої, не менше: довжина – 1,3 м, ширина – 0,75 м.

Мінімальна кількість стаціонарних одинарних пасажирських сидінь, встановлених у пасажирських салонах міських електробусів, залежить від площі пасажирського салону. Допускається застосування відкидних пасажирських сидінь, але вони не враховуються при визначенні мінімальної кількості сидінь.

Номінальна пасажировмістимість міських електробусів обмежується двома основними конструктивними факторами:

- площею пасажирського салону елект-

робуса, призначеною для встановлення пасажирських сидінь та розміщення пасажирів у інвалідних візках і у стоячому положенні;

- допустимою корисною масою усіх пасажирів, які можуть бути розміщені на пасажирських сидіннях та на тих ділянках пасажирського салону, які призначені для стоячих пасажирів.

Визначення пасажировмістимості міських електробусів за площею пасажирського салону

Загальна пасажировмістимість міських електробусів за площею підлоги пасажирського салону, на якій можуть бути розміщені пасажирські сидіння та пасажирі у інвалідних візках і у стоячому положенні, визначається за виразом

$$N_{\text{пас}}^s = n_{\text{сид}}^i + n_{\text{віз}} + n_{\text{ст}} - n_{\text{сл}}, \quad (1)$$

де $n_{\text{сид}}^i$ – кількість пасажирів, розміщених у стаціонарних пасажирських сидіннях, чол.; $n_{\text{віз}}$ – кількість пасажирів у інвалідних візках, чол.; $n_{\text{ст}}$ – кількість стоячих пасажирів, чол.; $n_{\text{сл}}$ – кількість службових осіб, для розміщення яких виділені окремі сидіння, чол.

Оскільки, у міських електробусах службові особи (кондуктори) практично не передбачені, вираз (5) матиме вигляд

$$N_{\text{пас}}^s = n_{\text{сид}}^i + n_{\text{віз}} + n_{\text{ст}}. \quad (1.1)$$

Пасажирські одинарні сидіння можуть бути встановлені у пасажирському салоні міських електробусів в одному з трьох варіантів:

- у мінімально допустимій кількості одинарних стаціонарних сидінь;
- у максимально можливій кількості одинарних стаціонарних сидінь за умови забезпечення необхідної кількості накопичувальних майданчиків та розміщення регламентованої кількості пасажирів у інвалідних візках;
- у будь-якій можливій кількості стаціонарних одинарних сидінь, більшій ніж мінімально допустима, та можливій кількості відкидних сидінь.

Мінімально допустима кількість стаціонарних одинарних пасажирських сидінь у са-

лонах міських електробусів визначається з умови:

$$0,9S_{\text{пс}} \leq n_{\text{сид}}^{\text{min}} \leq S_{\text{пс}}, \quad (2)$$

де $S_{\text{пс}}$ – площа пасажирського салону для розміщення пасажирських сидінь та стоячих пасажирів, м^2 , яка визначається з виразу:

$$S_{\text{пс}} = S_{\text{куз}} - S_{\text{вод}}, \quad (3)$$

де $S_{\text{куз}}$ – площа горизонтальної проекції кузова електробуса, м^2 ; $S_{\text{вод}}$ – площа відділення

водія, відокремленого від пасажирського салону, м^2 :

$$S_{\text{куз}} = L_{\text{куз}} B_{\text{куз}}, \quad (4)$$

де $L_{\text{куз}}$ і $B_{\text{куз}}$ – відповідно, довжина і ширина кузова електробуса, м.

Усі сучасні міські електробуси класичного компонування з одинарними або подвійними пасажирськими дверима у передньому звісі, обладнані відокремленим відділенням водія (рис. 1), площі яких, визначені графічним методом, наведені у табл. 1.

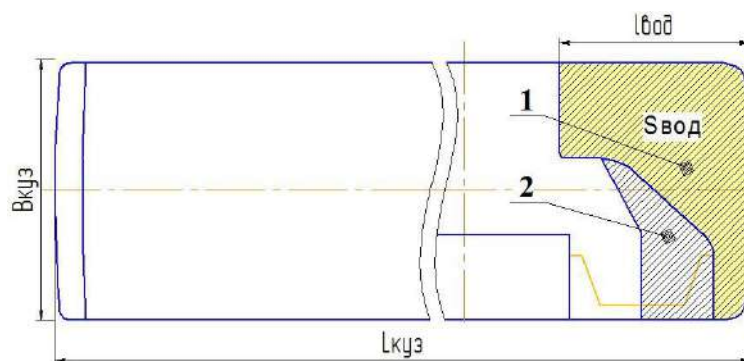


Рис. 1. Схема відділення водія міських електробусів: 1 – відокремленого частково, з входом із пасажирського салону; 2 – відокремленого повністю, з окремим входом

Таблиця 1. Площі різних типів відділень водія сучасних міських електробусів

Тип відділення водія	Відокремлене	
	частково	повністю
Площа відділення водія, $S_{\text{вод}}, \text{м}^2$	2,6-2,7	3,5-3,6

Допустима мінімальна кількість стаціонарних одинарних пасажирських сидінь у залежності від типу відділення водія у пасажирських салонах міських електробусів наведена у табл. 2.

Таблиця 2. Допустима мінімальна кількість пасажирських сидінь у салонах міських електробусів

Розмірні параметри кузова електробуса, м:	Кількість пасажирських сидінь, $n_{\text{сид}}^{\text{min}}$, од.			
	9,0	10,0	11,0	12,0
- довжина, $L_{\text{куз}}$				
- ширина, $B_{\text{куз}}$	2,55			
Тип відділення водія, відокремлене:				
- частково	18	21	23	25
- повністю	17	20	22	24

Максимальну кількість пасажирських сидінь, які можуть бути встановлені у пасажирському салоні міського електробуса, пропонується визначати за виразом:

$$n_{\text{сид}}^{\text{max}} \leq k_{\text{сид}} L_{\text{куз}}, \quad (5)$$

де $k_{\text{сид}}$ – коефіцієнт кількості одинарних пасажирських сидінь в залежності від довжини кузова автобуса, сид./м.

Рекомендована величина $k_{\text{сид}}$, визначена на основі аналізу технічних параметрів двомостових міських електробусів класичної компонування з колісною формулою 4x2.2 з довжиною кузова 9,0-12,0 м та шириною 2,5-2,55 м, $k_{\text{сид}} = (3,25-3,35)$ сид./м.

Розрахункова максимальна кількість пасажирських сидінь, які можуть бути встановлені у пасажирському салоні міських електробусів різної довжини наведена у табл. 3.

Таблиця 3. Розрахункова максимальна кількість одинарних пасажирських сидінь у салонах міських електробусів

Довжина кузова електробуса, $L_{\text{куз}}$, м	9,0	10,0	11,0	12,0
Кількість пасажирських сидінь, $n_{\text{сид}}^{\text{max}}$, од.	30	33	36	40

Кількість стоячих пасажирів, які можуть розміститися у пасажирському салоні міських електробусів, визначається за виразом:

$$n_{\text{ст}} \leq \frac{S_{\text{ст}}}{q_{\text{пас}}}, \quad (6)$$

де $S_{\text{ст}}$ – площа підлоги пасажирського салону, на якій можуть розміщатися пасажирів у стоячому положенні, м^2 .

Площа підлоги пасажирського салону, на якій допускається розміщення пасажирів у стоячому положенні, визначається за виразом:

$$S_{\text{ст}} = S_{\text{пс}} - n_{\text{сид}} s_{\text{сид}} - \left(\sum_{i=2}^n (n_{\text{дв}_i} s_{\text{дв}_i}) + \sum_{i=1}^n S_i \right), \quad (7)$$

де $s_{\text{сид}}$ – площа горизонтальної проекції одинарного пасажирського сидіння з зоною для розміщення ніг пасажирів, м^2 ; $n_{\text{дв}_i}$ – кількість пасажирських дверей однакового типу і однакової ширини по проїмці, од.; $s_{\text{дв}_i}$ – площа, яку займають службові двері i -го типу у відчиненому стані, м^2 ; S_i – площа будь-якої іншої ділянки пасажирського салону, на якій не допускається розміщення стоячих пасажирів, м^2 (наприклад арки коліс керованого або тягового моста).

Площу, яку займає одинарне пасажирське сидіння з зоною для розміщення ніг сидячого пасажирів, рекомендується приймати рівною $s_{\text{сид}} = (0,37-0,4) \text{ м}^2/\text{сид}$.

Площа, яку займають пасажирські двері у відчиненому положенні пропонується визначати за виразом:

$$S_{\text{дв}_i} = k_{\text{дв}_i} b_{\text{дв}_i}, \quad (8)$$

де $k_{\text{дв}_i}$ – коефіцієнт, який враховує тип пасажирських дверей; $b_{\text{дв}_i}$ – ширина проїми дверей i -го типу у боковині кузова, м.

Для одинарних та подвійних пасажирських дверей обертово-поступального типу рекомендований $k_{\text{дв}}^{\text{оп}} = 0,24-0,25$, для одинарних та подвійних пасажирських дверей плоско-паралельного переміщення, які відчиняються ззовні кузова, $k_{\text{дв}}^{\text{мп}} = 0,19-0,2$.

Сумарна площа інших ділянок підлоги пасажирського салону, на якій не можливе розміщення пасажирів у стоячому положенні, пов'язана зі щільності планування пасажирського салону проєктованих перспективних міських електробусів, визначається за пропонуваним виразом у залежності від його довжини:

$$\sum_{i=1}^n S_i = 0,14 L_{\text{куз}} + (0,8 \dots 2,6). \quad (9)$$

Розрахункова вмістимість міських електробусів за площею пасажирського салону може мати кілька значень у залежності від кількості встановлених пасажирських сидінь:

$$N_{\text{пас1}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{min}} + n_{\text{ст}}; \quad (10.1)$$

$$N_{\text{пас2}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{max}} + n_{\text{ст}}; \quad (10.2)$$

$$N_{\text{пас1}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{min}} + n_{\text{ст}} + n_{\text{виз}}; \quad (10.3)$$

$$N_{\text{пас2}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{max}} + n_{\text{ст}} + n_{\text{виз}}. \quad (10.4)$$

Оскільки площа ділянки підлоги у пасажирському салоні, яку займає один інвалідний візок, рівна $1,3 \times 0,7 = 0,91 \text{ м}^2$, і на ній можуть розміститися 7 чол. у стоячому положенні, вирази (10.3 та 10.4) можна записати у наступному вигляді:

$$N_{\text{пас3}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{min}} + (n_{\text{ст}} - 7); \quad (11.1)$$

$$N_{\text{пас4}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{max}} + (n_{\text{ст}} - 7). \quad (11.2)$$

У загальному випадку розрахункова пасажирівмістимість міських електробусів за площею пасажирського салону при відсутності сидіння для службової особи визначається за узагальненим виразом:

$$N_{\text{пас}}^s = n_{\text{сид}} + (n_{\text{ст}} - 7 n_{\text{виз}}). \quad (12)$$

Застосування у конструкціях міських електробусів повністю відокремленого від пасажирського салону відділення водія зменшує пасажиромістимість на:

$$\Delta n_{\text{пас}}^{\text{вод}} = \frac{S_{\text{вод}}^{\text{пв}} - S_{\text{вод}}^{\text{чв}}}{q_{\text{ст}}}, \quad (13)$$

де $S_{\text{вод}}^{\text{пв}}$ – площа відділення водія, повністю відокремленого від пасажирського салону, м²; $S_{\text{вод}}^{\text{чв}}$ – площа частково відокремленого від салону відділення водія, м².

Для наведених у табл. 1 площ відділень водія $\Delta n_{\text{пас}}^{\text{вод}} = 7-8$ чол. Отже, вираз (12) для визначення пасажиромістимості міських електробусів можна записати у ще більш узагальненому вигляді:

$$N_{\text{пас}}^s = n_{\text{снд}} + (n_{\text{ст}} - 7n_{\text{виз}}) \pm (7...8), \quad (14)$$

де знаки "+" і "-" застосовуються при визначенні $n_{\text{ст}}$ з урахуванням площі відділення водія, відповідно, відокремленого повністю або частково.

Визначення пасажиромістимості міських електробусів за допустимою повною масою

Загальна пасажиромістимість міських електробусів за допустимою повною масою залежить маси спорядженого електробуса, яка, у свою чергу, суттєво залежить від типу та енергопотужності тягових АКБ, і визначається за виразом:

$$N_{\text{пас}}^s = \frac{1}{m_{\text{пас}}} (M_{\text{п}}^e - M_{\text{сп}}^o - m_{\text{акб}} - n_{\text{сл}} m_{\text{вод}}), \quad (15)$$

де $M_{\text{сп}}^o$ – маса спорядженого електробуса без маси тягових АКБ, кг; $m_{\text{акб}}$ – маса тягових АКБ, кг; $n_{\text{сл}}$ – кількість службових осіб (водій, кондуктор), чол.; $m_{\text{вод}}$ – розрахункова маса службової особи, кг; $m_{\text{пас}}$ – розрахункова маса 1-го пасажиря, кг.

Для міських електробусів відповідно вимогам Правил ЕЭК ООН № 107 маса службової особи $m_{\text{вод}} = 75$ кг, маса 1-го пасажиря $m_{\text{пас}} = 68$ кг.

Для визначення маси спорядженого електробуса без маси тягових АКБ з урахуванням того, що ширина їх кузовів при довжині понад 9,0 м близька і рівна 2,5-2,55 м, а висота кузовів сучасних низькопідлогових електробусів рівна 2,6-2,7 м, відрізняється всього на 3,8 %, застосовується вираз, запропонований в [12]:

$$M_{\text{сп}}^o = \Delta m_{\text{сп}}^o L_{\text{куз}}, \quad (16)$$

де $\Delta m_{\text{сп}}^o$ – питома споряджена маса електробусів-аналогів без маси тягових АКБ, кг/м.

Питома споряджена маса кузовів міських електробусів, для виготовлення каркасів яких застосовуються сталеві профілі, а для панелей зовнішнього облицювання та внутрішнього оздоблення – композиційні матеріали, $\Delta m_{\text{сп}}^o = 850-900$ кг/м. Для проектування перспективних моделей міських електробусів пропонується приймати $\Delta m_{\text{сп}}^o = 850-870$ кг/м.

Маса тягових АКБ залежить від їх типу за будовою та номінальної енергопотужності:

$$m_{\text{акб}} = \frac{W_{\text{акб}}}{\rho_{\text{акб}}^w}, \quad (17)$$

де $W_{\text{акб}}$ – номінальна енергопотужність тягових АКБ, кВт·год.; $\rho_{\text{акб}}^w$ – питома енергопотужність тягових АКБ, кВт·год./кг.

Для основних типів сучасних тягових АКБ, які на нинішній час найчастіше застосовуються у системах тягового приводу електробусів для живлення ТЕД, рекомендовані величини питомої енергопотужності становлять: для тягових АКБ типу LiFePO_4 $\rho_{\text{акб}}^w = 0,09-0,1$ кВт·год./кг, а типу $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ – $\rho_{\text{акб}}^w = 0,07-0,08$ кВт·год./кг.

Оптимізація основних конструктивних та експлуатаційних параметрів перспективних міських електробусів

Оптимізація найбільш визначальних технічних параметрів проєктованих міських електробусів на етапах розроблення ескізних пропозицій або початкових стадіях розроблення ескізних проєктів у залежності від заданих вихідних параметрів може здійснюватися по одному із наступних варіантів:

- варіант $N_{\text{пас}}^h$ – задана номінальна пасажиромістимість електробуса, чол.;

- варіант $L_{пр}$ – задана величина середньодобового автономного пробігу, км;
- варіант $L_{куз}^{пр}$ – задані довжина кузова електробуса, $L_{куз}$, м та середньодобовий автономний пробіг, $L_{пр}$, км.

Оптимізація основних параметрів міських електробусів за варіантом $N_{пас}^H$

За умови заданої величини номінальної па-

$$L_{куз} \geq \frac{q_{пас} N_{пас}^H + n_{віз} s_{віз} + S_{вод} + \sum_{i=2}^n (n_{дв_i} s_{дв_i}) + \sum_{i=1}^n S_i}{q_{пас} k_{сид} + B_{куз} - k_{сид} s_{сид}}. \quad (18)$$

Автономний добовий пробіг міського електробуса розраховується за виразом, наведеним у [12]:

$$L_{пр} = \frac{k_p \rho_{акб}^w m_{акб}}{\Delta w_m M_{п}^e}, \quad (19)$$

де k_p – коефіцієнт допустимого розрядження тягових АКБ; Δw_m – питома витрата енергопотужності тягових АКБ, кВт·год./кг·км; $M_{п}^e$ – розрахункова повна маса електробуса, кг.

Для тягових АКБ типу $LiFePO_4$ $k_p = 0,85-9$; $\rho_{акб}^w = 0,09-0,1$ кВт·год./кг, а $\Delta w_m = (0,07-0,08)10^{-3}$ кВт·год./кг·км.

Маса тягових АКБ визначається з виразу (15):

$$m_{акб} \leq M_{п}^e - (M_{сп}^o + m_{вод} + m_{пас} N_{пас}^H), \quad (20)$$

Оптимізація основних параметрів міських електробусів за варіантом $L_{пр}$

За умови заданого середньодобового пробігу

$$L_{куз} \geq \frac{\left[M_{п}^e \right] - m_{акб} - m_{вод} + \frac{m_{пас}}{q_{пас}} \left(S_{вод} + \sum_{i=2}^n (n_{дв_i} s_{дв_i}) + \sum_{i=1}^n S_i \right)}{\Delta m_{сп}^o + \frac{m_{пас}}{q_{пас}} (B_{куз} - k_{сид} s_{сид})}. \quad (23)$$

Маса спорядженого електробуса визначається за виразом (16), тоді

сажировмістимості проектного електробуса $N_{пас}^H$, визначенню підлягають довжина його кузова $L_{куз}$, допустима маса тягових АКБ $m_{акб}$ та величина можливого середньодобового автономного пробігу $L_{пр}$.

З виразів (1), (6) та (7) при заданій пасажировмістимості і відсутності кондуктора довжина кузова електробуса (18):

$L_{пр}$ проектного міського електробуса, визначенню та оптимізації підлягають наступні параметри: необхідна маса тягових АКБ $m_{акб}$, довжина кузова $L_{куз}$, маса спорядженого електробуса без маси тягових АКБ $M_{сп}^o$ та номінальна пасажировмістимість електробуса $N_{пас}^H$.

Необхідна маса тягових АКБ визначається з виразу (19):

$$m_{акб} = \frac{\Delta w_m M_{п}^e L_{пр}}{k_p \rho_{акб}^w}. \quad (21)$$

Довжина кузова проектного електробуса визначається на основі виразу:

$$\left[M_{п}^e \right] - m_{акб} - m_{вод} = M_{сп}^o + M_{пас}, \quad (22)$$

та виразів (1,1) при $n_{віз} = 0$, (6), (7), (9) і (16)

при прийнятій величині $\sum_{i=1}^n S_i = 3,25$ м²:

$$N_{пас}^H \leq \frac{\left[M_{п}^e \right] - m_{акб} - m_{вод} - M_{сп}^o}{m_{пас}}. \quad (24)$$

Оптимізація основних параметрів міських електробусів за варіантом $L_{куз}^{np}$

За умови заданої довжини кузова проектного електробуса $L_{куз}$ та заданого середньодобового автономного пробігу $L_{пр}$ за виразом (16) визначається споряджена маса електробуса без врахування маси тягових АКБ $M_{сп}^o$, за виразом (20) – необхідна маса тяго-

вих АКБ $m_{акб}$ та за виразом (23) його розрахункова номінальна пасажировмістимість $N_{пас}^H$ та максимальна кількість одинарних пасажирських сидінь $n_{сид}^{max}$. Для визначення пасажировмістимості за площею пасажирського салону за умови розміщення максимальної кількості сидінь $n_{сид}^{max}$ пропонується наступний вираз:

$$N_{пас}^s \leq k_{сид} L_{куз} + \frac{L_{куз} B_{куз} - S_{вод} - k_{сид} L_{куз} s_{сид} - n_{виз} s_{виз} - \sum_{i=2}^n (n_{дв_i} s_{дв_i}) - \sum_{i=1}^n S_i}{q_{пас}} \quad (25)$$

Інші розрахункові параметри, наприклад, пасажировмістимість за площею пасажирського салону при встановленні допустимої мінімальної кількості пасажирських сидінь визначаються, за необхідності, за відповідними виразами.

Оптимізація основних параметрів міських електробусів за різними варіантами

Результати розрахунків основних конструктивних та експлуатаційних параметрів проєктованих міських електробусів за заданих наступних вихідних параметрів:

- номінальна пасажировмістимість не менше $N_{пас}^H = 100$ чол.;
- середньодобовий автономний пробіг $L_{пр} = 200$ км;
- довжина кузова електробуса на рівні

довжини кузовів автобусів великого класу $L_{куз} = 12$ м, та прийнятих величин інших параметрів – $B_{куз} = 2,55$ м; $k_{дв}^{оп} = 0,245$; $b_{дв_0} = 0,8$ м для одинарних і $b_{дв_1} = 1,4$ м для подвійних пасажирських дверей; кількість дверей $n_{дв} = 1+2$ (відповідно, одинарних і подвійних); $S_{вод} = 3,55$ м²; $s_{сид} = 0,385$ м²; $k_{сид} = 3,3$; $\Delta m_{сп}^o = 860$ кг/м; $\Delta m_{сп}^o = 860$ кг/м; $k_p = 0,85-9$ і $\Delta w_m = 0,07510^{-3}$ кВт·год./кг·км, та попередньо розрахованих параметрах $\sum_{i=2}^n (n_{дв_i} s_{дв_i}) = 0,784$ м², $\sum_{i=1}^n S_i = 3,25$ м² (середнє значення при $L_{куз} = 10,0-12,0$ м), наведені у табл. 4.

Таблиця 4. Основні параметри проєктованих міських електробусів, розраховані за різними варіантами їх оптимізації

Варіант оптимізації (задані параметри)	$N_{пас}^H = 100$ чол.	$L_{пр} = 200$ км	$L_{куз} = 12,0$ м $L_{пр} = 200$ км
Довжина кузова, $L_{куз}$, м (18)/(23)	11,9	12,3	-
Розрахункова пасажировмістимість, чол.:	-	104	102
- за площею пасажирського салону, $N_{пас}^s$ (24)	(при $n_{сид}^{max} = 40$ сид.)		
- за допустимою повною масою, $N_{пас}^m$ (15)	-	78	82
Автономний середньодобовий пробіг, $L_{пр}$, км (19)	137	-	-
при допустимій масі тягових АКБ, $m_{акб}$, кг (20)	2391	-	-
при необхідній масі тягових АКБ, $m_{акб}$, кг (21)	-	3499	3499

Аналіз пасажировмістимості міських електробусів за різними варіантами оптимізації показує, що при заданому автономному пробігу довжина їх кузовів занадто велика, оскільки площа пасажирських салонів використовується не повністю. Очевидно, що мінімізація пасажировмістимості і довжини кузовів електробусів повинна здійснюватися на основі виконання двох наступних умов:

$$n_{\text{сид}}^{\min} < n_{\text{сид}} < n_{\text{сид}}^{\max}; \quad (26)$$

$$N_{\text{пас}}^s \approx N_{\text{пас}}^m, \quad (27)$$

тобто, розрахункова кількість одинарних пасажирських сидінь $n_{\text{сид}}$ повинна бути такою, при якій забезпечується умова (27).

При прийнятих значеннях вихідних параметрів проєктованих електробусів та заданому автономному пробігу $L_{\text{пр}} = 200$ км і необхідній для його досягнення масі тягових АКБ типу LiFePO_4 $m_{\text{акб}} = 3500$ кг для визначення пасажировмістимості за довжиною кузова $N_{\text{пас}}^s$ та допустимою повною масою $N_{\text{пас}}^m$ пропонуються наступні вирази:

$$N_{\text{пас}}^s \leq 20,4L_k - 2,1n_{\text{сид}}^i - 61, \quad (28)$$

$$N_{\text{пас}}^m \leq 12,6(18,5 - L_k). \quad (29)$$

З виразів (28 та (29) довжина кузова міського електробуса при прийнятій величині $n_{\text{сид}}^i$ становить:

$$L_k = 0,064n_{\text{сид}}^i + 8,91. \quad (30)$$

Кількість одинарних пасажирських сидінь $n_{\text{сид}}^i$, передбачених для встановлення у пасажирському салоні проєктованого електробуса, приймається на основі табл. 2 і табл. 3.

Результати оптимізації основних конструктивних та експлуатаційних параметрів перспективних міських електробусів при різній кількості пасажирських сидінь у їх салонах наведені у табл. 5.

Отже, за умови забезпечення максимальної пасажировмістимості довжина кузова проєктованого перспективного конкурентоспроможного міського електробуса у першому наближенні повинна становити 10,5 м.

Таблиця 5. Основні параметри перспективних міських електробусів

Кількість одинарних пасажирських сидінь, $n_{\text{сид}}^i$, сид.	25	30
Розрахункова довжина кузова, $L_{\text{куз}}$, м	10,5	10,8
Пасажировмістимість, чол.:		
- за площею кузова салону, $N_{\text{пас}}^s$	100	96
- за допустимою повною масою, $N_{\text{пас}}^m$	100	97

На етапі ескізного проєктування на основі вибраних моделей керованого та тягового мостів та компоувальної схеми за кількістю, типом і розміщенням пасажирських дверей довжина кузова електробуса повинна бути відкоректована, тобто, може незначно збільшуватися або зменшуватися.

Висновки

Результати проведених досліджень на основі запропонованої методики оптимізації номінальної пасажировмістимості та довжини кузовів перспективних електробусів показують, що за умови забезпечення середньодобового автономного пробігу 200 км:

- експлуатація міських електробусів типу ONC, створених на базі кузовів міських автобусів з довжиною кузова $12,0 \pm 0,2$ м, являється не доцільною, оскільки площа їх пасажирського салону занадто велика, тобто не оптимальна;

- габаритна довжина перспективних міських електробусів повинна становити 10,5-10,6 м, що забезпечує найбільшу номінальну пасажировмістимість 100 чол. як за площею пасажирського салону, так і за допустимою повною масою 19500 кг;

- збільшення кількості пасажирських сидінь повинно забезпечуватися застосуванням планувань пасажирських салонів з розміщенням одинарних стаціонарних та відкидних сидінь.

Запропонована методика на етапах розроблення ескізних пропозицій та ескізних проєктів забезпечує визначення основних конструктивних та експлуатаційних параметрів проєктованих міських електробусів типу ONC за трьома варіантами:

- стандартного типу (ONC-st) з тяговими АКБ необхідної енергопотужності та, відповідно, з максимальною масою, для досягнення заданого середньодобового автономного пробігу;

- типу ONC-V [11] із замінними блоками

тягових АКБ, енергопотужність та маса яких, наприклад, удвічі менші, за рахунок чого їх пасажиромістимість не зменшується, тобто залишається максимальною, при зменшенні допустимої повної маси до максимальної для двомостових автобусів, тролейбусів та вантажних автомобілів;

- типу ONC-T з розміщенням основного блоку тягових АКБ необхідної енергопотужності у причепі (допоміжний блок тягових АКБ невеликої енергопотужності та малої маси встановлюється у кузові електробуса).

Найбільш доцільним для проектування перспективних конкурентоспроможних міських електробусів довжиною 9,0-12,0 м з економічних міркувань та щільності забудови центральних частин вітчизняних міст та за умови зменшення допустимої повної маси до 18000 кг для подовження термінів експлуатації міських вулиць без проведення капітального ремонту їх покриття, являється варіант ONC-V.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Borén, S. (2019). Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs. 956-971. <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324>.
2. Lajunen, A., Kivekaes, K., Baldi, F., Vepsäläinen, J. & Tammi, K. (2018). Different Approaches to Improve Energy Consumption of Battery Electric Buses. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 1-6. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2018.8605024>.
3. Hnatov A., Arhun, Shch., Ponikarovska, S. Energy saving technologies for urban bus transport. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. №14(4). 4649-4664. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.
4. Mohamed, M., Garnett, R. Ferguson, M. & Kanaroglou, P. (2016). Electric Buses: A Review of Alternative Powertrains. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.019>.
5. Houbbadi, A., Trigui, R., Pelissier, S., Redondo-Iglesias, E. & Bouton, T. (2019). Optimal Scheduling to Manage an Electric Bus Fleet Overnight Charging. Energies. <https://doi.org/10.3390/en12142727>.
6. Houbbadi, A., Trigui R., Pelissier S., Bouton T. & Eduardo R.-I. (2017). Multi-Objective Optimisation of the Management of Electric Bus Fleet Charging. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2017.8331015>.
7. Wang, J., Kang, L. & Yongzhong, L. (2020). Optimal scheduling for electric bus fleets based on dynamic programming approach by considering battery capacity fade. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109978>.
8. Torabi, S., Bellone M. & Wahde M. (2020). Energy minimization for an electric bus using a genetic algorithm. <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0393-1>.
9. Hatem, A. & Moataz M. (2021). A Prediction Model for Battery Electric Bus Energy Consumption in Transit. Energies, 14(10), 2824. <https://doi.org/10.3390/en14102824>.
10. Kivekäs, K., Lajunen, A., Baldi, F., Vepsäläinen, J. & Tammi, K. (2019). Reducing the Energy Consumption of Electric Buses With Design Choices and Predictive Driving. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 11409-11419. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2936772>.
11. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження транспортних засобів категорій М2 та М3 стосовно їхньої загальної конструкції : Правила ЕЭК ООН № 107-02. [Чинний з 01.07.2009]. ООН, 2011. Yedyni tekhnichni pryypusy shchodo ofitsiinoho zatverdzhennia transportnykh zasobiv katehorii M2 ta M3 stosovno yikhnoi zahalnoi konstruktssii [Uniform provisions concerning the approval of category M2 and M3 vehicles with regard to their general construction]. (2011). Regulation No. 107-02 from 1st July 2009. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
12. Войтків С. В. (2019). Напрямки створення конкурентоспроможних міських електробусів великого класу. Збірник наукових матеріалів міжнародної науково-практичної інтернет-конференції "Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту". Кропивницький : ЦНТУ, 13–24. Voitkiv S. V. (2019). Napriamky stvorennia konkurentospromozhnykh miskykh elektrobosiv velykoho klasu. Zbirnyk naukovykh materialiv mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii "Innovatsiini tekhnolohii rozvytku ta efektyvnosti funktsionuvannia avtomobilnoho transportu". [Directions of creation of competitive city electric buses of a large class. Collection of scientific materials of the international scientific-practical Internet conference "Innovative technologies of development and efficiency of functioning of motor transport"]. CNTU, 13–24. [in Ukrainian].

Войтків Станіслав Володимирович¹, к.т.н., генеральний конструктор, voitkivsv@ukr.net, тел. +38 067-447-04-90, ORCID: 0000-0002-7789-2081

¹Науково-технічний центр "Автополіпром", 79066, Україна, м. Львів, вул. Зубрівська, 32/24.

The method of optimizing the main technical parameters of the promising city electric buses of ONC Type

Abstract. Problem. City electric buses of the ONC type, which are widely used for passenger transportation on city routes, even if the permissible gross weight is increased by 1500 kg, have significantly lower passenger capacity than the high-class buses on the basis of the bodies of which they are created. This is due to the fact that the mass of traction batteries is much greater than the mass of the power unit with all its city bus systems. **Goal.** The goal is determining the optimal values of the main technical parameters of promising electric buses already at the stages of development of sketch proposals or sketch projects. **Methodology.** The work is based on the analysis of technical parameters of city electric buses of modern designs and regulated technical requirements for high-capacity passenger wheeled vehicles, the dependences of their passenger capacity on the dimensional parameters of the body, the weight of the equipped electric bus without the weight of traction batteries and the autonomous mileage of electric buses. **Results.** Three variants of a technique of optimizing the parameters of the designed city electric buses on one of the set

parameters – the nominal passenger capacity, average daily autonomous run or length of a body of an electric bus are developed. **Originality.** An algorithm for determining the optimized parameters of the designed electric buses at the stage of development of sketch proposals and sketch projects is proposed. **Practical value.** The proposed method provides the design of promising competitive city electric buses of ONC type, which are most suitable for use in the cities of Ukraine, with a given or maximum possible nominal passenger capacity in terms of providing a given or maximum autonomous mileage and equality of passenger capacity, determined by passenger area mass.

Key words: first class electric bus; city electric bus; passenger capacity of the electric bus; parameters of electric bus masses; parameter optimization; autonomous mileage.

Voytkiv Staniskav¹, Cand. of Science, General Designer, e-mail: voytkivsv@ukr.net, тел. +38 067-447-04-90, ORCID: 0000-0002-7789-2081

¹Scientific and technical Center "Autopoliprom", 32/24, Zubrivska, str., Lviv, 79066, Ukraine.

Аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем

Гнатов А. В.¹, Аргун Щ. В.¹, Багач Р. В.¹,
Гнатова Г. А.¹, Тарасова В. В.², Ручка О. О.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

²Харківський національний університет Повітряних сил ім. І. Кожедуба, Інститут цивільної авіації,
Україна

Анотація. Для визначення стійкості енергетичної системи існує багато методів. Найбільшого використання набули методи Ляпунова та метод Моїсеєва. В роботі розкрито їх сутність, переваги та недоліки, особливості практичного використання. Визначено, що одним з перспективних напрямів підвищення ефективності роботи математичного апарату є використання методів другого порядку в моделюванні і оптимізації режимів роботи енергетичних систем, що дозволяє збільшити швидкість і надійність збіжності ітераційних процесів. Розбудовано алгоритм дій, який призначений для вирішення питання стійкості у практичній діяльності.

Ключові слова: електроенергетична система; статичні характеристики; стійкість, динамічні характеристики; інтегральні критерії; сили збурення; баланс потужності.

Вступ

Електроенергетична система (ЕС) – це сукупність пристроїв, які дозволяють перетворити різні види енергії в електричну енергію, передати останню на відстань, та розподілити її між споживачами, де вона знову перетворюється.

У нормальному робочому стані, або у нормальному номінальному режимі, система повинна надійно забезпечувати споживання електричної енергії нормованої якості. Однак крім нормального стану існують аварійні стани та перехідні, що викликані різного роду перехідними процесами (збудниками) [1]. Це пов'язано з тим, що в системі безперервно відбуваються як малі зміни (флуктуації за рахунок змін в потужності, складі та кількості підключених споживачів) і, так звані, великі зміни, які визначаються варіаціями величин потужностей, що виробляються і споживаються, а також зміною конфігурації системи, наприклад, включенням і відключенням генераторів, ліній передач, трансформаторів, підстанцій (вузлів навантаження). Такі зміни або переходи від одного режиму до іншого, під час нормальної роботи системи,

називають нормальними перехідними режимами. Крім того, ЕС, як і будь-яка інша система, інколи зазнає аварій, що також веде до виникнення перехідних режимів [2,3].

Для нормальної роботи ЕС при різноманітних змінах (вплив ззовні, зміна технічного процесу, аварія), необхідно знати (розрахувати) її основні параметри, та ступінь впливу на них. Також для правильного здійснення переходу ЕС з одного в інший режим роботи та вихід на сталу роботу після збурення (що викликане перехідним процесом) необхідно проводити аналіз та розрахунок балансу потужностей системи. При цьому, одне з головних питань на яке потрібно дати відповідь – чи буде система стійкою.

Аналіз публікацій

Зараз для визначення стійкості енергетичних систем використовують велику кількість методів [1,4–16] та критеріїв. Наприклад, метод Ляпунова, метод Моїсеєва [17,18], критерії, Гурвіця, Раусса, Михайлова тощо [9,17,19,20].

Автори роботи [4] запропонували нову модель оцінки сталості для енергетичних систем. Модель дотримується інтегрованого

підходу та досліджує різні чинники, які впливають на оцінку стійкості системи. Для кожного чинника розробляється індекс, щоб відобразити ступінь його впливу на загальний індекс стійкості системи.

В статті [5] розглядається комбінація підходів життєвого циклу та аналізу охоплення даних для оцінки стійкості ЕС. Основну увагу приділено дослідженню та з'ясуванню потенціалу цих комбінованих підходів, що орієнтовані на стійкість інструментів багатокритеріального аналізу рішень у сфері енергетики.

В роботі [6] автори, спочатку, визначають показники сталості для енергетичного планування, а потім досліджують залежності та зворотні зв'язки між показниками та значеннями індикаторів. Як висновок стверджується, що аналітичний мережевий процес із перевагами, можливостями, витратами та ризиками є підходящим методом для вирішення цієї складної проблеми.

В роботі [7] представлено підходи, методології, сценарії та інструменти, що використовують елементи ІТ технологій у сталих енергетичних системах з детальним аналізом різних методів розпізнавання та комунікацій.

В статті [8] представлено техніко-економічний аналіз гібридних енергетичних систем з визначенням їх стійкості, які пропонують використовувати для двох столичних провінцій Ірану.

В роботі [9] описана методика визначення стійких режимів тривалого еквіваленту взаємопов'язаних ЕС різних структур. За результатами численних досліджень сформульовано критерій коливального порушення статичної стійкості, які отримано за критерієм Гурвіца.

В роботі [14] розглядаються питання розробки та дослідження методу визначення параметрів пристроїв для симетрії трифазних систем електропостачання. Для визначення вимог симетрії та компенсації використовується метод симетричних складових. Застосування запропонованого методу на думку авторів роботи призведе до підвищення стійкості ЕС.

Статті [10–13,15] представляють всебічне обговорення енергетичної стійкості міських районів з визначеними енергетичними показниками та технічним аналізом гібридної енергосистеми, щоб показати важливість відновлюваної енергії для досягнення енергетичної стійкості. Також запропоновано ряд технічних рішень та методів, що підвищують

як стабільність роботи, так і стійкість ЕС.

Автори дослідження [16] розробили основні концепції стійкості енергосистем. Їх сутність полягає в тому, що трапеція стійкості запроваджується як візуальний інструмент, щоб відобразити поведінку енергосистеми під час аварії. Ґрунтуючись на цьому, визначаються ключові характеристики відмовостійкості, якими має володіти енергосистема, а також пропонуються різні можливі стратегії підвищення стійкості ЕС.

Отже, при визначенні стійкості ЕС по методу Ляпунова можна користуватися двома методами: прямим методом і методом першого наближення [17,20]. Прямий метод Ляпунова відноситься до диференціальних методів. Для судження про стійкість системи тут не відшукують загального або приватного рішення диференціальних рівнянь виду $\Delta\chi_1 = (\Delta\chi_1, \Delta\chi_2, \dots, \Delta\chi_n)$, але з їх допомогою знаходять так звану V -функцію, повна похідна якої за часом має деякі специфічні властивості, що допомагають отримати судження про стійкість системи. Ці властивості формулюються двома теоремами прямого методу.

Більш широке застосування при вирішенні енергетичних завдань отримав метод першого наближення (перший метод Ляпунова). При застосуванні цього методу, що відноситься до групи методів повної інтеграції, праві частини рівнянь розкладаються в ступеневі ряди, що сходяться.

Однак в деяких практичних випадках більш відповідає фізичним явищам теорія технічної стійкості по Н. Д. Моїсееву [18].

Мета та постановка задачі

Метою роботи є дослідження можливостей різних методів визначення стійкості енергетичних систем та складання загального алгоритму дій щодо забезпечення їх стійкості.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

- проаналізувати сутність та можливість використання різних існуючих методів щодо вирішення питань стійкості ЕС;
- скласти загальний алгоритм дій щодо стійкості ЕС, який допоможе вирішити питання стійкості у практичній діяльності.

Методи визначення стійкості енергетичних систем

Змістом досліджень по виявленню якості ро-

боти ЕС являється обчислення деяких інтегральних величин, які виявляють на протязі визначаючого відрізка часу інтегральні відхилення тих величин, які характеризують похибку регулювання. Такий інтегральний критерій вказує на те, що немає необхідності обов'язково прагнути до мінімуму відхилення величини, яка регулюється від заданої. При рівних умовах, найбільш спокійним буде перехід від одного стану до іншого без коливань. Це являє собою позитивний фактор оцінки якості роботи системи. Однак цей показник не завжди є найважливішим. Інтегральні критерії для оцінки якості роботи системи розроблені практично тільки для забезпечення споживача напругою заданої якості і частоти. Досить часто необхідно оцінити якість автоматичного регулювання систем та її роботи в цілому.

Для проведення аналізу щодо початкового режиму та режиму, який має встановитися після збурення викликаного перехідним процесом, необхідно розглядати баланс потужності. Так, передача потужності від генераторів, турбіни яких розвивають потужність P_T , можлива тільки в тому випадку, якщо:

$$P_T = f(\varphi) \text{ і } P = \psi(\varphi),$$

де P_T – потужність турбін; P – потужність, яка передається споживачам, φ – параметр режиму.

Режим може існувати, якщо характеристики $P_T = f(\varphi)$, і $P = \psi(\varphi)$ перетинаються, причому зазвичай $P_T = \text{const}$, $p = (E \cdot U/x) \cdot \sin \delta$.

Також необхідно, щоб активна потужність, яка виробляється генераторами системи P_T , дорівнювала потужності, яка поглинається в навантаженнях P_H і втрачається у всіх елементах системи ΔP :

$$P_T = P_H + \Delta P = P. \quad (1)$$

Аналогічна умова існує в колах змінного струму і для реактивної потужності:

$$Q_T = Q_H + \Delta Q = Q. \quad (2)$$

Необхідно відмітити, що активна і реактивна потужності пов'язані з повною потужністю відомим співвідношенням:

$$S_T^2 = P_T^2 + Q_T^2, \quad (3)$$

де S_T – повна потужність.

Рівняння (1) і (2) не є незалежними, тому щоб користуватися ними необхідно розглянути додаткові умови, які відображають різноманітні зв'язки, що необхідно досліджувати. Але практика роботи сучасних ЕС, параметри яких змінюються в певних діапазонах, дає змогу встановити закономірності, якими можна користуватися.

Для розрахунку режимів регульованих ЕС, при створення для них регулюючих і керуючих пристроїв має особливе значення застосування розробленої А. М. Ляпуновим загальної теорії стійкості руху [17].

При визначенні стійкості ЕС за допомогою цієї теорії досліджуваний режим характеризують параметрами ω , E'_d , E'_{d_e} , δ і т. д. Поведінку системи цього режиму описують диференціальними рівняннями виду:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \varphi_1(\omega', E'_d, \delta) \\ E'_d &= \varphi_2(E'_{d0}, E'_{d_e}, \delta) \\ E'_{d_e} &= \varphi_3(E_{d_e}, U_p) \\ U_p &= \varphi_4(e) \\ e &= \varphi_5(e', P) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де ω , E'_d , E'_{d0} , δ і т. д. – узагальнені координати електричної системи, що характеризують її стан – режим або похідні від цих координат по часу.

У початковий момент часу (при $t = t_0$) позначимо змінні (параметри режиму) через ω_0 , E'_{d_0} , δ_0 . Тоді, вирішуючи систему рівнянь (4), можна кожен змінну представити у вигляді залежності від початкових значень:

$$\begin{aligned} \omega &= \psi_2(t, \omega_0, E'_{d_0}, \delta_0); \\ E'_d &= \psi_2(t, E'_{d_0}, E'_{d_e}, \delta_0), \text{ тощо.} \end{aligned}$$

Рішення системи рівнянь (4) описує зміну стану електричної системи, тобто її перехідний процес. Рішення передбачається єдиним і практично (зазвичай) відповідає технічним завданням.

Щоб судити про стійкість чи нестійкість режиму системи, слід дослідити рівняння так званого збудженого руху. Це рівняння описує перехідний процес після зміни параметрів режиму δ , ω , E'_d і інших, що з'явилися під

дією сил, які називаються збуреннями. Ці сили не беруть участі в рівняннях збуреного руху. У найпростішому випадку вважається, що миттєво створивши відхилення, вони зникли, і тепер на систему діють тільки внутрішні сили. Ці сили можуть зберегти систему стійкою або, навпаки, порушити її стійкість при появі збурення $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, ΔE_d .

Слід підкреслити значення двох понять: збурення і сили збурення.

Збурення – це ті відхилення параметрів режиму, які при будь-яких причинах відбуваються в системі. А сили збурення (як миттєві, так і тривало діючі) – це причини збурень режиму, тобто його відхилень від рівноважного стану [21,22].

При прийнятому підході до стійкості а ні природа сил збурення, а ні їх величина не розглядаються, і вони не беруть участь в диференціальних рівняннях. Аналіз стійкості зводять тільки до з'ясування характеру змін збурень (відхилень), не визначаючи їх величини. Рівняння (4), які можна переписати для збурень, мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\omega &= f_1(\Delta\omega_0, \Delta E_d, \Delta\delta) \\ \Delta E'_d &= f_2(\Delta E'_{d0}, \Delta E'_{d_e}, \Delta\delta) \\ \Delta E'_e &= f_3(\Delta E'_{d_e}, \Delta U_p) \\ \Delta U_p &= f_4(\Delta e) \\ \Delta e &= f_5(\Delta e_0, \Delta\Pi) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Формули системи (5) можна також розглядати як вираз відомого перетворення перенесення початку координат з однієї точки в іншу. Тривіальним рішенням системи рівнянь (5), що відповідає сталому режиму, буде: $\Delta\omega=0$, $\Delta\delta=0$, $\Delta E'_d=0$ і т.д.

Незбурений стан системи, інакше званий дослідним сталим режимом, оцінюється як стійкий, якщо для будь-якої завгодно малої області ε , заданої навколо стану рівноваги, завжди можна знайти відповідну область $\mu(\varepsilon)$ таку, при якій система, яка виявилася при різних початкових збуреннях в області ε (при $t=t_0$) ніколи (при будь-якому як завгодно великому $t > t_0$) не вийде з області ε :

$$|\Delta\chi_i(t)| < \varepsilon' \quad (6)$$

де i – будь-який режимний параметр; ε' – лінійні розміри області ε .

Сталий режим системи називають нестій-

ким, якщо навколо стану рівноваги існує така область ε , для якої не можна підібрати область $\mu(\varepsilon)$, яка має вищевказану властивість.

Якщо при виконанні нерівності (6), крім того, будуть виконуватися також і умови:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\delta &= 0; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta E'_d &= 0, \end{aligned}$$

або в загальному випадку для будь-якого параметра режиму x можна записати:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta x(t) = 0, \quad (7)$$

то режим системи, що відповідає цьому випадку, називають асимптотично стійким. Збурений рух об'єкта в цьому випадку визначають як рух, який повністю сходиться до його незбуреного руху.

При визначенні стійкості електричних систем по методу Ляпунова можна користуватися двома методами: прямим методом і методом першого наближення. Прямий метод Ляпунова відноситься до диференціальних методів. При цьому, специфічні властивості можна сформулювати, якщо користуватися двома такими теоремами прямого методу.

Теорема 1. Незбурений рух стійкий, якщо для властивостей диференціальних рівнянь збуреного руху досліджуваного об'єкта можна знайти таку знаковизначенну функцію V , у якій повна похідна за часом буде або знакопостійною функцією, що має знак протилежний знаку V , або функція тотожно рівна нулю.

Теорема 2. Якщо функція V , яка задовольняє умові першої теореми и має похідну $\frac{dV}{dt}$,

яка представляє собою також знаковизначенну функцію, знак якої протилежний знаку функції V , то незбурений рух досліджуваної системи асимптотично стійкий.

Алгоритм аналізу стійкості енергетичної системи

Функція декількох змінних $V = V(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ називається знаковизначенною в деякій області N -мірного фазового простору в координатах цих змінних, якщо вона у всіх точках цієї області навколо початку координат зберігає один і той же знак і ніде не обертається в нуль, тільки крім початку координат.

Функція V називається знакопостійною,

якщо вона зберігає один і той же знак, але може обернутися в нуль не тільки на початку координат, а і в інших точках даній області.

Функція V називається знаковмінною, якщо вона в даній області початку координат може мати різні знаки.

Слід зазначити, що теореми 1 і 2 забезпечують отримання тільки достатніх умов стійкості, але не необхідних. Це означає, що отримані умови не охоплюють всіх вимог, що пред'являються до параметрів системи для забезпечення її стійкості, хоча при виконанні цих умов система обов'язково буде стійка. Крім того, методи побудови функції Ляпунова стосовно до електричних систем розроблені мало. Значні труднощі при розробці цих методів для цілей технічних програм полягають в тому, що при заданих рівняннях збуреного руху досліджуваної електричної системи зазвичай може бути підібрано декілька різних варіантів функції Ляпунова. Це пов'язано з тим, що для наведених вище теорем потрібна тільки знаковизначеність функції та її похідної. Різні варіанти V – функції, що задовольняють двом теоремам, можуть призводити до різних варіантів умов стійкості системи, режим якої відображено записаними рівняннями. Тому застосування прямого методу Ляпунова для енергетичних завдань обмежене. На даний час його можливо застосовувати тільки для деяких окремих випадків.

Більш широке застосування при вирішенні енергетичних завдань отримав метод першого наближення (перший метод Ляпунова). При застосуванні цього методу, що відноситься до групи методів повної інтеграції, праві частини рівнянь розкладаються в ступеневі ряди, що сходяться в області $\Delta\chi \leq \eta$. Тут η є малою позитивною величиною. Після цього розкладання виходять рівняння, які мають вигляд:

$$\Delta\chi = \sum_{k=1}^n b_{1k} \Delta\chi_k + L_1(\Delta\chi_1, \Delta\chi_2, \dots, \Delta\chi_n), \quad (8)$$

де b_{1k} – постійні лінійної частини розкладання; $L_1(\Delta\chi_1, \Delta\chi_2, \dots, \Delta\chi_n)$ – сукупність членів вище першого порядку в цьому розкладанні.

Відкинувши цю сукупність і проводячи таким чином лінеаризацію, отримуємо систему рівнянь першого наближення, тобто нову систему лінійних рівнянь з постійними коефіцієнтами. Для вирішення цієї системи, що має вид:

$$\Delta\chi = \sum_{k=1}^n b_{1k} \Delta\chi_k, \quad (9)$$

Характеристичне рівняння має вид:

$$D(p) = \sum_{m=1}^n a_m p^{n-m} = 0 \quad (10)$$

де a_m – коефіцієнт; p – оператор $\frac{d}{dt}$; n, m – індекси, що характеризують порядок даного члена в характеристичному рівнянні.

Знайшовши значення коренів p рівняння з (10), легко зобразити зміни в часі і таким чином отримати в першому наближенні відповідь про наявність стійкості незбуреного руху. Характер коренів виразу (10) може бути з'ясований і без знаходження їх величини за відомим способом.

Стійкість по першому наближенню визначають наступними двома теоремами першого методу Ляпунова.

Теорема 1. Якщо всі корені характеристичного рівняння (10) мають негативні дійсні частини, тобто $\text{Re}(p_k) < 0$, де $k = 1, 2, \dots, n$, то незбурений рух системи асимптотично стійкий по першому наближенню.

Незбурений рух стійкий та не асимптотичний, коли характеристичне рівняння не має коренів з позитивними дійсними частинами, рівними нулю. Крім того ці корні прості або кратні і число груп рішень, їм відповідних, дорівнює їхньої кратності.

Теорема 2. Якщо серед коренів p_1, p_2, \dots, p_n , характеристичного рівняння (4) є хоча б один корінь з нульовою дійсною частиною, то незбурений рух системи нестійкий по першому наближенню.

Якщо характеристичне рівняння (10) має кратні корені з нульовими дійсними частинами і якщо число груп рішень, які відповідають цим корінням, менше їхньої кратності, то незбурений рух є нестійким.

При дослідженні стійкості за рівняннями першого наближення можуть зустрітися так звані критичні випадки, які не відповідають умовам наведених вище теорем.

Так, якщо серед коренів характеристичного рівняння (10) є хоча б один корінь, у якому дійсна частина дорівнює нулю, а решта коренів мають негативні дійсні частини, то наведені вище дві теореми першого методу не дають можливості судити про стійкість.

У критичних випадках, коли система знаходиться на межі стійкості, відповідь не може бути отримана на підставі дослідження рівнянь першого наближення (9). Тут характер руху системи, вирішальним чином, залежить від відкинутаї при переході від (8) до (9) сукупності членів вищого порядку.

Щоб відповісти на питання, чи буде в критичному випадку система стійкою, необхідно розглянути дійсні рівняння без їх лінеаризації, тобто повернутися до дослідження системи рівнянь (4) в їх початковій формі. Для такого роду досліджень А. М. Ляпуновим запропоновані деякі прийоми [17]. Зауважимо, що до теперішнього часу при вивченні режимів електричних систем в основному займалися дослідженнями некритичних випадків.

Теорія стійкості по А. М. Ляпунову, що застосовується як перше наближення, передбачає малі відхилення і веде аналіз без розгляду збурюючих сил, а тому не завжди задовольняє інженера-практика. Багато технічних завдань не цілком відповідають концепції визначення стійкості по методу А. М. Ляпунова. Досліджувані відхилення від сталого режиму бувають кінцеві, а дії сил, що збурюють суттєвими не тільки з точки зору створення ними деяких відхилень режиму, але і з точки зору того безперервного впливу на систему, який ними чиниться.

Для технічних завдань практично цікаво і важливо підійти до стійкості так, щоб врахувати всі ці обставини.

В деяких практичних випадках більш відповідає фізичним явищам теорія технічної стійкості по Н. Д. Моїсеєву. Специфіка цього методу полягає в прагненні отримати оцінку рішення системи диференціальних рівнянь, уникнувши тих труднощів, які полягають у необхідності тим чи іншим шляхом вирішувати систему диференціальних рівнянь або досліджувати характер її коренів.

Наведемо основні положення цього методу дослідження технічної стійкості при деяких режимах енергосистем.

Технічною стійкістю системи називають здатність системи, що отримала вплив деякої сили (зазвичай, заданої за величиною), зберегти стан, близький до вихідного, або повертатися до нього, здійснюючи при цьому на заданому інтервалі часу (кінцевому або нескінченному) такі рухи, при яких жодна змінна (параметр режиму) не перевищить деякого кінцевого, наперед заданого значення.

Математично умови технічної стійкості

можна сформулювати таким чином. Нехай перехідний процес, що виникає у будь-якій системі після збурення, проявився у вигляді дії сили $\Delta P_k(t)$ та визначається рівнянням:

$$\frac{dx_k}{dt} = \varphi(t, x_1, x_2, \dots, x_n) + \Delta P_k(t),$$

де $k = 1, 2, \dots, n$; x_1, x_2, \dots, x_n – параметри режиму.

Згідно даному вище визначенню, система буде стійкою, якщо в ній, при дії збурюючих сил $\Delta P_k(t)$, усі параметри режиму $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ при будь-яких своїх початкових умовах $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}$ ніколи не можуть стати більше деяких значень $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$, званих верхніми межами. В цьому випадку кожна з сил не повинна перевищувати деякої верхньої межі, а поточне значення будь-якої сили $\Delta P_k(t)$ при дії на відрізок часу $0 \leq t \leq \bar{t}$ задовольняти умовам:

$$\Delta P_1(t) \leq \Delta \bar{P}_1;$$

$$\Delta P_2(t) \leq \Delta \bar{P}_2;$$

$$\Delta P_n(t) \leq \Delta \bar{P}_n.$$

Порушення будь-якої з умов $x_1(t) \leq \bar{x}_1$ означає, що система на відрізок часу $0 \leq t \leq \bar{t}$ не має технічної стійкості. Перехід до нескінченного відрізка часу дає можливість визначити технічну стійкість системи протягом нескінченно великого часу.

Необхідно також відмітити, що існують і методи другого порядку, які використовуються в моделюванні режимів роботи електроенергетичних систем.

Однією з важливих функцій автоматизованих систем диспетчерського управління є управління режимами їх роботи. Розв'язання складних задач високої розмірності, які виникають при цьому, неможливе без використання сучасної обчислювальної техніки. Успішне функціонування системи управління в темпі реальних процесів в системах електропостачання забезпечується не тільки можливостями комп'ютерів (швидкодія, обсяг оперативної пам'яті тощо), але і обчислювальними можливостями алгоритмів і програми, яку використовують для досягнення мети управління.

Одночасно з розвитком можливостей комп'ютерної техніки відбувається розвиток обчислювальних методів розв'язання задач

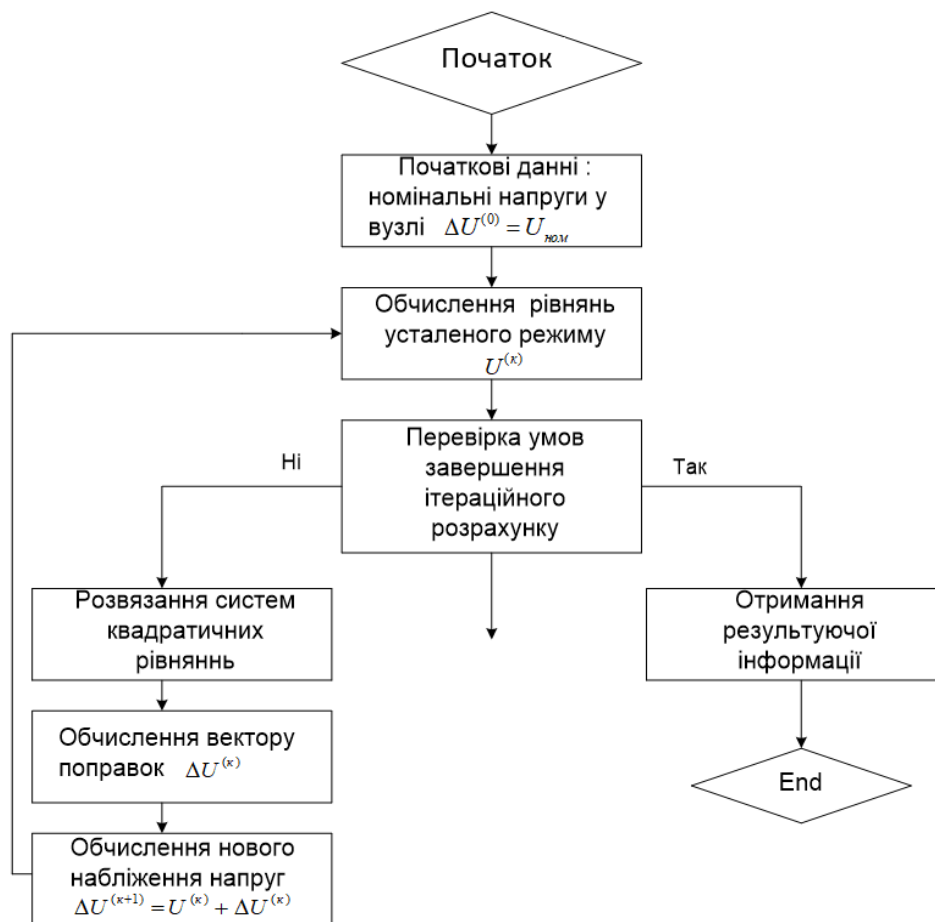
планування та управління режимами енергосистем.

Одним з перспективних напрямів підвищення ефективного математичного забезпечення є використання методів другого порядку в моделюванні і оптимізації режимів роботи ЕС, що дозволяє збільшити швидкість і надійність збіжності ітераційних процесів.

Важливою особливістю методів другого порядку є те, що квадратична апроксимація достатньо точно відображає режим електри-

чної мережі. В першу чергу це стосується рівнянь усталеного режиму у формі балансу потужностей, які також є квадратичними. Можливі модифікації методів другого порядку визначаються формою запису рівнянь сталого режиму, методами розв'язання системи квадратичних рівнянь.

Загальний алгоритм розв'язання системи рівнянь сталого режиму методами другого порядку приведений на рис. 1, алгоритм аналізу щодо стійкості ЕС на рис. 2.



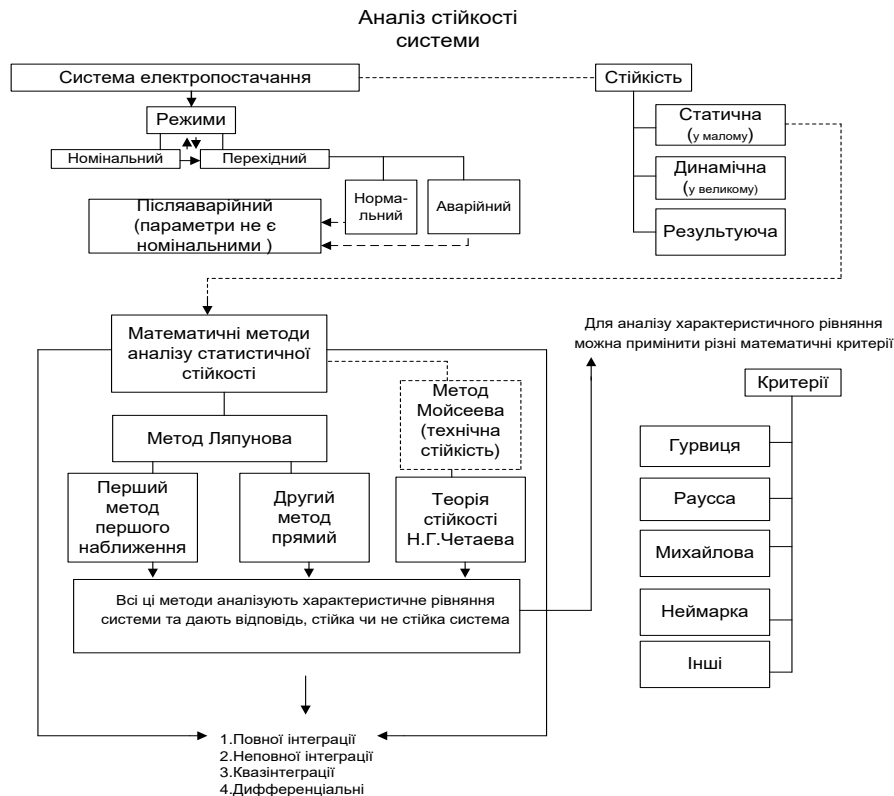


Рис. 2. Алгоритм аналізу щодо стійкості ЕС

В деяких практичних випадках більш відповідає фізичним явищам теорія технічної стійкості по Н. Д. Моїсєєву. Специфіка методу Моїсєєва полягає в прагненні отримати оцінку рішення системи диференціальних рівнянь, уникаючи тих труднощів, які полягають у необхідності тим чи іншим шляхом вирішувати систему диференціальних рівнянь або досліджувати характер її коренів.

Висновки

Для визначення стійкої енергетичної системи чи ні, можливо використання багатьох методів. Найбільшого використання набули методи Ляпунова та частково – метод Моїсєєва.

Прямий метод Ляпунова відноситься до диференціальних методів. Застосування прямого методу Ляпунова для енергетичних завдань обмежений. На даний час його можливо застосовувати тільки для деяких окремих випадків.

Більш широке застосування отримав при вирішенні енергетичних завдань метод першого наближення (перший метод Ляпунова). Одним з перспективних напрямів підвищення ефективності роботи математичного апарату є використання методів другого порядку в моделюванні і оптимізації режимів роботи

ЕС. Це дозволяє збільшити швидкість і надійність збіжності ітераційних процесів.

Спираючись на проведений аналіз різних існуючих методів щодо вирішення питань стійкості енергетичних систем запропоновано та розбудовано алгоритм дій, який допоможе вирішити питання стійкості у практичній діяльності.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Авраменко, В. М. (2018). Устойчивость электроэнергетических систем как задача нелинейной механики. *Праці Інституту Електродинаміки Національної Академії Наук України*, 49, 5–10. Avramenko, V. M. (2018). Ustoichyvost elektroenerhetycheskykh system kak zadacha nelyneinoi mekhanyky. [Stability of electric power systems as a problem of nonlinear mechanics.] *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 49, 5–10. [in Russian]
2. Матєєнко, Ю. П., & Кравчик, А. С. (2020). Оцінка показників балансової надійності електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії.

- Міжнародний Науково-Технічний Журнал "Сучасні Проблеми Електроенергетехніки Та Автоматики"*, 145–149. Mateienko, Yu. P., & Kravchuk, A. S. (2020). Otsinka pokaznykiv balansovoi nadiinosti elektroenerhetychnykh system z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii. [Estimation of indicators of balance reliability of electric power systems with renewable energy sources.] *Mizhnarodnyi Naukovo-Tekhnichniy Zhurnal "Suchasni Problemy Elektroenerhotekhniky Ta Avtomatyky"*, 145–149. [in Ukrainian]
3. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (n.d.). Development of an unified energy-efficient system for urban transport. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, 248–253.
 4. Abu-Rayash, A., & Dincer, I. (2019). Sustainability assessment of energy systems: A novel integrated model. *Journal of Cleaner Production*, 212, 1098–1116.
 5. Martín-Gamboa, M., Iribarren, D., García-Gusano, D., & Dufour, J. (2017). A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems. *Journal of Cleaner Production*, 150, 164–174.
 6. Kuleli Pak, B., Albayrak, Y. E., & Erensal, Y. C. (2017). Evaluation of sources for the sustainability of energy supply in Turkey. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(2), 627–637.
 7. Salam, A. (2020). Internet of things in sustainable energy systems. In *Internet of Things for Sustainable Community Development*. 183–216. Springer.
 8. Razmjoo, A., Ehyaei, M. A., Ahmadi, A., Pazhoohesh, M., Marzband, M., Mansouri Khosravi, M., Shahhoseini, A., & Davarpanah, A. (2019). Implementation of energy sustainability using hybrid power systems, a case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1–14.
 9. Popov, M. G., & Lu, Z. (2019). Adaptive emergency control system with an algorithm for rapid assessment of sustainability united energy system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1419(1), 012025.
 10. Patlins, A., Hnatov, A., & Arhun, S. (2018). Using of green energy from sustainable pavement plates for lighting bikeways. *Transport Means- Proceedings of the International Conference*, 574–579.
 11. Patlins, A., Hnatov, A., & Arhun, S. (2018). Safety of pedestrian crossings and additional lighting using green energy. *Transport Means- Proceedings of the International Conference*, 527–531.
 12. Patlins, A., Hnatov, A., Kunicina, N., Arhun, S., Zabasta, A., & Ribickis, L. (2018). Sustainable pavement enable to produce electricity for road lighting using green energy. *2018 Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE)*, 1–2.
 13. Gnatov, A., Argun, S., & Rudenko, N. (2017). Smart road as a complex system of electric power generation. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 457–461.
 14. Shymuk, D., Hnatov, A., Arhun, S., Ponikarovska, S., Mygal, V., & Kunicina, N. (2020). Solving the Problem of Balancing and Complete Compensation of Reactive Power for a Three-Phase Power Supply System. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 7(28).
 15. Armin Razmjoo, A., Sumper, A., & Davarpanah, A. (2020). Energy sustainability analysis based on SDGs for developing countries. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(9), 1041–1056.
 16. Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P., & Hatziargyriou, N. D. (2017). Power systems resilience assessment: Hardening and smart operational enhancement strategies. *Proceedings of the IEEE*, 105(7), 1202–1213.
 17. Wang, M. (2018). Note on the Lyapunov functional method. *Applied Mathematics Letters*, 75, 102–107.
 18. Денисенко, В. С. (2020). О технической устойчивости множеств траекторий дискретных систем. *Известия Высших Учебных Заведений. Математика*, 7, 63–75. Denisenko, V. S. (2020). О tehniceskoy ustoychivosti mnozhestv traektoriy diskretnykh sistem. [On technical stability of sets of trajectories of discrete systems.] *Izvestiya Vysshih Uchebnyih Zavedeniy. Matematika*, 7, 63–75. [in Russian]
 19. Wójcik, W., Mazakov, T., Jomartova, S., Ziyatbekova, G., Karymsakova, N., & Tursynbai, A. (2021). The stability interval of the set of linear system. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 67(2), 155–161.
 20. Mazakov, T., Wójcik, W., Jomartova, S., Karymsakova, N., Ziyatbekova, G., & Tursynbai, A. (2021). The Stability Interval of the Set of Linear System. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 67.
 21. Hnatov, A., Arhun, S., & Ponikarovska, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14, 4649–4664.
 22. Гнатов, А. В., Аргун, Ш. В., Дзюбенко, О. А., Тарасова, В. В., Левенець, А. О., & Пілявець, О. О. (2018). Енергозбереження в системах електропостачання. *Автомобіль і Електроніка. Сучасні Технології*, 13, 80–89.

Hnatov, A. V., Arhun, Shch. V., Dziubenko, O. A., Tarasova, V. V., Levenets, A. O., & Piliavets, O. O. (2018). Enerhozberezhennia v systemakh elektropostachannia. [Energy saving in power supply systems.] *Avtomobil i Elektronika. Suchasni Tekhnologii*, 13, 80–89. [in Ukrainian]

Гнатів Андрій Вікторович¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 06674380887, e-mail: kalifus76@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Аргун Щасяна Валіковна¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Гнатова Ганна Андріївна¹, студентка автомобільного факультету ХНАДУ, тел. +38 0990679809, e-mail: hannahnatova@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7263-3024>

Багач Руслан Володимирович¹, аспірант кафедри автомобільної електроніки,

+38 0935761042, e-mail: ruslanbagach@gmail.com,

Тарасова Валентина Всеволодівна², к.т.н., доц., тел. +38066-828-47-31, val.vs.tarasova@gmail.com,

Ручка Олександр Омелянович², к.т.н., доц., тел. +38 067-774-86-83, val.vs.tarasova@mail.ru,

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

²Харківський національний університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба, Інститут цивільної авіації, 61023, м. Харків, вул. Сумська 77/79.

Analyzing the most common methods for determining the stability of energy systems

Abstract. Problem. There are many methods for determining the stability of the energy system. In normal operating condition (normal rated mode), the power system must reliably ensure the consumption of electricity of normalized quality. However, in addition to the normal state, there are emergency and transient states caused by various transients. This is due to the fact that the energy system is constantly changing its parameters. Such changes are determined by variations in the amount of power produced and consumed, as well as the changes in system configuration. **Goal.** The goal is studying the possibilities of various methods of determining the power systems stability and drawing up the general algorithm of actions for maintenance of their stability. **Methodology.** When determining the stability of energy systems by the Lyapunov method, two methods can be used: the direct method and the first approximation method. Lyapunov direct method refers to differential methods. To conclude about the stability of the system we do not find a general or particular solution of differential equations, but with

their help we find a mathematical function, the complete derivative of which over time allows to obtain a conclusion about the stability of the system. **Results.** Many methods can be used to determine whether a sustainable energy system is stable or not. The most common are the Lyapunov methods and the Moiseev method. It is determined that the direct Lyapunov method refers to differential methods. The application of the direct Lyapunov method for energy problems is limited. Currently, it can be used only for some individual cases. The method of the first approximation (Lyapunov first method) has received wider application in the solution of power problems. When applying this method, which belongs to the group of methods of full integration, the right-hand sides of the equations are decomposed into power series. **Originality.** It is determined that one of the perspective directions of increasing the efficiency of the mathematical device work is using the methods of the second order in modeling and optimization of operating modes of electric power systems. This allows you to increase the speed and reliability of the convergence of iterative processes. **Practical value.** Based on the analysis of various existing methods for solving the problems of stability of energy systems, an algorithm of actions is proposed and developed, which will help to solve the problem of stability in practice.

Key words: power system; static characteristics; stability; dynamic characteristics; integral criteria; perturbation forces; power balance.

Hnatov Andrii¹, professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department,

tel. +38 066-7438-0887, kalifus76@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Shchasiana Arhun¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department,

shasyana@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Hnatova Hanna¹, student of the Automobile Faculty, tel.+38 0990679809,

e-mail: hannahnatova@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7263-3024>

Bagach Ruslan¹, postgraduate, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0935761042,

e-mail: ruslanbagach@gmail.com

Tarasova Valentina², Ph.D., Assoc. Prof., tel. +38066-828-47-31, val.vs.tarasova@gmail.com,

Ruchka Oleksandr², Ph.D., Assoc. Prof., tel.

+38 067-774-86-83, val.vs.tarasova@mail.ru,

¹Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Force, Sumy 77/79 street, Kharkiv, 61023, Ukraine.

²Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Robust laser positioning in a mobile robot machine vision system

Gurko A. G.¹, Sergiyenko O. Yu.², Lindner L.²

¹Kharkiv National Automotive and Highway University, Ukraine

²Universidad Autónoma de Baja California, Mexico

Abstract. Problem. Laser scanning devices are widely used in Machine Vision Systems (MVS) of an autonomous mobile robot for solving SLAM problems. One of the concerns with MVS operation is the ability to detect relatively small obstacles. This requires scanning a limited sector within the field of view or even focusing on a specific point of space. The accuracy of the laser beam positioning is hampered by various kinds of uncertainties both due to the model simplifying and using inaccurate values of its parameters, as well as lacking information about perturbations. **Goal.** This paper presents the improvement of the MVS, described in previous works of the authors, by robust control of the DC motor, which represents the Positioning Laser drive. **Methodology.** For this purpose, a DC motor model is built, taking into account the parametric uncertainty. A robust digital PD controller for laser positioning is designed, and a comparative evaluation of the robust properties of the obtained control system with a classical one is carried out. The PWM signal formation by the microcontroller and processes in the H-bridge are also taken into account. **Results.** The obtained digital controller meets the transient process and accuracy requirements and combines the simplicity of a classic controller with a weak sensitivity to the parametric uncertainties of the drive model. **Originality.** The originality of the paper is in its focus on the MVS of the autonomous mobile robot developed by the authors. **Practical value.** The implementation of the MVS with the proposed controller will increase the reliability of obstacles detection within a robot field of view and the accuracy of environment mapping.

Key words: DC motor, laser positioning, machine vision system, robust control.

Introduction

The performance of an autonomous mobile robot operating in an unknown cluttered environment requires to solve a number of tasks related to the mapping of the surroundings and determining the robot space-time orientation within the terrain (so-called SLAM) [1]. For these tasks solution, robots are equipped with Machine Vision Systems (MVS) based on different sensors (camera, laser, radar, sonar, lidar, etc.) [1] – [16]. Laser scanners are attractive sensors in outdoor mobile robot localization and navigation [1], [3], [8]–[16] because of their ability to provide instantaneous information about the range and direction that can be used for feature extraction and obstacle detection. Fusing data from laser scanners with information from other sources benefits the accuracy of mapping and

enables mobile robots to perform a variety of

tasks more confidently [1], [2], [12]. Though that coupling entails and disadvantages, e.g. it is necessary to decide which sensory system provides now the most proper information about the surrounding of the mobile robot [12].

One of the challenges, when used any type of the MVS, independent of the way of its implementation, is the ability to identify relatively small obstacles. That requires scanning of a limited sector of the field of view or even focusing on a specific point in space. In the case of a laser sensor, the solution of the mentioned problem is to increase the accuracy of the laser beam positioning at a given angle.

For this purpose, for example, in the proposed MVS in [12], the two stepper motors of the laser spot positioning (LP) system in the ver-

tical and horizontal planes are replaced by DC motors [13]. Fig. 1. shows the latest prototype of a system with a DC Motor.

Using a DC motor instead of a stepper motor allows the laser beam to be rotated at any angle, so that the MVS can continuously scan a given limited sector within the field of view. Furthermore, a DC motor theoretically allows positioning the beam at any particular point.

However, the experiments [14], [15], [16] show that the new LP drive still has some drawbacks. These drawbacks are results of using inaccurate values of the parameters of the DC motor and the LP, simplification of the DC motor model, e.g. neglecting of some nonlinear effects, such as Coulomb friction; cogging torque for some of DC motors; friction coefficient jump-changes in transitions; lacking information about perturbations and variations of the motor parameters values, etc. Thus, the implementation of the robust control of the LP drive is essential. Robust control of the LP drive will allow improving the accuracy and reliability of small obstacles detecting within the MVS field of view.

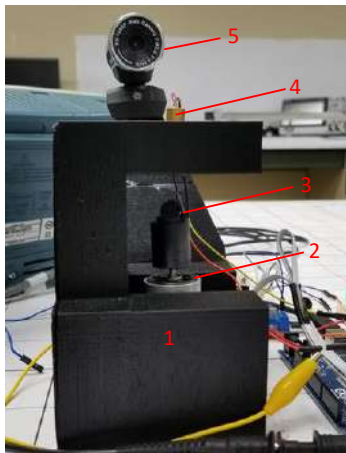


Fig. 1. Prototype of the Technical Vision System: 1 – Mounting base; 2 – Maxon REmax-29 DC Motor; 3 – 45-cut degree mirror Edmund Optics; 4 – Laser module Laserfuchs LFD650; 5 – USB Webcam 1080p AUSDOM

Analysis of publications

The popularity of DC motors as actuators for various technical objects have led to a large amount of research on robust control for these motors.

The first papers dedicated to robust control of DC motors appeared on early 1980s on the wave of interest to the rapidly developing theory

of robustness. In particular, in [17], a microprocessor control system was developed in order to improve the drive performance of a DC servo motor and reduce sensitivity to parameter variations, nonlinear effects, and other disturbances. The control system consists of two independent loops: a position controller to specify the system transfer function and a complementary controller to reduce system sensitivity.

A robust system for a DC motor position control with a fuzzy controller and the additional compensator was presented in [18]. The additional compensator based on the sliding mode theory was used to improve the dynamical characteristics of the drive.

A sliding mode control coupled with a PID control was applied to control the motor speed in [19].

As the interest in the H^∞ -control methods increased, they began to be used for the control of various plants including DC motors. Thus, in [20, 21] H^∞ -controllers were designed for DC motors speed and position control using MATLAB Robust Control Toolbox. However, in spite of significant theoretical achievements, H^∞ methods still do not spread in the everyday practice of actuators control. It is explained not only by the relative simplicity of implementation and comprehensibility of the 'traditional' PID controllers but also by the imperfection of H^∞ algorithms, in particular, difficulties in determining the sensitivity function. Moreover, both the different varieties of enhanced PID controllers and the classical PID controllers can provide robust properties to the system [22, 23].

In [24] an analogue robust PD-controller for the laser actuator of the technical vision system has been proposed. However, this controller is not applicable for implementation by a microprocessor system since it does not take into account the specificities of numerical differentiation, signals digital filtering, and PWM control.

Purpose and Tasks

In this paper, we describe a robust digital PD-controller with the coefficients that ensure the proper quality of the laser positioning under parametric uncertainty.

The paper is organized as follows. The dynamical model of the laser drive with uncertain parameters is described in the next section. Then the Simulink model of the system with the PD-controller, tuned for the nominal drive model, is presented; it is followed by an analysis of the

parametric uncertainties effect on the system performance. Afterwards, the robust PD-controller is designed, the robustness and performance of the system are also addressed in this section. Finally, concluding remarks are stated in the end of the paper.

Laser drive mathematical model

Since the DC motor is used as the drive for the LP system, in this section we will consider DC motor mathematical model. It is well known that the model of an armature-controlled DC motor is based on Newton's 2nd and Kirchoff's voltage law and has the following form:

$$\begin{cases} L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + K_b \frac{d\theta(t)}{dt} = V(t), \\ J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + b \frac{d\theta(t)}{dt} = K_m i(t). \end{cases} \quad (1)$$

where L and R are the electric inductance and electric resistance of a motor armature circuit respectively; J is the total moment of inertia of the motor shaft together with the mirror; $i(t)$ is the armature current; $\theta(t)$ is the motor shaft position; $V(t)$ is the armature voltage; K_m is the motor torque constant; K_b is the back-EMF constant; b is the motor viscous friction constant.

It is assumed in equation (1) that the magnetic field is constant and, therefore, the motor torque is only proportional to the armature current $i(t)$ by a constant factor K_m . In practice, the strength of the magnetic field can vary. Thus, that is one of the assumptions mentioned in the previous section, which simplifies the mathematical model but makes it less accurate. After simple transformations, taking $x_1 = i(t)$, $x_2 = d\theta(t)/dt$, and $x_3 = \theta(t)$ as state coordinates, we get

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} & 0 \\ \frac{K_m}{J} & -\frac{b}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2)$$

$$y = [0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

where y is the drive output coordinate and $u = V(t)$.

Fig. 2 shows a block diagram that corresponds to (2) and (3).

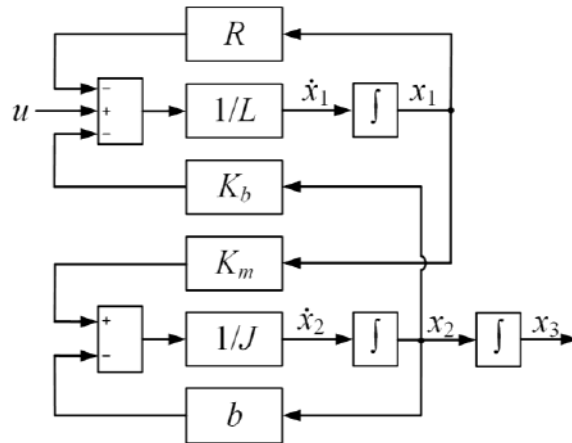


Fig. 2. The block diagram of the MVS laser drive

Assuming the constancy of the magnetic field is not the only simplification in the models (1) and (2), (3). In a realistic system, the exact values of the parameters R , L , K_b , K_m , J and b are unknown. At the same time, we can always specify the bounded intervals to which these values belong [25]. That is, (2) can be rewritten as follows:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\bar{R} + \delta_R}{\bar{L} + \delta_L} & -\frac{\bar{K}_b + \delta_{K_b}}{\bar{L} + \delta_L} & 0 \\ \frac{\bar{K}_m + \delta_{K_m}}{\bar{J} + \delta_J} & -\frac{\bar{b} + \delta_b}{\bar{J} + \delta_J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\bar{L} + \delta_L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4)$$

where $\bar{(\cdot)}$ represent the nominal values of the corresponding parameters and δ represent the possible perturbations on these parameters.

In this case, in the diagram of Fig. 2 the blocks with parameters R , L , K_b , K_m , J and b can be replaced with blocks \bar{R} , \bar{L} , \bar{K}_b , \bar{K}_m , \bar{J} and \bar{b} with feedbacks in terms of δ_R , δ_L , δ_{K_b} , δ_{K_m} , δ_J and δ_b (Fig. 3) [24].

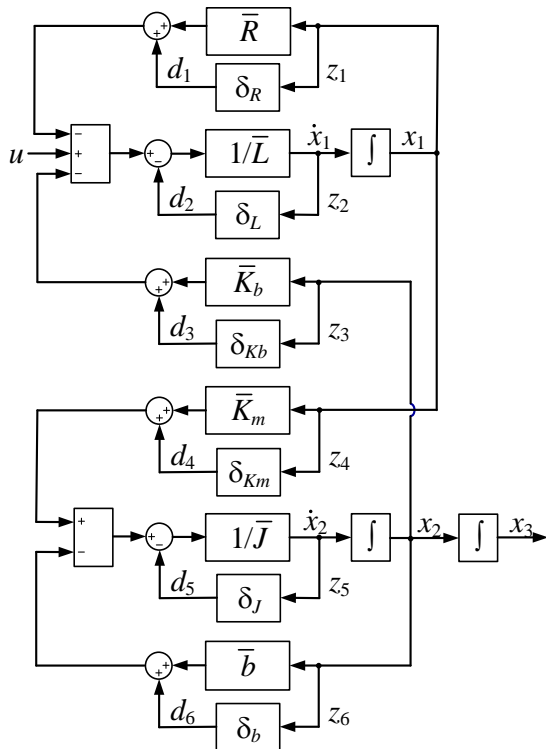


Fig. 3. The block diagram of the MVS laser drive with uncertain parameters

Using the model (Fig. 3) with undefined parameters allows us:

- to synthesize a controller for the LP system;
- to estimate the robustness of the obtained system and
- to evaluate the influence of the deviations $\delta_R, \delta_L, \delta_{Kb}, \delta_{Km}, \delta_J$ and δ_b on the nominal parameters $\bar{R}, \bar{L}, \bar{K}_b, \bar{K}_m, \bar{J}, \bar{b}$ values at the system performance.

Classic controller design

This section presents the solution to the first listed above task. First, a PD-controller for the nominal model of the drive is designed. Then, we examine the robustness of the obtained system is. As a drive, we consider the DC motor Maxon RE-max29, which is used in the MVS (Fig. 1). The nominal values of the motor parameters taken from the manufacture datasheet [26] are listed in Table 1.

Table 1. DC motor Maxon RE-max29 parameters

Symbol	Nominal value	Unit	Variation
R	104	Ohm	$\pm 40\%$
L	8.48	mH	$\pm 40\%$
J	7.2×10^{-6}	kg·m ²	$\pm 40\%$
K_m	0.168	N·m/A	$\pm 40\%$
K_b	0.168	V·s/rad	$\pm 40\%$

b	2.71×10^{-4}	N·m·s/rad	$\pm 40\%$
-----	-----------------------	-----------	------------

It is assumed, that the exact values of the motor parameters are unknown and they can range within $\pm 40\%$ of their nominal values (Table 1).

The simulation was carried out using MATLAB/Simulink. First, a digital PD-controller for the nominal motor parameter values (Table 1) was designed. Fig. 4 shows the Simulink model of the laser driver positioning system. The content of the 'DC Motor' block in Fig. 4 corresponds to the diagram in Fig. 2 without the last integrator converting the angular velocity x_2 to the angular position x_3 .

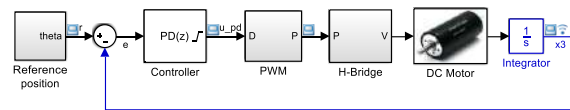


Fig. 4. The Simulink-model of the system with the driver nominal parameters

The motor is controlled by the PWM signal (Fig. 5). To amplify the signal and to reverse the direction of the motor shaft rotation the MOSFET H-bridge is used (Fig. 6). The PWM frequency is 488.28 Hz. The maximum voltage fed to the laser driver is 12V. The PD algorithm is implemented using a microcontroller.

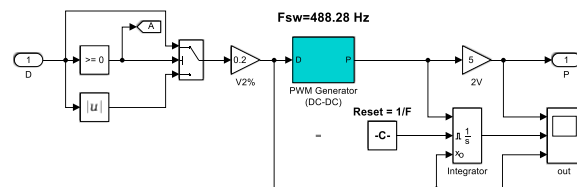


Fig. 5. The Simulink-model of the PWM subsystem in Fig. 4

The blocks 'Forward' and 'Backward' in Fig. 6a are to choose the direction of the motor shaft on the basis of the sign of the controller output; they are built with the help of switch blocks. The MOSFET Bridge model is exposed in Fig. 6b.

The system quality requirements are formulated based on the following considerations. According to [26], the nominal voltage of the Maxon RE-max29 motor is 48 V, and the nominal speed is 1820 rpm. This means that it makes one revolution in 0.033 seconds. Thus, at a supply voltage of 48 V, the motor can turn at any angle up to 2π in about 0.03 s. In our laser MVS, the motor is fed with 12 V, so it can be expected that it will turn 4 times slower. In fact, however, the effective sector of the robot MVS field of view is less than $\pi/2$, therefore, 0.03 s is quite

sufficient to turn the mirror to an arbitrary angle within the effective sector.

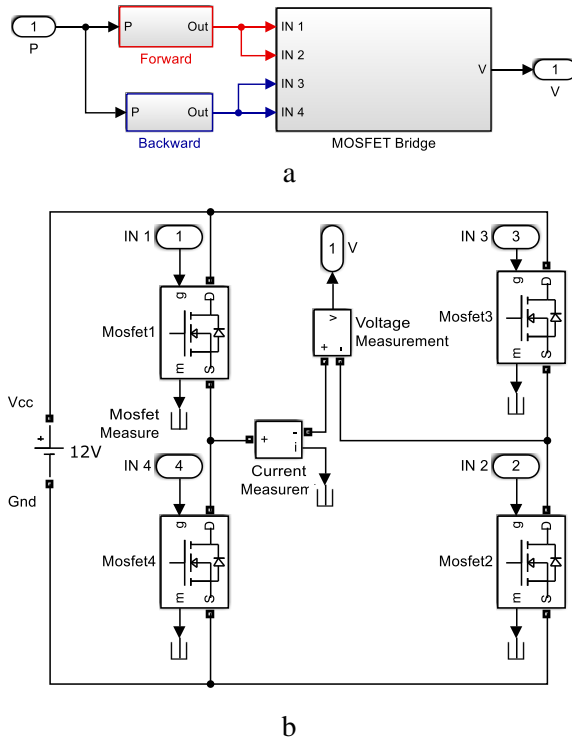


Fig. 6. The Simulink-model of the H-bridge subsystem in Fig. 4: a – general form, b – Content of the MOSFET Bridge subsystem

On the other hand, the transient process of the mirror positioning should have small overshoot to ensure that the right position of the recently scanned spatial point will be finally fixed quickly enough. It minimizes the fuzziness of the light spot and, subsequently, allows measuring the 3D coordinates of this point as soon as possible. In other words, it permits to accelerate the scanning process, at least, without accuracy losses, and in the best case it permits to increase the 3D coordinate’s accuracy due to the more precise positioning of the laser spot on the scanned surface.

Finally, the precision of the mirror positioning should be high enough to ensure the accuracy of the mapping of the environment and determining the shape of obstacles. Therefore, it is highly desirable that the steady-state error converges to zero. Thus, the design purpose is to meet the following requirements:

- the settling time should be less than 0.03 s with 2% tolerance;
- the overshoot of the system should tend to zero;
- no steady-state error.

Synthesis of a PD-controller for a determinis-

tic object does not cause serious difficulties. For our case, first, a continuous model of the DC motor was used (Fig. 2), and the Ziegler-Nichols method was applied to find the preliminary values of the coefficients k_p and k_d . Then, the controller was described with the transfer function (5), nonlinear elements were added to the control system (Fig. 4), the values of T_f and T_s in (5) were chosen and the coefficients k_p and k_d values were tuned manually.

$$C(z) = k_p + \frac{k_d/T_f}{1 + \frac{T_s}{T_f} \cdot \frac{z}{z-1}}, \quad (5)$$

where $k_p = 20$ represents the controller proportional gain; $k_d = 0.005$ the derivative gain, $T_f = 0.01s$ the filter time constant and $T_s = 0.001s$ the sampling time.

The simulation results are shown in Figs. 7 and 8. To test the performance of the LP system, the three command signals that correspond to 1.8, 8.6 and 14 degrees are applied to the system, and the responses are depicted in Fig. 7. These angles are chosen as far as they belong to sets of opening angles (scanning step angles) which are the most appropriate for the scanning with the laser MVS [27]. For example, the angles in the range 14.0–14.6 degrees are the biggest angles that permit to scan the scene the fastest possible way and without missing critical obstacles. The angle around 8.6 degree is the compromise between such constraints as “velocity” and “resolution”. The step angle around 1.8–4.0 degrees provides the slowest scanning, and it is applicable for small obstacles detecting or for precise coordinate measurement on the edge of obstacle under highest interest for collision prevention in the path planning task of robot navigation.

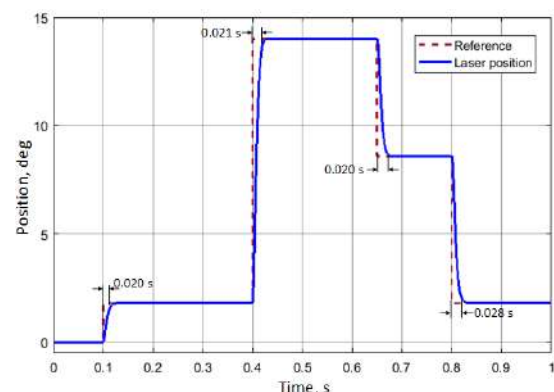


Fig. 7. The positioning of the laser drive

From Fig. 7 it is seen that the system meets the mentioned requirements, for instance, the settling time is about 0.02 s.

Fragment of the PWM signal fed to the laser drive which corresponds to the PD-controller output is presented in Fig. 8. This figure shows only the scaled part of the signals for clarity.

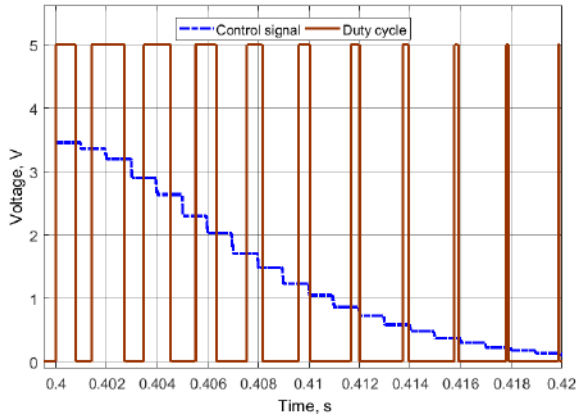


Fig. 8. The controller output and the corresponding PWM signal

System Robustness Examination

In spite of the fact that the obtained system meets the requirements, it is necessary to know how robust it is to variations of R , L , K_b , K_m , J and b within a certain range. Here we suppose that these parameters values can vary within the range of $\pm 40\%$ of the nominal values (Table 1).

Step response plots for the system computed at random values of the uncertain parameters from the specified ranges and with the controller (5) are shown in Fig. 9.

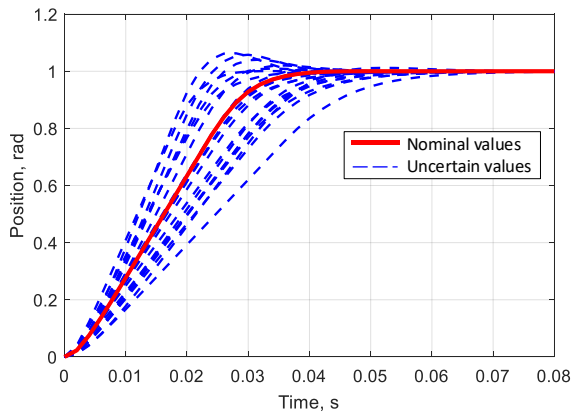


Fig. 9. The step responses for 20 values of the uncertain parameters for nominal tuning

From Fig. 7 and Fig. 9 it is obvious that though the controller (5), designed with the nominal model of the LP drive, meets the requirements for the transient process quality, the

variations of the model parameters values have a significant impact on the system performance and, first of all, on the settling time (Fig. 9). Moreover, the overshoot can appear which is undesirable for our system.

To evaluate the impact of the deviation of each parameter value from the nominal ones on the linearized LP system performance, the values of R and L , b and J , K_m and K_b were varied in pairs; the other parameters values remained constant. As an impact index, we used the normalized value of the mentioned above tuning goals, generated by the MATLAB *evalGoal* function (Figs. 10-12). Normalized value of tuning requirement, returned as a positive scalar, which is a measure of how closely the requirements are met in the tuned system. To satisfy all the requirements the *Performance* in Figs. 10-12 should be less than 1.

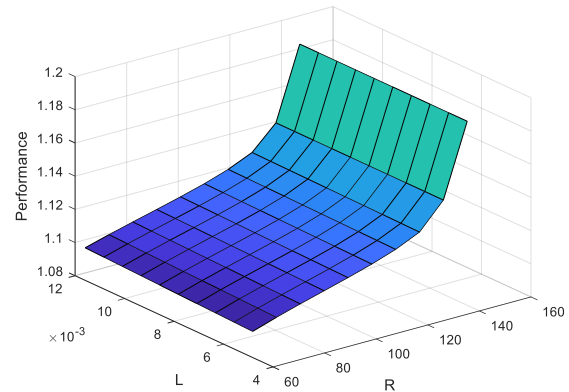


Fig. 10. The performance index over R and L versus nominal values of J , b , K_m and K_b

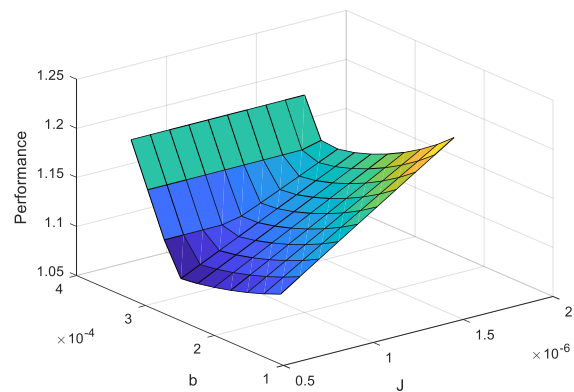


Fig. 11. The performance index over b and J versus nominal values of R , L , K_m and K_b

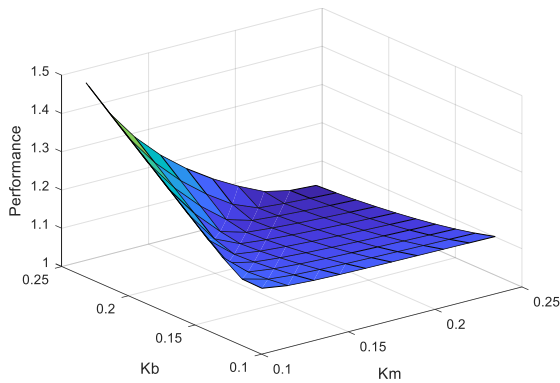


Fig. 12. The performance index over K_m and K_b versus nominal values of b , J , R and L

These figures show that the nominal tuning is very sensitive to changes in the model values parameters. Though the values of R , L , K_m and K_b are given in the catalogue [26] (Table 1), and in practice, they are unlikely to change in such wide ranges as in Table 1, identifying the friction force value of the LP drive is a highly challenging task [14]. Thus, Figs. 10-12 indicate the necessity to use a robust controller to minimize the negative impact of uncertainties on the system dynamic.

Robust controller

To design a robust controller the MATLAB function *systune()* has been used, which yields the following controller parameters: $k_p = 36.2$, $k_d = 0.143$ and $T_f = 2.31 \cdot 10^{-7}$. The robust properties of the system with the modified controller represent Fig. 13 and 14.

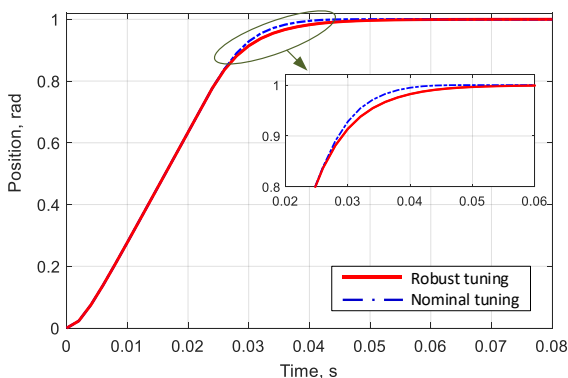


Fig. 13. The step responses for 20 uncertain parameters values for robust controller

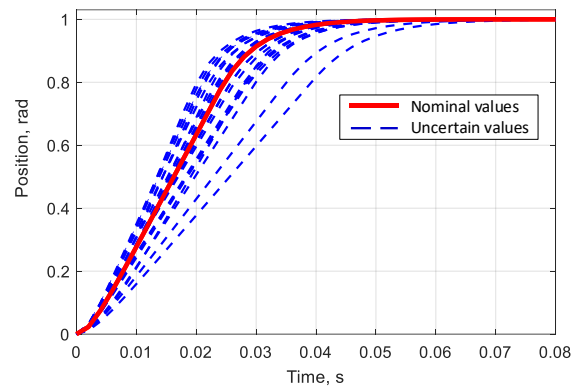


Fig. 14. The step responses for 20 uncertain parameters values for robust controller

The step response performance of the nominal LP system with the new controller is only slightly worse than the previous one (zoom on Fig. 13). Nevertheless, despite the similarity in the responses of the systems, the robust system does not have an overshoot at any combination of the uncertainties (Fig. 14), i.e. the robust controller provides better performance of the LP system over the nominal design. To ensure it the normalized parameter *Performance* is found for all pairs of R and L , b and J , K_m and K_b (Figs. 15-17) by analogy with Figs. 10-12.

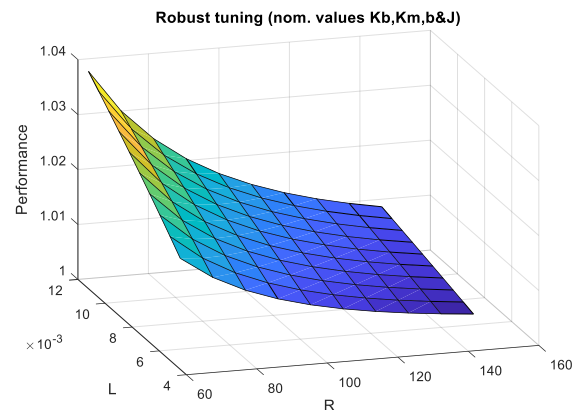


Fig. 15. The performance index for the robust system over R and L versus nominal values of J , b , K_m and K_b

Figs. 15-17 show, that *Performance* indexes for the robust system are much closer to 1 than ones for the system with the controller, tuned for the nominal motor parameter values.

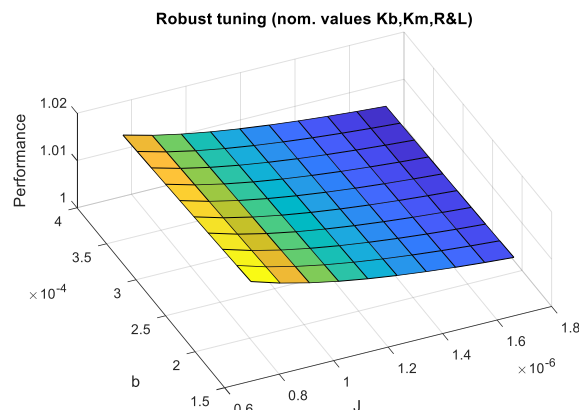


Fig. 16. The performance index for the robust system over b and J versus nominal values of R , L , K_m and K_b

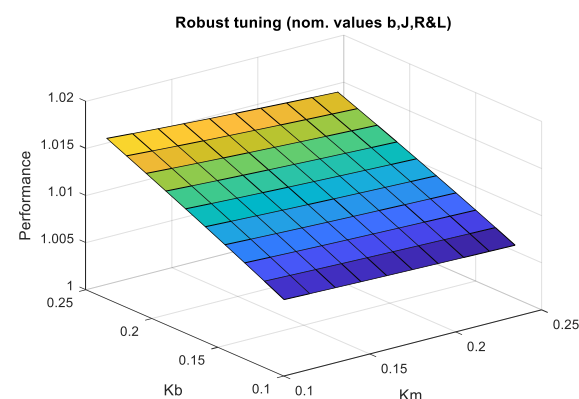


Fig. 17. The performance index for the robust system over K_m and K_b versus nominal values of b , J , R and L

Conclusion

Efficiency improving of the laser MVS for mobile robotics is associated, among the other things, with the accuracy and velocity of the laser beam positioning.

The use of a DC motor as a laser drive instead of a stepper motor allows reducing the relative positioning error of the laser beam, nevertheless, there is the problem of reducing the of the modelling error effects on the laser positioning.

In this paper, to cope with the uncertainties of the laser positioning system, we presented a robust PD-controller. This controller combines the simplicity of the technical implementation of a classical controller with a weak sensitivity to the uncertainty's presence. The processes that occur during the formation of the PWM by a microcontroller, and in the H-bridge, are taken into account as well.

The effectiveness of the obtained laser positioning system drive is confirmed by simulation.

However, it is necessary to determine, how the system works under external uncertain dis-

turbances. Investigation of this issue as well as the experimental study of the system is the task for future research.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest regarding the publication of this paper.

References

- Bresson G., Alsayed Z., Yu Li, and Glaser S., (2017). Simultaneous localization and mapping: a survey of current trends in autonomous driving. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 20, 194–220. DOI: 10.1109/TIV.2017.2749181.
- Li Z., Yang C., Su C.Y., Deng J., and Zhang W. (2016). Vision-based model predictive control for steering of a nonholonomic mobile robot. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 24(2), 553–564. DOI: 10.1109/TCST.2015.2454484.
- N. Shalal, Low T., McCarthy C., and Hancock N. (2015). Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion – Part A: Tree detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 119, 254–266. DOI: 10.1016/j.compag.2015.09.025.
- Su Z., et al. (2017). Global localization of a mobile robot using lidar and visual features. *Proc. ROBIO, Macao, China*, 2377–2383. DOI: 10.1109/ROBIO.2017.8324775.
- Kumar G.A., et al. A LiDAR and IMU integrated indoor navigation system for UAVs and its application in real-time pipeline classification. (2017). *Sensors*, 17(6), 1268 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/s17061268>.
- Kumar P., et al. An algorithm for automated estimation of road roughness from mobile laser scanning data. *The Photogrammetric Record*, 30(149), 30–45, 2015. DOI: 10.1111/phor.12090.
- Song C., Wang X., and Cui N. (2018). Mixed-Degree Cubature H_∞ Information Filter-Based Visual-Inertial Odometry. *Applied Sciences*, 9(1), 56. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/app9010056>
- Huang K. and Stachniss C. (2018). Joint ego-motion estimation using a laser scanner and a monocular camera through relative orientation estimation and 1-DoF ICP. *Proc. IROS, Madrid, Spain*, 671–677. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593965
- Ivanov M., et al. (2019). Mobile Robot Path Planning Using Continuous Laser Scanning. *Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications*, IGI Global, 338–372. [Online] Available: DOI: 10.4018/978-1-5225-5751-7.ch012.
- Wen S., et al. (2018). Camera recognition and laser detection based on EKF-SLAM in the autonomous navigation of humanoid robot. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 92(2),

- 256–277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0712-5>.
11. Zhao P., et al. (2018). Panoramic Image and Three-Axis Laser Scanner Integrated Approach for Indoor 3D Mapping. *Remote Sensing*, 10(8), 1269. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/rs10081269>
 12. Basaca-Preciado L. C., et al. (2014). Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot. *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 159–169. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.005.
 13. Lindner L., et al. (2016). Mobile robot vision system using continuous laser scanning for industrial application. *Industrial Robot*, 43(4), 360–369. DOI: 10.1108/IR-01-2016-0048.
 14. Lindner L., et al. (2017). Machine vision system errors for unmanned aerial vehicle navigation. *Proc. ISIE, Edinburgh, UK*, 1615–1620. DOI: [10.1109/ISIE.2017.8001488](https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001488).
 15. Reyes-García M., et al. (2018). Reduction of angular position error of a machine vision system using the digital controller LM629. *Proc. IECON 2018, Washington, D.C., USA*, 3200–3205.
 16. Lindner L., et al. (2016). UAV remote laser scanner improvement by continuous scanning using DC motors. *IECON 2016, Florence, Italy*, 371–376. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793316.
 17. Tamaki K., et al. (1986). Microprocessor-based robust control of a DC servo motor. *IEEE Control Systems Magazine*, 6(5), 30–36, 1986. DOI: 10.1109/MCS.1986.1105133.
 18. Fallahi M. and Azadi S. (2009). Robust control of DC motor using fuzzy sliding mode control with PID compensator. *IMECS, Hong Kong, China*, 2, 5. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.148.9267&rep=rep1&type=pdf>
 19. Eker I. (2006). Sliding mode control with PID sliding surface and experimental application to an electromechanical plant. *ISA Trans.*, 45(1), 109–118. DOI: 10.1016/S0019-0578(07)60070-6.
 20. Březina L. and Březina T. (2011). H-infinity controller design for a DC motor model with uncertain parameters. *Engineering Mechanics*, 18, (5-6), 271–279.
 21. Dey N., Mondal U., and Mondal D. (2016). Design of a H-infinity robust controller for a DC servo motor system. *Proc. ICICPI, Kolkata, India*, 27–31. DOI: 10.1109/ICICPI.2016.7859667.
 22. Nguyen B. H., Ngo H. B., and Ryu J. H. (2009). Novel robust control algorithm of DC motors. *Proc. URAI, Gwangju, Korea*, 119–122.
 23. Dorf R. C. and Bishop R. H. (2010). *Modern Control Systems*, 12th ed., Prentice Hall.
 24. Гурко А.Г. (2019). Робастное управление приводом лазера системы технического зрения. *Радиоэлектроника, информатика, управление*, 1, 238–246. Gurko A. (2019). Robastnoe upravlenie privodom lazera sistemyi tehničeskogo zreniya. [Robust control of laser actuator for technical vision system]. *Radio Electronics Computer Science Control*, 1, 238–246. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-1-22.
 25. Gu D.-W., Petkov P. H., and Konstantinov M.M. (2013). *Robust control design with MATLAB*, 2nd ed., Springer Science & Business Media.
 26. Maxon RE-max Catalog. (2013). Maxon Motor, Sachseln, Switzerland. [Online]. Available: <http://storkdrives.com/wp-content/uploads/2013/10/maxon-RE-max-catalog-data1.pdf>
 27. Garcia-Cruz X. M., et al. (2014). Optimization of 3D laser scanning speed by use of combined variable step. *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 141–151. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.011
- Gurko Alexander¹**, Professor, Dr. of Sc, professor of the Automation and Computer-Integrated Technologies Department, +38(057) 738-77-92 gurko@khadi.kharkov.ua, ORCID: 0000-0001-9905-8584.
- Sergiyenko Oleg²**, Associate Professor, Dr. of Sc, srgnk@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0003-4270-6872.
- Lindner Lars²**, PhD, lindner.lars@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0002-0623-6976.
- ¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
- ²Engineering Institute of Autonomous University of Baja California, Mexico, Blvd. Benito Juarez y Calle de la Normal, s/n, Col. Insurgentes Este, 21280, Mexicali, Baja California, Mexico.
- Робастна система позиціонування лазера в системі машинного зору мобільного робота**
Анотація. Проблема. Рух автономного мобільного робота у невідомому оточуючому середовищі вимагає вирішення ряду завдань, пов'язаних із побудовою карти оточення та визначенням просторово-часової орієнтації робота на цій карті. Для вирішення вказаних завдань роботи обладнані системами машинного зору (СМЗ), до складу багатьох з яких входять лазерні сканери. Однією із проблем при використанні СМЗ є виявлення відносно невеликих перешкод. Для цього лазер повинен вміти з високою точністю сканувати обмежений сектор поля зору або фокусуватися на певній точці простору. Однак, як СМЗ в цілому, так й привід лазера працюють в умовах невизначеності, що перешкоджає ефективному виконанню покладених на СМЗ завдань. **Мета:** підвищення надійності виявлення перешкоди в полі зору системи технічного зору робота за рахунок робастного керування приводом системи позиціонування лазера. **Методологія.** Побудована модель двигуна постійного струму, що є

приводом лазера у СМЗ, з урахуванням параметричної невизначеності. Синтезовано робастний цифровий ПД-регулятор приводу позиціонування лазера. Проведена порівняльна оцінка робастних властивостей отриманої системи керування з системою з класичним регулятором. Ураховано процеси, що відбуваються при формуванні мікроконтролером ШИМ-сигналу, та у Н-мості. **Результати.** Одержаний цифровий регулятор задовольняє висунутим вимогам до якості перехідного процесу та точності у сталому режимі в умовах параметричної невизначеності. **Оригінальність** результатів роботи полягає у орієнтацію на розроблену авторами СТЗ автономного мобільного робота. **Практичне значення.** Застосування отриманого регулятора в лазерній СТЗ підвищить надійність виявлення перешкод і

точність побудови карти оточуючого робота середовища.

Ключові слова: двигун постійного струму, позиціонування лазера, система машинного зору, робастне керування.

Гурко Олександр Геннадійович¹, д.т.н., проф. каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, gurko@khadi.kharkov.ua.
ORCID: 0000-0001-9905-8584.

Сергієнко Олег Юрійович², д.т.н., доцент, srgnk@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0003-4270-6872.

Лінднер Ларс², PhD, lindner.lars@uabc.edu.mx.
ORCID: 0000-0002-0623-6976.

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

²Інститут Інженерії Автономного університету Нижня Каліфорнія, м. Мехікалі, Нижня Каліфорнія, Мексика.

УДК 681.51

DOI: 10.30977/VEIT.2021.20.0.04

Метод вибору системи автоматичного управління автогрейдера

Ільге І. Г.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

***Анотація.** Проаналізовано представлені на ринку системи автоматичного управління автогрейдерами. Визначено і обґрунтовано економічні, техніко-експлуатаційні та ергономічні групи критеріїв вибору системи автоматичного управління автогрейдера. Розроблено метод нечіткого багатокритеріального аналізу для вибору системи автоматичного управління автогрейдера в класі 3D систем.*

***Ключові слова:** автогрейдер, система автоматичного управління, теорія нечітких множин, метод вибору, будівництво доріг, критерії.*

Вступ

В сучасних умовах оновлення інфраструктури автомобільних доріг нагальною є потреба ефективного використання дорожніх будівельних машин на всіх етапах дорожнього будівництва.

Однією з основних дорожніх машин, що використовуються при будівництві доріг є автогрейдери, що виконують значний обсяг робіт при профілюванні та планування шарів дорожнього покриття, ремонті та асфальтуванні.

Ефективне застосування автогрейдерів, у першу чергу їх продуктивність і точність профілювання, неможливе без використання сучасних систем автоматичного управління.

Разом з тим проблема вибору доцільної системи автоматичного управління (САУ) автогрейдером є актуальною, тому що на ринку України є в наявності велика кількість зразків таких систем, що відрізняються технічними, експлуатаційними та іншими характеристиками і відсутній науково-обґрунтований метод вибору таких систем, що має враховувати цю сукупність характеристик.

Аналіз публікацій

Автогрейдери розрізняють за агрегуванням, масою, потужністю, типом приводу, конструктивними особливостями [1]. Най-

більш поширеними є самохідні машини з гідромеханічною трансмісією.

Обладнання системами автоматичного управління в даний час характерне для різних типів самохідних автогрейдерів, що вирішують цілу низку різноманітних завдань по будівництву та ремонту доріг [1]:

- переміщення сипучих будівельних матеріалів;
- побудова невеликих насипів;
- профілювання та планування ґрунтових поверхонь;
- розробка та перемішування матеріалів;
- прокладка кюветів та водостічних каналів, тощо.

При виконанні оператором автогрейдера цих завдань з використанням САУ мають місце наступні позитивні риси:

- більш висока точність та стабільність рівня якості виконання робіт;
- зменшення трудомісткості роботи оператора;
- економія робочого часу;
- суттєво зменшення кількості помилок під час виконання робіт;
- можливість виконання робіт в умовах обмеженої видимості робочого майданчика;
- можна більш точно оцінити кількість потрібних будівельних матеріалів.
- отримання необхідного масиву інформації щодо параметрів виробничого процесу

оператором автогрейдера.

В залежності від конкретного типу САУ перелічені вище переваги мають місце в більшій або меншій мірі.

В масштабних проектах дорожнього будівництва використовується велика родина автогрейдерів різних видів, що застосовують виготовлені різними виробниками системи автоматичного управління, але основна частина ринку таких САУ належить декільком корпораціям, а саме Trimble (США), Topcon (Японія), Leica (Швейцарія) та MOBA (Німеччина) [2-4].

Зокрема, цілу низку САУ для автогрейдерів пропонує фірма Trimble у всіх класах таких систем [2].

Так, найпростіша з класу 2D систем - кутова 2D система Trimble містить наступні основні елементи:

- Trimble AS400 датчик нахилу;
- Trimble RS400 датчик обертання;
- Trimble PM400 модуль керування живленням;
- Trimble CB450 або CB460 дисплей керування машиною з програмним забезпеченням.

Ця система дозволяє після встановлення оператором початкового положення відвалу підтримувати постійний поперечний профіль оброблюваної ділянки, отримуючи дані від датчиків кутів повороту, обробляючи їх та формуючи сигнал для гідравліки для автоматичної підтримки кута відвалу заданого оператором. Таким чином, її застосування спрощується керування автогрейдером та знижує вимоги до рівня підготовки оператора автогрейдера.

Більше можливостей надає інша САУ цього класу – лазерна 2D система Trimble, при використанні якої застосовується лазерний будівник площині, що встановлюється оператором перед початком робіт. В її складі порівняно з кутовою системою додатково є щогла Trimble EM400 та лазерний приймач Trimble LR410.

Встановлений на щоглі, що механічно пов'язана з відвалом автогрейдера, лазерний приймач приймає лазерний промінь і передає дані в систему управління, що формує сигнал для керування виконавчими механізмами відвалу. Отже, процес профілювання відбувається в автоматичному режимі з високою точністю, а оператор має можливість контролювати якість поверхні не виходячи з машини. Обмеженням при використанні цієї

системи є те, що її можна застосовувати лише при профілюванні плоских ділянок.

Ультразвукова 2D система Trimble використовує ультразвукові датчики, що встановлені на одному або двох краях відвалу. Оператор позиціонує датчик над струною або іншим копіром і після цього система автоматично підтримує заданий оператором кут і висоту над копіром, а оператор керує напрямком руху автогрейдера. Однак при застосуванні цієї системи час виконання робіт суттєво збільшується за рахунок операцій по встановленню копіра.

В класі 3D Trimble пропонує 3D GPS / ГЛОНАСС систему, що передбачає використання базової станції GNSS (тобто GNSS-приймача з радіомодемом), що має бути встановлена на будівельному майданчику і в точці з визначеними координатами. GNSS-приймачі, що встановлені щоглах, закріплені на відвалі на машині, визначають своє положення з урахуванням даних, отриманих з базової станції через радіоканал, передають ці дані в керуючий блок системи.

Керуючий блок порівнює ці дані з проектними, визначає керуючий сигнал і передає його на виконавчі механізми, що позиціонують відвал.

Таким чином автоматично підтримується відтворення проектною поверхні будь-якого рівня складності з точністю ± 1 см.

Разом з тим треба зазначити, що використання цієї системи потребує 3D моделі поверхні, що не завжди є в наявності. Істотним обмеженням є також суттєвий вплив зовнішнього середовища на передавання даних по радіоканалу та на зв'язок з супутником.

3D UTS система Trimble – ще один представник 3D систем, який застосовується при необхідності виконати чистову обробку поверхні з точністю в декілька міліметрів (наприклад, під укладку асфальту). На відміну від попередньої САУ в даній системі на будівельному майданчику встановлений роботизований тахеометр, зв'язаний по радіоканалу з бортовим комп'ютером. На відвалі автогрейдера закріплений на щоглі відбивач, за положенням якого стежить тахеометр, передаючи дані 20 разів на секунду на комп'ютер. Останній порівнює дані тахеометра з 3D моделлю проектною поверхні і формує керуючий сигнал, що передається на гідравліку відвала. Однак треба зазначити, що тахеометр діє на відстань до 500 метрів.

Корпорація Торсон для автоматизації управління автогрейдером пропонує ще одну модель з класу 3D – систему Торсон 3D mmGPS, в якій зроблено спробу поєднати переваги систем, що використовують глобальну систему супутникової навігації, і систем, що використовують лазерні опорні поверхні [3].

Базовий комплект Торсон 3D mmGPS містить датчики поперечного та поздовжнього ухилів, датчик повороту відвалу, а також ГНСС обладнання та компоненти mmGPS – , передавач лазерної зони PZL-1 та приймач PZS-MC. Використання технології LazerZone збільшує точність висотної складової супутникових вимірювань до міліметрової точності.

При цьому в Торсон 3D mmGPS декларується реалізація повного автоматичного контролю за робочим обладнанням автогрейдера та максимальна зручність в експлуатації. Також пропонується можливість одночасної роботи різних машин від одного і того ж опорного передавача лазерної зони, при цьому разом з автогрейдерами системою користуються будівельні машини інших типів, оснащені САУ класу 3D. Отже, при застосуванні цієї системи на об'єктах з великими обсягами робіт має додаткові переваги [3]. Разом з тим дана система є залежною від надійності отримання супутникових сигналів і її використання утруднюється в зонах проблемного приймання сигналів.

Ще однією системою в класі 3D від цієї ж корпорації є система Торсон 3D LPS, яка ґрунтується на використанні як опорного елемента роботизованого електронного тахеометра, що знаходиться в контрольній точці з відомими координатами. Застосування електронних тахеометрів дозволяє отримати високу точність позиціонування [3]. Реальне положення відвалу, що відстежується тахеометром, порівнюється з 3D моделлю проекту в бортовому комп'ютері автогрейдера і це дозволяє формувати поверхню з міліметровою точністю. Однак при цьому треба брати до уваги обмежений радіус дії тахеометра і залежність системи від погодних умов.

Система Leica iGG3 [3] реалізує концепцію швидкого монтування та знімання компонентів, дозволяє змінювати конфігурацію з однієї на іншу (змінна панель контролерів) залежно від вимог до робіт, що виконуються. Безконтактна панель управління цієї системи дозволяє позбутися проблем, що мають місце

при кабельному з'єднанні. 3D система надає можливість працювати незалежно та з максимальною точністю в будь-якому місці проектною поверхні з керуванням GPS системою або роботизованим тахеометром. Ще однією перевагою система Leica iGG3 є автоматичний контроль зміщення відвалу з використанням високоточної технології TriSonic, зокрема є функція автоматичного утримання нахилу. В Leica iGG3 реалізовано повну інтеграцію хмарного рішення та мережної платформи для візуалізації та обміну даними з центральним офісом.

Однак, треба зауважити, що бездротові канали передавання даних, що використані в цій системі, накладають певні обмеження на її застосування, зокрема в зонах суттєвих завад.

Система MOBA 3D-Matic [5] за допомогою ГНСС визначає положення машини та висоту відвалу, при старті руху машини визначається її орієнтація. Ці дані зіставляються із завантаженою інформацією у вигляді 3D проекту, до якого вже внесені всі проектні поздовжні та поперечні ухили, а також висота. При умиканні система MOBA 3D-Matic автоматично встановлює відвал на проектну висоту. Однак системі притаманні всі обмеження, що накладаються на застосування супутникових систем, до того ж бренд MOBA давно і надійно асоціюється з класом 2D систем і його вихід на ринок 3D систем відбувся відносно недавно.

Отже, розробники та постачальники систем автоматичного управління пропонують достатньо широкий вибір моделей САУ для автогрейдерів. Ці моделі характеризуються великим набором параметрів, при цьому значення деяких з них не вказується постачальниками, а достовірність значень багатьох параметрів є сумнівною.

Таким чином, вибір доцільного варіанта САУ автогрейдера відбувається в умовах нечіткого представлення даних щодо параметрів цих систем.

Розробка моделей вибору альтернатив технічних систем в умовах невизначеності останнім часом відбувалася методами, що мають за основу метод аналізу ієрархій [6-9].

В роботі [6] було розглянуто застосування варіанту методу аналізу ієрархій з частковим урахуванням нечіткості даних для вибору ріжучого інструменту, в роботі [7] застосовано класичний варіант методу аналізу ієрархій для вибору трактора для сільськогоспо-

дарських робіт. Комбінація методу аналізу ієрархій з методом функцій переваг запропоновано для вибору конструкцій в роботі [8].

Також метод аналізу ієрархій застосовувався для вибору альтернатив серед САУ для окремих класів дорожніх машин, зокрема САУ дорожньої фрези [9].

Однак для вибору доцільної альтернативи необхідно, по можливості, охопити як можна більше характеристик, а при зростанні кількості критеріїв при застосуванні методу аналізу ієрархій виникають певні труднощі [10].

Разом з тим для здійснення вибору в умовах нечіткої інформації використовують методи, що ґрунтуються на теорії нечітких множин [11]. Зокрема, в роботі [12], виконано порівняння цих методів з методом аналізу ієрархій і показана їх конкурентоспроможність. В роботі [13] методи теорії нечітких множин використані в задачі прийняття рішення про купівлю будинку. В роботі [14] вказані методи застосовані для вибору проєктної команди. Методи теорії нечітких множин використані для вибору бренд-проєкту в роботі [15].

Разом з тим в літературі відсутні дані щодо методу вибору САУ автогрейдерів в умовах нечіткого представлення інформації.

Мета та постановка задачі

Метою даної роботи є підвищення ефективності застосування автогрейдерів в дорожньому будівництві за рахунок доцільного вибору САУ автогрейдера. Для досягнення цієї мети найбільш доцільним є застосування теорії нечітких множин [12].

Завдання роботи:

- обґрунтування критеріїв вибору САУ автогрейдера для дорожнього будівництва;
- розробка методу вибору САУ в умовах невизначеності для дорожнього будівництва на основі теорії нечітких множин із застосуванням обґрунтованих критеріїв.

Обґрунтування критеріїв вибору

Ефективність застосування систем автоматичного управління дорожніх машин залежить від сукупності технічних, економічних та ергономічних факторів.

В сучасних умовах дорожньому будівництву приділяється достатньо велика увага, але досить високий рівень цін на сучасні системи автоматичного управління дорожніми машинами та значна вартість їх обслуговування,

особливо в класі 3D систем, можуть стати пороговими критеріями при виборі САУ, навіть з урахуванням швидкої окупності цих витрат при великих обсягах виконуваних робіт. Тому критерії вартості придбання САУ і вартості їх застосування мають бути враховані при виборі САУ.

При виконанні автогрейдером дорожніх будівельних робіт бажано отримувати заданий кінцевий результат з максимальною продуктивністю і потрібною точністю, що має бути забезпечено саме застосуванням системи автоматичного управління, яка дозволяє знизити кількість проходів відвала до необхідного мінімуму та виконувати операції з недосяжною для навіть досвідченого оператора точністю. Отже, критерії точності та підвищення продуктивності у великій мірі визначають ефективність застосування САУ і тому мають бути враховані при виборі.

Час монтажу САУ на автогрейдер, трудомісткість її налагодження є суттєвим фактором, що впливає на питому вагу часу корисного використання автогрейдера, тому цей критерій потрібно враховувати при виборі САУ.

Вихід з ладу будь-якої САУ дорожньої машини, зокрема автогрейдера, під час виконання робіт тягне за собою неефективне використання або навіть неможливість продовження виконання запланованих робіт, тому надійність має також бути врахована при виборі САУ.

Якщо в застосуванні САУ все ж виникли певні проблеми, то від швидкості їх вирішення залежить подальше ефективне використання автогрейдера. Тому наявність і якість сервісного обслуговування САУ є необхідним критерієм при оцінюванні САУ.

Автогрейдер є багатофункціональною дорожньою машиною, тому важливо мати можливість використання переваг застосування САУ у як можна ширшому колі виконуваних ним операцій, що висуває операційний діапазон застосування в якості критерія оцінки САУ.

При цьому рівень складності завдань, пов'язаний, наприклад, з неплоским характером поверхні, що має виконувати автогрейдер, також в значній мірі визначається класом та структури побудови САУ, що застосовується. Тобто можливість автоматичного виконання складних завдань також є важливим критерієм вибору САУ.

Перелік завдань і складність завдань, що має вирішувати САУ автогрейдера, можуть змінюватися. При такій зміні важливо мати можливість модернізувати наявну систему до необхідного рівня, не витрачаючи кошти на придбання нової. Отже, можливість модернізації також є суттєвим критерієм оцінювання САУ автогрейдера.

Переваги від застосування САУ можуть значно зрости, якщо є можливість одночасного її використання для декількох автогрейдерів. З цього випливає необхідність врахування даного критерію при порівнянні САУ.

Умови виконання дорожніми машинами, і зокрема, автогрейдерами, окремих видів виробничих завдань можуть бути важкими або небезпечними. В цьому випадку наявність і якість дистанційного керування виробничим процесом має велике значення і її теж треба врахувати при виборі САУ.

При виконанні проектів будівництва доріг цінною для ефективної організації проектних робіт є можливість оперативного контролю з боку центрального офісу за ходом виконання операцій, а також можливість оперативного уточнення проектних даних і звірки їх на місці робіт. Наявність і якість даної опції САУ є суттєвою для її оцінки.

Незважаючи на розвинені можливості сучасних САУ остаточні рішення в процесі виконання робіт приймає оператор автогрейдера, тому важливою є раціональна організація його взаємодії з САУ, що передбачає, по-перше, наявність простого та зручного інтерфейсу, по-друге розвинену систему екранної візуалізації операцій, що виконує автогрейдер, і по-третє наявність ефективної підсистеми клімат-контролю і захисту оператора від впливів зовнішнього середовища. Перелічені фактори також необхідно враховувати при виборі САУ.

Ефективне використання дорожніх машин і зокрема, автогрейдерів, потребує наявності вбудованої підсистеми діагностики і реєстрації, що здійснює самодіагностику САУ і контроль систем автогрейдера. Наявність і розвиненість цієї підсистеми дозволяє попередити про можливий вихід автогрейдера з ладу і мінімізувати втрати при виникненні такої ситуації, що є значущими при виборі САУ [2].

Таким чином, метод вибору САУ автогрейдера має враховувати перелічені вище критерії.

Розробка методу вибору САУ автогрейдера

Метод вибору САУ автогрейдера буде створена на основі теорії нечітких множин [11].

Вибір САУ автогрейдера проводитимемо на основі порівняльного аналізу лідерів цього сегменту ринку в класі 3D, а саме систем:

- Trimble 3D GPS / ГЛОНАСС;
- 3D UTS система Trimble;
- Topcon 3D ГНСС;
- Leica iGG3.

Оцінка САУ автогрейдерів буде виконуватися за економічними, техніко-експлуатаційними та ергономічними групами критеріїв.

В економічній групі критеріями є вартість придбання САУ та вартість експлуатації САУ.

В техніко-експлуатаційній групі містяться наступні критерії:

- точність;
- продуктивність;
- трудомісткість монтажу і налагодження;
- надійність;
- рівень сервісного обслуговування САУ;
- діапазон операцій, що підтримується САУ;
- адаптованість до виконання складних завдань;
- можливості модернізації;
- використання для декількох автогрейдерів;
- дистанційне управління;
- взаємодія с центральним офісом;
- підсистема діагностики і реєстрації.

Ергономічна група містить наступні критерії:

- зручність інтерфейсу;
- візуалізація операцій;
- підсистема клімат-контролю.

Вважаємо при постановці завдання вибору САУ автогрейдера, що перераховані вище критерії однаково важливі. Множина альтернатив X при виборі складається з чотирьох вище перерахованих систем автоматичного управління, які позначаються x_i :

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}, \quad (1)$$

де x_1 – Trimble 3D GPS / ГЛОНАСС; x_2 – 3D UTS система Trimble; x_3 – Topcon 3D ГНСС;

x_4 – Leica iGG3.

Альтернативи будемо оцінювати із використанням множини, що містить 17 рівнозначних критеріїв:

$$K = \{K_i\}, i = \overline{1,17}, \quad (2)$$

де K_1 – вартість придбання САУ; K_2 – вартість експлуатації САУ; K_3 – точність; K_4 – продуктивність; K_5 – трудомісткість монтажу і налагодження; K_6 – надійність; K_7 – рівень сервісного обслуговування САУ; K_8 – діапазон операцій, що підтримується САУ; K_9 – адаптованість до виконання складних завдань; K_{10} – можливості модернізації; K_{11} – використання для декількох автогрейдерів; K_{12} – дистанційне управління; K_{13} – взаємодія з центральним офісом; K_{14} – підсистема діагностики і реєстрації; K_{15} – зручність інтерфейсу; K_{16} – візуалізація операцій; K_{17} – підсистема клімат-контролю.

Оцінки альтернатив по кожному з критеріїв, що входять до множини $\{K_i\}$, можна представити як нечітку множину [11]:

$$V(K_i) = (\tau_{K_i}(x_1), \tau_{K_i}(x_2), \tau_{K_i}(x_3), \tau_{K_i}(x_4)), \quad (3)$$

де $\tau_{K_i}(x_l)$ – оцінка альтернативи x_l $l = \overline{1,4}$ за критерієм K_i ($i = \overline{1,17}$).

Рішенням завдання вибору є альтернатива x_l , що у найбільшій мірі відповідає вимогам за всією сукупністю критеріїв.

Вирішальне правило P для вибору найкращої альтернативи лежить на перетині відповідних нечітких множин:

$$P = V(K_1) \cap V(K_2) \cap V(K_3) \dots \cap V(K_i). \quad (4)$$

Використовуючи визначення операції перетину [12] нечітких множин можна визначити функцію приналежності шуканого рішення за допомогою залежності:

$$\tau_p(x_l) = \min_{i=\overline{1,17}} (\tau_{V(K_i)}(x_l)), l = \overline{1,4}. \quad (5)$$

Найкращою буде альтернатива x^* , для якої значення функції належності $\tau_p(x_l)$ виявиться максимальним, тобто буде виконано співвідношення:

$$\tau_p(x_l^*) = \max_{l=\overline{1,4}} (\tau_p(x_l)). \quad (6)$$

Таким чином, рішенням завдання вибору САУ автогрейдера є альтернатива x^* , що найбільшою мірою задовольняє всім критеріям у сукупності.

Для визначення ступеня відповідності (функції належності) кожної з альтернатив кожному з вищеописаних критеріїв за допомогою методики, викладеної в роботі [15], складено Таблицю 1, виходячи з даних робіт [2-4].

Таблиця 1. Значення функції належності

Часткові критерії	Значення функцій належності альтернатив за частковими критеріями			
	$\tau(x_1)$	$\tau(x_2)$	$\tau(x_3)$	$\tau(x_4)$
$V(K_1)$	0,5	0,7	0,6	0,7
$V(K_2)$	0,4	0,8	0,5	0,6
$V(K_3)$	0,6	0,8	0,6	0,8
$V(K_4)$	0,7	0,7	0,8	0,7
$V(K_5)$	0,5	0,7	0,5	0,8
$V(K_6)$	0,6	0,8	0,5	0,6
$V(K_7)$	0,6	0,6	0,7	0,8
$V(K_8)$	0,7	0,7	0,6	0,8
$V(K_9)$	0,5	0,6	0,5	0,7
$V(K_{10})$	0,6	0,6	0,6	0,8
$V(K_{11})$	0,6	0,4	0,8	0,6
$V(K_{12})$	0,7	0,6	0,7	0,6
$V(K_{13})$	0,8	0,5	0,8	0,7
$V(K_{14})$	0,5	0,6	0,5	0,6
$V(K_{15})$	0,7	0,6	0,7	0,7
$V(K_{16})$	0,6	0,5	0,6	0,6
$V(K_{17})$	0,7	0,7	0,6	0,6
Найменше значення	0,4	0,4	0,5	0,6

Знаходимо шукану альтернативу як перетин приведених в таблиці множин використовуючи вирішальне правило P :

$$P = \{(x_1; 0,4), (x_2; 0,4), (x_3; 0,5), (x_4; 0,6)\}. \quad (7)$$

Отже, в результаті порівняння між собою отриманих функцій приналежності кожної з альтернатив виявлено, що найкращою альтернативою є x_4 , тобто. система Leica iGG3.

Висновки

Проаналізовано проблему вибору системи автоматичного управління автогрейдером, а саме проведено аналіз існуючих зразків САУ від лідерів по виробництву даних систем і

визначено необхідність побудови методу вибору, що дає можливість враховувати сукупність основних характеристик САУ автогрейдера в умовах нечіткості інформації.

Обґрунтовано сукупність критеріїв вибору доцільного варіанта системи автоматичного управління автогрейдером.

Розроблено метод вибору САУ автогрейдера на базі застосування теорії нечітких множин, що дозволяє, на відміну від існуючих, визначити доцільну альтернативу з урахуванням нечіткості інформації.

Запропонований метод дозволяє підвищити ефективність застосування автогрейдерів в дорожньому будівництві за рахунок доцільного вибору САУ.

При подальших дослідженнях планується узагальнити розроблений метод на інші класи дорожніх будівельних машин.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Л. А. Хмара, С. В. Кравець, & В. В. Нічке (2010) *Машини для земляних робіт : навч. посіб.* (Рівне-Дніпропетровськ-Харків) L. A. Khmara, S. V. Kravets, & V. V. Nichke (2010) *Mashyny dlia zemlianykh robit : navch. posib.* [Machines for earthworks: textbook.] Monograph. (Rivne-Dnipropetrovsk-Kharkiv): [in Ukrainian]
2. Trimble Grade Control Systems GCS900 2D for Mo-tor Graders. URL: https://sitech.ch/fileadmin/datenblaetter/Trimble_Spec_GCS900_GRADER_E.pdf (Last accessed:03.11.2021).
3. Motor Grader - 3D. URL: <http://www.topconcare.com/en/hardware/grading-systems/motorgrader-3d-gps/>(Last accessed:03.11.2021).
4. Grader. URL: <https://leica-geosystems.com/en-in/products/machine-control-systems/grader> (Last accessed:03.11.2021)
5. В.А. Тумаков. (2019). Системы нивелирования МОБА для дорожно-строительных машин (ООО «КОРРУС-Техникс») V.A. Tumakov(2019). *Sistemyi nivelirovaniya MOBA dlya dorozhno-stroitelnyih mashin* [MOBA leveling systems for road construction machines] Monograph (ООО «KORRUS-Tehniks»)[in Russian]
6. Phung XL, Truong HS, Bui NT. (2019). Expert system based on integrated fuzzy AHP for automatic cutting tool selection. *Applied Sciences* (Switzerland). 2019 Oct 1;9(20). <https://doi.org/10.3390/app9204308>
7. Amini S., Asoodar M.A. (2016), Selecting the most appropriate tractor using Analytic Hierarchy Process – An Iranian case study. *Information Processing in Agriculture*, 3(4), 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.003>.
8. I. Temiz, G. Calis. (2017), Selection of Construction Equipment by using Multi-criteria Decision Making Methods, *Procedia Engineering*, 196, 286-293. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.201>
9. Ільге, І.Г., Модель вибору САУ дорожньої фрези. (2021) Ilhe, I.H., Model vyboru SAU dorozhnoi frezy. (2021)[Model of the choice of ACS of a road mill.] *Vestnik HNADU: sb. nauch. tr.* 92. 103-108[in Ukrainian] <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.0.103>
10. Коробов В.Б., Тутыгин А.Г.(2016) Проблемы использования метода анализа иерархий и пути их решения. /Korobov V.B., Tutuyigin A.G.(2016) *Problemyi ispolzovaniya metoda analiza ierarhiy i puti ih resheniya.* [Problems of the Analytic Hierarchy Process and Some Solutions]. *Ekonomika i upravlenie. sb. nauch. tr.* (8):60-65. [In Russian]
11. Zadeh, L. A. (2013). Fuzzy logic. In *Computational Complexity: Theory, Techniques, and Applications* (Vol. 9781461418009, pp. 1177–1200). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1800-9_73.
12. P. Natraj, S. Sandhiya, & K. Selvakumari. (2020). FUZZY SETS AND ITS APPLICATION IN DECISION MAKING PROBLEMS BY COMPARING THREE METHODS. *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt / Egyptology*, 17(7), 4841-4848.
13. Hemlata Aggarwal, H., Arora, D., & Vijay Kumar(2019) A Decision-making Problem as an Applications .of Intuitionistic Fuzzy Set. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 9(2), 5259-5261 DOI: 10.35940/ijeat.A1053.129219
14. Нефедов, Л. И., Петренко Ю. А., & Шевченко М. В. (2012). *Методологические основы синтеза офисов по управлению программами и проектами.* Nefedov, L. I., Petrenko Yu. A., & Shevchenko M. V. (2012). *Metodologicheskie osnovyi sinteza ofisov po upravleniyu programmami i proektami.* [Methodological foundations for the synthesis of offices for program and project management]. Monograph. Rivne: NUVGP. Harkov: HNADU. [in Russian] ISBN 978-966-303-419-5.
15. Ротштейн А. П., Штовба С. Д. & Штовба Е. В. (2006). Многокритериальный выбор бренд-проекта с помощью нечетких парных сравнений альтернатив. Rotshteyn A. P., Shtovba S. D. & Shtovba E. V. (2006). *Mnogokriterialnyiy vyibor brend-proekta s pomoschyu nechetkih parnyih sravneniy alternativ.* [Multi-criteria choice of a brand project using fuzzy pairwise comparisons of

alternatives] Upravlenie proektami i programmami. 2, 138—146. [in Russian]

Ільге Ігор Генріхович¹, к.т.н., доц. каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: ilge_igor@ukr.net, тел. +38 050-401-91-69, ORCID: 0000-0002-0585-8685

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

Method of selecting automatic control system of a motor grader

Abstract. Problem. *Effective use of motor graders is impossible without the use of automatic control systems, especially in modern conditions of large volumes of road construction. However, among the large number of samples of such systems, which differ in various parameters, it is impossible to make an appropriate choice without a scientifically sound approach, taking into account the set of their characteristics. It was found that these systems are characterized by a large set of parameters, with the values of some of them unknown, and the reliability of the values of many parameters is questionable, i.e. the choice must take place in conditions of fuzzy information. The methods of choosing alternatives in conditions of uncertainty described in the literature, in particular when choosing technical systems based on Analytic Hierarchy Process and fuzzy set theory, are analyzed and the latter is taken to develop a method of choosing a motor grader ACS. The goal of the work is to increase the efficiency of motor*

graders in road construction due to the appropriate choice of ACS. The methodology of constructing the method is the theory of fuzzy sets. The economic, technical-operational and ergonomic groups of criteria for choosing a motor grader ACS are determined and substantiated. The construction of the method was performed to select the ACS in the 3D class. As the alternatives, the systems which are the leaders of this segment were chosen. The above criteria are a set of criteria. The solution to the problem of choice is an alternative that best meets the requirements of the whole set of criteria. The results of the work are the development of a method of fuzzy multicriterion analysis for the selection of a motor grader ACS in the class of 3D systems. Originality lies in constructing the method of choosing a motor grader ACS in conditions of fuzzy information on the basis of reasonable criteria. The practical value is the fact that the use of the developed method will allow to make a scientifically sound choice of the ACS of a motor grader taking into account the whole set of criteria.

Key words: motor grader, automatic control system, fuzzy set theory, selection method, road construction, criteria.

Igor Ilge¹, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, e-mail: ilge_igor@ukr.net, tel. +38 050-401-91-69, ORCID: 0000-0002-0585-8685

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

УДК 004.629.33

DOI: 10.30977/VEIT.2021.20.0.05

Моделювання впливу параметрів легкового автомобіля на процес його розгону

Осетров О. О.¹, Чучуменко Б. С.¹

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна

Анотація. Запропоновано математичну модель динаміки розгону легкового автомобіля з урахуванням часу переключення передач. Модель враховує параметри автомобіля і двигуна, режим перемикання передач, зовнішні умови (параметри дорожнього покриття, ухил дороги). В результаті розрахунку для автомобіля Daewoo Lanos проаналізовані навантаження, які виникають в приводі автомобіля. Визначено час, за який автомобіль розганяється до 100 км/год. Проаналізовано вплив маси автомобіля, номінальної потужності двигуна, режиму і часу перемикання передач, радіуса коліс, висоти автомобіля, коефіцієнта аеродинамічного опору на динаміку розгону автомобіля.

Ключові слова: динаміка автомобіля; прийомистість; математичне моделювання; привід; параметри автомобіля; навантаження

Вступ

Одним з важливих показників якості руху транспортного засобу є його прийомистість, яка характеризується часом розгону автомобіля до 100 км/год. Від прийомистості залежать комфортність керування автомобілем, його комерційні якості, отже, поліпшення динамічних властивостей є однією з ключових завдань розробників транспортної техніки.

Прийомистість залежить від багатьох параметрів - максимальної потужності двигуна внутрішнього згоряння, маси автомобіля, параметрів коробки передач, лобової площі автомобіля тощо. Експериментальне дослідження цього показника ускладнюється великою трудомісткістю і вартістю проведення випробувань. При вирішенні задач попередньої оцінки впливу параметрів двигуна і автомобіля на прийомистість, виборі компоновочних рішень доцільно проводити розрахункове дослідження з використанням адекватних математичних моделей.

Аналіз публікацій

В даний час запропоновано ряд математичних моделей динаміки транспортних засобів [1-8]. В найбільш складних з них [1-3] автомобіль

представляється як пружно-масова коливальна система. Детально описується кочення колеса по нерівним і рівним поверхням, враховуються інерційні і пружні характеристики рухомих частин двигуна, трансмісії і коліс.

В роботі [2] запропоновані залежності, що враховують пружні та інерційні властивості двигуна, трансмісії, рульового керування та кузова автомобіля. Це дозволило підвищити адекватність моделі в реальних умовах руху автомобіля.

В моделі [5] розглядається прямолінійний рух автомобіля, оцінюються показники тягово-швидкісних властивостей і прохідності. Ця модель дозволяє досліджувати характеристики руху по дорогах з твердим покриттям в умовах низького коефіцієнта зчеплення з пробуксовкою провідних коліс.

Зазначені моделі характеризуються складністю реалізації та верифікації, вимагають встановлення ряду емпіричних коефіцієнтів на основі результатів експериментальних досліджень. Крім того, в літературі бракує інформації щодо використання таких моделей у задачах оптимізації параметрів автомобіля.

У деяких випадках, наприклад, під час створення ескізного проекту автомобіля, попереднього обґрунтування конструкції силової установки, раціонально використовувати прості,

але в той же час достатньо надійні математичні моделі [6-8].

Наприклад, модель [4] дозволяє на стадії проектування прогнозувати можливі значення показників паливної економічності та здійснювати на їх основі вибір раціональних параметрів механізмів автомобіля, що забезпечують високі показники його паливної економічності.

Досить популярною моделлю в Україні є модель Чудакова та Яковлева, детально описана в роботі Стуканова [7]. Ця модель дозволяє визначити прискорення та шлях автомобіля на основі розрахунку динамічного фактора. Проте в зазначеній моделі недостає врахування впливу часу перемикавання передач автомобіля на динаміку його розгону. Існуючі методи моделювання процесу перемикавання передач, наприклад [9-11] дозволяють врахувати процеси взаємодії ведучих і відомих фрикційних елементів трансмісії, проте їх використання на початковому етапі проектування, коли невідомими є кінематичні і масогабаритні параметри деталей трансмісії є проблематичним.

Мета та постановка задачі

Мета роботи – побудова уточненої математичної моделі динаміки розгону легкового автомобіля з урахуванням впливу на цей процес часу перемикавання передач.

Для досягнення даної мети потрібно було проаналізувати відомі моделі руху транспортних засобів, запропонувати методику урахування часу перемикавання передач на процес розгону автомобіля, дослідити вплив конструктивних параметрів автомобіля на динаміку його руху.

Методика розрахунку

Дослідження динамічних властивостей автомобіля проводилося за методикою Чудакова С.А. і Яковлева Н.А. [7].

Інтервал швидкостей руху автомобіля від 0 до 100 км/год був розбитий на дрібні ділянки тривалістю 1 км/год (рис.1).

Вважалось, що на кожній ділянці автомобіль рухається з постійним прискоренням. Таким чином, знаючи швидкість на початку ділянки і середнє прискорення в розрахунковому інтервалі можна визначити швидкість в кінці ділянки:

$$j = j_{cp} = 0,5 \cdot (j_1 + j_2),$$

де j_1 і j_2 – прискорення на початку і в кінці ділянки відповідно.

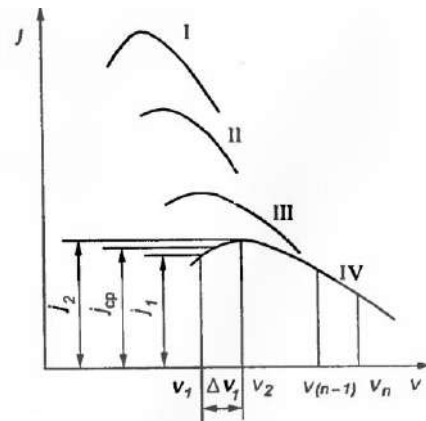


Рис. 1. Схема до визначення поточного значення прискорення автомобіля

Для кожної ділянки можна записати:

$$v_2 = v_1 + j_{cp} \cdot \Delta t, \quad (1)$$

де v_1 і v_2 – швидкості на початку і в кінці ділянки відповідно; Δt – час розгону автомобіля. З рівняння (1):

$$\Delta t = \frac{(v_2 - v_1)}{j_{cp}}. \quad (2)$$

Час розгону до швидкості v_2 :

$$t_2 = t_1 + \Delta t. \quad (3)$$

Поточне значення прискорення:

$$j = \frac{dv}{dt} = \frac{g}{\delta_{об}} \cdot (D - \psi_{\delta}), \quad (4)$$

де D – динамічний фактор; ψ_{δ} – коефіцієнт сумарного дорожнього опору; g – прискорення вільного падіння; $\delta_{об}$ – коефіцієнт урахування обертових мас.

Коефіцієнт $\delta_{об}$ визначається за емпіричною залежністю [7]:

$$\delta_{об} = 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot i_{mp}^2) \cdot \frac{m_a}{m},$$

де $\delta_1 \approx \delta_2 = 0,03 \dots 0,05$; m_a – маса автомобіля з повним навантаженням; m – фактична маса автомобіля; i_{mp} – передавальне відношення трансмісії.

Основним фактором, що визначає поточне значення прискорення автомобіля, є динамічний фактор D , який залежить від сили тяги, сили опору повітря і ваги автомобіля. Цей параметр визначається за формулою:

$$D = \frac{(P_T - P_\omega)}{G}, \quad (5)$$

де P_T – сила тяги; P_ω – сила опору повітря; G – вага автомобіля.

Сила тяги на колесах:

$$P_T = 3600 \cdot N_e \cdot \frac{\eta_{TP}}{v_i}, \quad (6)$$

де N_e – ефективна потужність двигуна; η_{TP} – ККД трансмісії.

Сила опору повітря:

$$P_\omega = k_\omega \cdot F \cdot v_i^2,$$

де K_w – коефіцієнт обтікання, $K_w = 0,2 \dots 0,35$; F – площа лобового опору.

Площа лобового опору:

$$F = \alpha \cdot B_a \cdot H,$$

де B_a – найбільша ширина автомобіля; H – найбільша висота автомобіля; α – коефіцієнт заповнення лобової площі автомобіля.

Повний час розгону t_p в інтервалі швидкостей:

$$t_p = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n.$$

Вище показано, що в базовій методиці не достає врахування впливу часу перемикання передач на динаміку розгону автомобіля. Авторами запропоновано при перемиканні передач на ділянці розгону автомобіля від швидкості v_1 до швидкості v_2 час розгону Δt автомобіля визначати за наступною методикою. Час Δt розбивається на два інтервали (рис. 2):

$$\Delta t = \Delta t_1' + \Delta t_2',$$

де $\Delta t_1'$ – час перемикання передачі. Цей час залежить від кваліфікації водія і може варіюватися від 0,2 с до 3 с. Протягом часу $\Delta t_1'$ швидкість автомобіля зменшується на величину Δv і наприкінці першого інтервалу досягає

значення $v_1' = v_1 - \Delta v$; $\Delta t_2'$ – час розгону автомобіля від швидкості v_1 до швидкості v_2 .

При перемиканні передач автомобіль рухається за інерцією, тобто сила тяги $P_{T1}' = 0$. Відповідно динамічний фактор протягом інтервалу $\Delta t_1'$:

$$D_1' = -\frac{P_\omega}{G}.$$

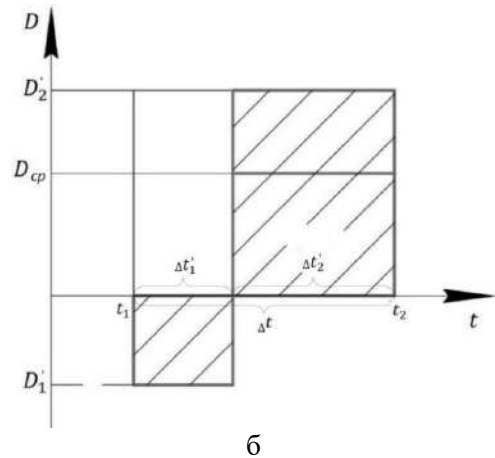
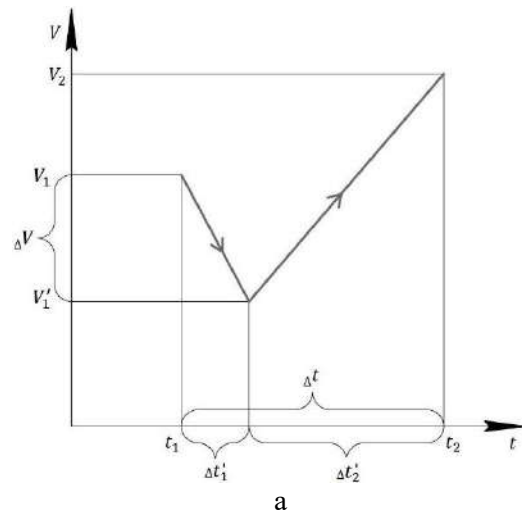


Рис. 2. Схема до визначення часу розгону при переключенні передач: а – швидкість; б – динамічний фактор

Прискорення автомобіля при перемиканні передач j_1' розраховується за формулою (4), у яку підставляється значення коефіцієнту врахування обертальних мас автомобіля $\delta_{об}$ при відданому від трансмісії двигуні.

Для спрощення розрахунків вважається, що опір повітря при перемиканні передач вважається постійним і відповідає швидкості руху на попередній передачі. В цьому випадку прискорення j_1' вважаємо постійним і зменшення швидкості при перемиканні передач буде:

$$\Delta v = j_1' \cdot \Delta t_1'$$

Відповідно швидкість автомобіля зменшується до:

$$v_1' = v_1 - \Delta v.$$

Протягом другого інтервалу, після зчеплення колінчастого валу з трансмісією двигуна, за формулами (6), (5) визначаються відповідно тягове зусилля P_{T2}' і динамічний фактор D_2' .

Прискорення автомобіля протягом другого інтервалу j_2' розраховується за формулою (4). За відомими значенням прискорення j_2' , швидкостями v_1' і v_2 за формулою (2) визначається час $\Delta t_2'$ розгону автомобіля від швидкості v_1' до швидкості v_2 .

Середнє значення динамічного фактору на розрахунковому інтервалі:

$$D_{cp} = \frac{D_1' \cdot \Delta t_1' + D_2' \cdot \Delta t_2'}{\Delta t_1' + \Delta t_2'}$$

Середнє значення швидкості на розрахунковому інтервалі:

$$v_{cp} = \frac{(v_1 + v_1') \cdot \Delta t_1' + (v_2 + v_1') \cdot \Delta t_2'}{2}$$

При розгоні автомобіля з метою досягнення максимальної швидкості педаль акселератора натиснута до упору, отже двигун працює з максимальним навантаженням по зовнішній швидкісній характеристиці. Потужність двигуна визначається за результатами моделювання його робочого процесу. Задовільні результати дає використання формули С.Р. Лейдермана:

$$N_e = N_{en} \cdot \left[A_1 \cdot \frac{n}{n_n} + A_2 \cdot \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 - \left(\frac{n}{n_n} \right)^3 \right], \quad (7)$$

де N_{en} – номінальна потужність; A_1, A_2 – емпіричні коефіцієнти. Для двигуна А15SMS можна взяти $A_1 = A_2 = 1$; n, n_n – робоча та номінальна частота обертання двигуна.

Частота обертання колінчастого валу двигуна визначається за даними швидкості авто-

мобіля, радіуса коліс і поточного передавального відношення від коліс до колінчастого валу.

Робоча частота обертання двигуна визначається швидкістю транспортного засобу, розмірами коліс та параметрами трансмісії:

$$n = \frac{v \cdot u_k \cdot u_{pb} \cdot u_0}{0,377 \cdot r_{st}},$$

де v – швидкість транспортного засобу; u_k – поточне значення передавального числа коробки передач; u_{pb} – передавальне число роздавальної коробки (якщо роздавальна коробка відсутня, то $u_{pb} = 1$); u_0 – передавальне число головної передачі; r_{st} – статичний радіус колеса.

Математична модель реалізована в програмному середовищі MATLAB.

Об'єкт дослідження

В якості об'єкта дослідження обрано автомобіль Daewoo Lanos з двигуном А15SMS. Параметри автомобіля наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри автомобіля Lanos

Параметр	Значення параметру
Маса автомобіля m_a , кг	1200
Статичний радіус колес r_{st} , м	0,3
Допустима повна маса, кг	1400
Висота автомобіля B_r , м	1,432
Ширина автомобіля H_r , м	1,678
Коефіцієнт заповнення лобової площі автомобіля α_A	0,78
Об'єм двигуна, zVh , л	1,5
Діаметр циліндра D , м	0,0765
Ход поршня S , м	0,0815
Степінь стиснення ϵ	9,5
Номінальна ефективна потужність ДВЗ N_{en} , кВт	63
Номінальна частота обертання колінчастого валу n_n , хв^{-1}	5800
ККД трансмісії η_T	0,92
Передаточні числа коробки передач	
uk1	3,454
uk2	2,056
uk3	1,333
uk4	0,969
uk5	0,828
Передаточне число головної передачі u_0	4,13

Аналіз результатів розрахунку

При розрахунках час перемикання передач задавали 0,5 с. Переключення з першої на другу передачу здійснювали при досягненні швидкості 30 км/год, з другої на третю - при досягненні швидкості 55 км/год, з третьої на четверту – при досягненні швидкості 90 км/год, з четвертої на п'яту – при досягненні швидкості 120 км/год. Результати розрахунку параметрів автомобіля в процесі розгону наведені на рис. 3.

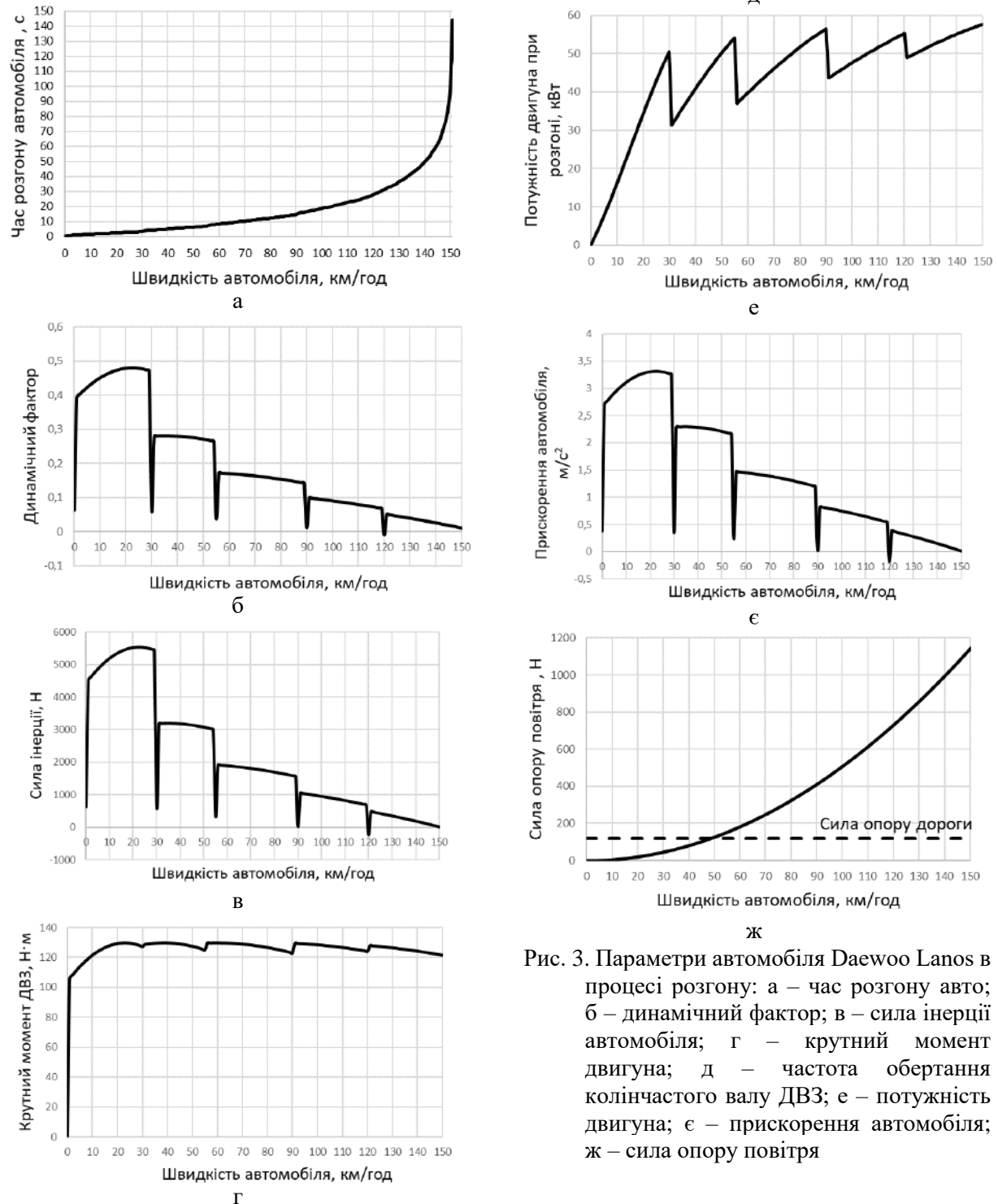


Рис. 3. Параметри автомобіля Daewoo Lanos в процесі розгону: а – час розгону авто; б – динамічний фактор; в – сила інерції автомобіля; г – крутний момент двигуна; д – частота обертання колінчастого валу ДВЗ; е – потужність двигуна; є – прискорення автомобіля; ж – сила опору повітря

З рисунку 3 видно, що при базових налаштуваннях на кожній передачі частота обертання колінчастого вала в процесі розгону зростає до значень близьких до 4000 хв^{-1} . При цьому забезпечується достатньо велика потужність, крутний момент двигуна і тягове зусилля на колесах. Це тягове зусилля витрачається переважно на подолання сил інерції, які на початку руху автомобіля перевищують сили опору дороги і повітря більше ніж в 50 разів. При зростанні швидкості автомобіля сила інерції зменшується і на швидкості 100 км/год всього в два рази перевищує інші складові навантаження.

Сила опору повітря зростає пропорційно квадрату швидкості автомобіля і при швидкості 100 км/год вносить суттєвий внесок в загальний опір руху. Ця сила обмежує максимально можливу для даного автомобіля швидкість, розрахункове значення якої для базового варіанту становить 150 км/год. При цьому динамічний фактор і прискорення автомобіля стають рівними нулю.

З рис. 3 видно, що при перемиканні передач середнє значення прискорення автомобіля на розрахунковій ділянці падає до значень близьких до нуля. Це призводить до уповільнення руху транспортного засобу.

Швидкість 100 км/год досягається за 18,2 с. Це відповідає паспортним даним автомобіля Daewoo Lanos і свідчить про адекватність розрахункової методики.

Таким чином, уточнена математична модель дозволяє досліджувати показники двигуна і автомобіля в процесі розгону, визначати вплив на ці показники конструктивних і регулювальних параметрів двигуна і автомобіля, виконувати оптимізаційні дослідження.

Вплив параметрів автомобіля на динаміку його розгону

З використанням наведеної вище математичної моделі виконано розрахункове дослідження впливу маси автомобіля, статичного радіуса коліс, висоти автомобіля, потужності двигуна, коефіцієнта аеродинамічного опору повітря, часу та режиму перемикання передач на прийомистість автомобіля.

Базовий комплект параметрів: маса автомобіля – 1200 кг, статичний радіус коліс – 0,3 м, висота автомобіля – 1,432 м, номінальна потужність двигуна – 63 кВт, коефіцієнт аеродинамічного опору автомобіля – 0,35. Режим перемикання передач: перша передача задіяна

при русі від 0 до 30 км/год, друга – від 30 до 55 км/год, третя – від 55 до 90 км/год, четверта – від 90 до 120 км/год, п'ята – понад 120 км/год.

Номінальну потужність двигуна внутрішнього згоряння задавали в межах від 40 до 80 кВт. Атмосферні двигуни такої потужності можна без істотних проблем встановити в підкапотний простір автомобіля Daewoo Lanos.

Масу автомобіля змінювали в межах від 1000 до 1500 кг. Вважали, що мінімальну масу згідно паспортної характеристики 1200 кг можна зменшити до 1000 кг застосуванням пластикового або алюмінієвого облицювання корпусу, заміни чавунного блоку циліндрів двигуна на блок з алюмінієвого сплаву. Максимальна маса автомобіля з повним навантаженням – 1500 кг. Її залишили без змін.

Статичний радіус коліс варіювали в межах від 0,24 до 0,32 м. Такі колеса можна застосувати без значних переробок корпусу автомобіля.

Згідно з даними літературного огляду коефіцієнт аеродинамічного опору задавався в межах від 0,2 до 0,35. Такі параметри мають існуючі конструкції автомобілів, отже їх можна реалізувати на дослідному автомобілі.

При перемиканні передач розглядалися три варіанти, які відрізняються швидкісними діапазонами автомобіля при перемиканні. Крім базового (названий «Варіант 2») досліджувався варіант, коли перша передача задіяна при русі від 0 до 20 км/год, друга – від 20 до 45 км/год, третя – від 45 до 70 км/год, четверта – від 70 до 100 км/год, п'ята – понад 100 км/год (цей варіант названий «Варіант 1») і варіант, коли перша передача задіяна при русі від 0 до 40 км/год, друга – від 40 до 65 км/год, третя – від 65 до 110 км/год, четверта – від 110 до 140 км/год, п'ята – понад 140 км/год (цей варіант названий «Варіант 3»).

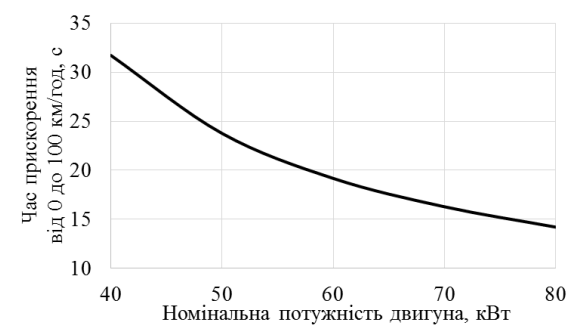
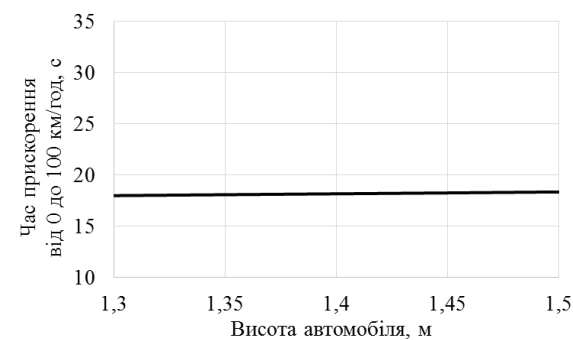
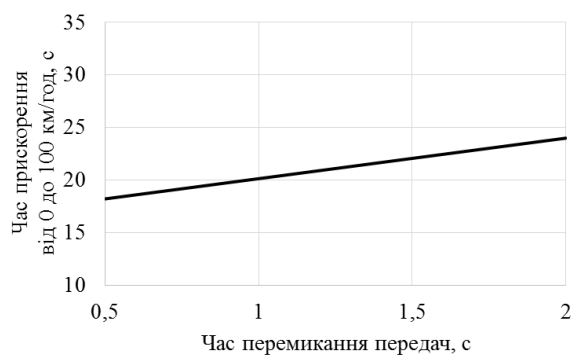
Результати розрахунку впливу параметрів автомобіля на його прийомистість наведені на рис. 4.

Аналіз результатів розрахунку показав, що найбільш суттєво з розглянутих параметрів на прийомистість автомобіля впливають потужність двигуна і маса автомобіля. Вплив маси автомобіля на прийомистість лінійний. При зменшенні маси автомобіля на кожні 100 кг час розгону до 100 км/год зменшується на 1,5 с. Вплив потужності двигуна на прийомистість нелінійний. Збільшення номінальної потужності двигуна на кожні 10 кВт призводить до зменшення часу розгону на 2–8 с. Великі

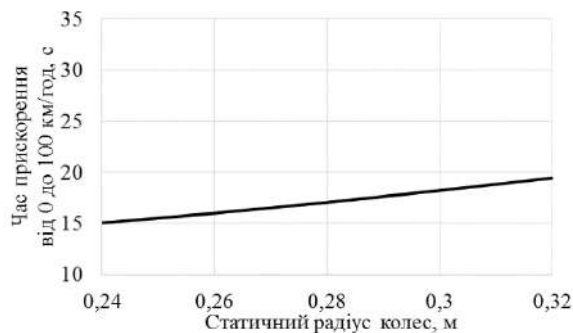
значення відносяться до діапазону малих потужностей, менші – до діапазону відносно великих потужностей.

Коефіцієнт аеродинамічного опору і висота автомобіля на прийомистість двигуна впливають несуттєво. Це пояснюється тим, що зазначені параметри визначають силу опору повітря. Однак на швидкостях до 100 км/год питомий внесок сили опору повітря в загальний опір руху при розгоні не значний. Основна складова сумарного опору – сила інерції.

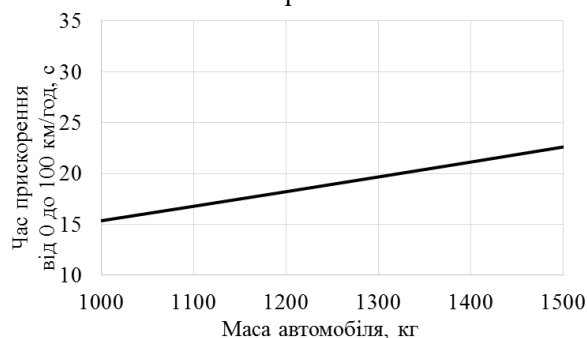
З рис. 4 видно, що зменшення радіуса коліс на кожен сантиметр покращує час розгону автомобіля приблизно на 1 с. Це пояснюється тим, що при незмінному передавальному відношенні двигун працює на більших оборотах колінчастого вала. Як наслідок, досягається велика максимальна потужність і тягове зусилля.



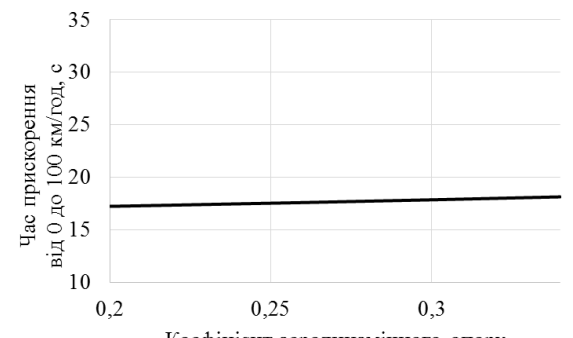
в



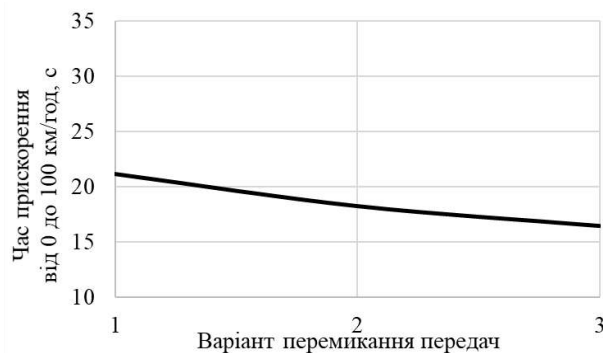
г



д



е



є

Рис. 4. Вплив параметрів автомобіля Daewoo Lanos на час розгону від 0 до 100 км/год: а – час перемикання передач КПП ; б – висота автомобіля; в – номінальна потужність двигуна; г – статичний радіус коліс; д – маса автомобіля; е – аеродинамічний опір.

Однак слід зазначити, що цей захід поліпшення прийомистості є небажаним, оскільки одночасно зі зменшенням розміру коліс зростає знос протекторів, витрати на тертя в двигуні і трансмісії, а отже, зростає питома витрата палива і зменшується надійність автомобіля в цілому. Крім того, погіршується комфортність керування автомобілем внаслідок збільшення вібрацій при русі по дорожньому покриттю.

Висновки

Представлена в роботі математична модель дозволяє визначати показники двигуна і автомобіля в процесі розгону, враховувати вплив на ці показники конструктивних і регульованих параметрів двигуна і автомобіля, виконувати оптимізаційні дослідження. З використанням даної математичної моделі виконано аналіз впливу на динаміку розгону конструктивних параметрів автомобіля. Показано, що найбільшою мірою на динаміку розгону впливають маса автомобіля і номінальна потужність двигуна. Вплив інших параметрів не настільки істотний. Дано обґрунтування отриманих результатів.

Розроблена математична модель може бути використана на стадіях ескізного проекту автомобіля, попереднього обґрунтування конструкції і параметрів силової установки.

Напрямом подальшого дослідження є доповнення представленої моделі підмоделями робочого процесу і динаміки двигуна внутрішнього згоряння, крутильних коливань системи колінчастого валу ДВЗ, уточненням і доповненням коефіцієнтів розрахункових залежностей для урахування умов руху автомобіля.

Література

1. Uffelmann F. (1984). Autolin-bin digitales. Simulation srechn-programm fur die Fabirdynamik von Personenkraftwagen. Automobiltechnik zeitschrift, ATZ, 86(2), 41-46.
2. Иванников, С. В., Родионов Г.Л. & Сидоренко А.С. (2005). О построении математической модели движения автомобиля. Электронный журнал «Труды МАИ», 18, 1-18. Ivannikov, S., Rodionov G., Sidorenko A. (2005). O postroenii matematicheskoy modeli dvizheniya avtomobilya. [On the construction of a mathematical model of vehicle motion], electronic journal «Trudy MAI», 18, 1-18. [in Russian]
3. Thanh. V. & Та M. (2015) A Universal Dynamic and Kinematic Model of Vehicles. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)(October 19-22, 2015, Montreal, QC), 1-6. doi: 10.1109/VPPC.2015.7352889.
4. Тарасик, В.П. & Пузанова О.В. (2019). Методика моделирования ездового цикла автомобиля. Вестник Белорусско-Российского университета, 4 (65), 75-86. Tarasik V. & Puzanova O. (2019). Metodika modelirovaniya ezdovogo cikla avtomobilya. [Modeling technique for the vehicle driving cycle]. Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta, 4 (65), 75-86. [in Russian]
5. Тарасик В.П. (2017). Математическое моделирование прямолинейного движения автомобиля. Вестник Белорусско-Российского университета, 2 (55). Tarasik V. (2017). Matematicheskoe modelirovanie pryamolinejnogo dvizheniya avtomobilya. [Mathematical modeling of vehicle's linear motion]. Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta, 2 (55). [in Russian]
6. Забавников, Н.А. (1961). Аналитическое определение времени и пути разгона. Автомобильная промышленность, 6, 11-14. Zabavnikov, N. (1961) Analiticheskoe opredelenie vremeni i puti razgona. [Analytical determination of the time and path of acceleration]. Automotive industry, 6, 11-14. [in Russian]
7. Стуканов В.А. (2005). Основы теории автомобильных двигателей и автомобиля. Учебное пособие. – М:ФОРУМ: ИНФРА-М, 368. Stukanov V. (2005) Osnovi teorii avtomobilnyih dvigateley i avtomobilya. Uchebnoe posobie. [Fundamentals of the automobile engines and automobiles theory. Tutorial]. FORUM: INFRA-M, Moscow, 368. [in Russian]
8. Галимзянов, Р.К. (1998). Тяговый расчет автомобиля с механической трансмиссией. Учебное пособие. Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 41. Galimzyanov, R. (1998), Tyagovyyi raschet avtomobilya s mehanicheskoy transmissiey. Uchebnoe posobie. [Traction calculation of a car with a mechanical transmission. Tutorial]. Publishing House YUUrGU, Chelyabinsk, 41. [in Russian]
9. Нагайцев, М.В. (2003). Метод прогнозирования режимов работы ступенчатой коробки передач транспортной машины с системой автоматического переключения (Дис. канд. техн. наук). МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва. Nagaytsev, M. (2003). Metod prognozirovaniya rezhimov raboty stupenchatoy peredach transportnoy mashinyi s sistemoy avtomaticheskogo pereklyucheniya. [The method of forecasting the operating modes of a stepped gearbox of a transport machine with an automatic switching system]. Bauman MSTU, Moscow. [in Russian]
10. Прасолов, Н.С. (2004). Обоснование режимов переключения в автомобильной коробке

передач с изменяемым межосевым расстоянием зубчатых зацеплений. (Дис. канд. техн. наук) Южно-Уральский Государственный Университет, Челябинск. Prasolov, N. (2004). Obosnovanie rezhimov pereklyucheniya v avtomobilnoy korobke peredach s izmenyaemyim mezhoosevym rasstoianiem zubchatyih zatseplenyi. [Justification of the modes of switching in an automobile gearbox with a variable center distance of gearing]. South Ural State University, Chelyabinsk. [in Russian]

11. Юсупов А.А. (2013). Совершенствование тягово-динамического расчета автомобиля путём учета процесса переключения передач и управления двигателем. (Дис. канд. техн. наук) Южно-Уральский Государственный Университет, Челябинск. Yusupov A. (2013) Sovershenstvovanie tyagovo-dinamicheskogo rascheta avtomobilya putyom ucheta processa pereklyucheniya peredach i upravleniya dvigatelem. [Improving the traction-dynamic calculation of the car by taking into account the process of gear shifting and engine control]. South Ural State University, Chelyabinsk. [in Russian]

Осетров Олександр Олександрович¹, к.т.н, доцент каф. двигунів внутрішнього згорання, osetrov2010@gmail.com, тел.+38 099 795-62-28, ORCID: 0000-0002-5495-9626

Чучуменко Богдан Сергійович¹, аспірант каф. двигунів внутрішнього згорання, potia1925@gmail.com, тел. +38 096 005-97-27,

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, Україна, м. Харків, вул. Кирпичова, 21.

Simulation of a car parameters impact on the process of its acceleration

Abstract. Goal. The purpose of the work is mathematical modeling of Daewoo Lanos passenger car acceleration dynamics. **Methodology.** The mathematical model is based on the methodology of E.A. Chudakov and N.A.Yakovlev. According to this method, the main factor that determines the current value of vehicle acceleration at an elementary speed section is the dynamic factor. This factor depends on the traction force, the air resistance force and the weight of the vehicle. The paper proposes formulas for determining the dynamic factor and parameters of

vehicle acceleration at an elementary speed section, where gear shift takes place. The model is implemented in the MATLAB software environment. The software product allows to determine the parameters of the car during acceleration to the maximum speed when the engine is running at the external speed characteristic modes. **Results** Based on the results of mathematical modeling for the Daewoo Lanos car, the loads arising in the drive of the car were analyzed. It is shown that the tractive effort is mainly spent on overcoming the inertial forces, which at the beginning of the movement exceed the resistance forces of the road and air by more than 50 times. With an increase in the vehicle speed, the inertia force decreases and at a speed of 100 km/h it is only twice the other load components. It is shown that with the accepted initial data, the Daewoo Lanos car accelerates to 100 km/h in 17.7 s, which corresponds to the experimental data. The influence of the mass of the car, the rated power of the engine, the mode and time of gear shifting, the radius of the wheels, the height of the car, the coefficient of aerodynamic drag on the dynamics of acceleration of the car is analyzed. It was revealed that the vehicle weight and the nominal power of the engine affect the dynamics of acceleration from 0 to 100 km/h to the greatest extent. The influence of other parameters in the indicated speed range is not somewhat significant. The explanation of the obtained results is given. **Practical value.** The mathematical model presented in the work allows to determine the parameters of the engine and the car during acceleration, take into account the influence of the design and adjusting parameters of the engine and the car on these indicators, and carry out optimization studies.

Keywords: car dynamics; receptivity; mathematical modeling; drive unit; car parameters; load.

Osetrov Oleksandr¹, Ph.D., associate professor, Department of Internal Combustion Engines, osetrov2010@gmail.com, tel. +38 099 795-62-28, ORCID: 0000-0002-5495-9626

Chuchumenko Bohdan¹, graduate student, Department of Internal Combustion Engines, potia1925@gmail.com, tel. +38 096 005-97-27,

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Діагностика технічного стану і прогнозування безаварійно гарантованого напрацювання зубчастих коліс важко навантажених машин

Гайдамака А. В.¹, Музикін Ю. Д.¹, Клітної В. В.¹

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», України

Анотація. У статті проаналізовано умови роботи зубчастих передач важко навантажених машин. Дано огляд сучасних підходів в оцінці технічного стану зубчастих коліс за рівнем накопичених втомних пошкоджень в процесі експлуатації. В ході аналізу сучасної технічної літератури встановлено два перспективних способи діагностики технічних об'єктів за рівнем накопичених втомних пошкоджень в експлуатації, а саме діагностика за твердістю металу і діагностика за параметрами магнітної петлі гістерезису. Розроблено алгоритм проведення діагностики технічного стану і прогнозування безаварійно гарантованого напрацювання зубчастих коліс важко навантажених машин, в основу якого покладені запропонована процедура діагностики за вимірюванням твердості металу, яка включає п'ять основних етапів: вибір прибору; вибір схеми вимірювань; вибір числа замірів, кількості і взаємного розташування точок вимірювання; розробку конструкції шаблону для вимірювань; розробку пристосування для кріплення шаблонів і методика прогнозування з урахуванням стадій припрацювання і стабільних за лінійною функцією накопичення пошкоджень в експлуатації.

Ключові слова: діагностика, технічний стан, прогнозування, гарантоване напрацювання, зубчасте колесо, втомні пошкодження.

Вступ

В цій статті висвітлено сучасний стан з діагностики зубчастих коліс за рівнем накопичених втомних пошкоджень в процесі їх експлуатації. Це відносно новий напрям діагностики зубчастих коліс важко навантажених машин, наприклад автомобільної, гірничорудної та металургійної промисловості. За вказаною темою існує відносно невелика кількість публікацій через поширеність інших достатньо розвинутих напрямків діагностики технічного стану, призначених для пари або групи зубчастих коліс (редукторів, трансмісій). Разом з тим, узагальнення відомої і дуже обмеженої інформації щодо визначення технічного стану окремих зубчастих коліс важко навантажених машин, особливо з великими модулями ($m > 20$ мм), дозволяє намітити перспективи розвитку і впровадження такої діагностики технічного стану зубчастих коліс безпосередньо в процесі експлуатації.

Аналіз публікацій

Зубчасті колеса редукторів важко навантажених машин, наприклад бортова коробка передач танка на максимальних потужностях або привод валків прокатних станів у звичайному режимі працюють зі значними короткочасними перевантаженнями, у середовищі підвищеної вібрації та температури часто з недостатнім змащенням і низьким рівнем повітряної та гідравлічної фільтрації [1–7]. Це спричиняє передчасну появу втомного викришування робочих поверхонь зубців коліс редукторів та втомне їх руйнування. В умовах відсутності інформації щодо дійсного технічного стану зубчастих коліс вказаних редукторів, з метою виключення аварійної поломки, їх заміна виконується по закінченню заданого строку експлуатації. Підвищення ефективності виробництва можливе при переході від планово-попереджувального обслуговування редукторів до обслуговування за дійсним технічним станом. Отже постає необхідність науково обґрунтованого визна-

чення технічного стану і прогнозування безаварійно гарантованого напрацювання зубчастих коліс важко навантажених машин.

Технічний стан машин в експлуатації визначається на основі знання інформативного параметру технічного стану (ПТС), критерію граничного стану об'єкту і результатів періодичного чи безперервного контролю ПТС. При оцінці технічного стану зубчастих передач широко розповсюджені такі діагностичні параметри як: інтенсивність зміни температури, кінематична похибка передачі, віброакустичні сигнали [8–14].

Реєстрація зміни температури зубчастого зачеплення [9], як інтегральний спосіб оцінки технічного рівня вказує лише на погіршення умов роботи без встановлення конкретної причини. Тому цей метод діагностики мало ефективний.

Метод оцінки технічного стану зубчастих передач [10], що базується на аналізі характеру зміни кінематичної похибки передачі, дозволяє виявляти одиничні дефекти зубців, оцінювати нерівномірність зносу як пари, так і багатоступеневого зачеплення.

Віброакустичний метод [13, 14] найбільш розвинутий і інформативний. В дослідженнях виділяють чотири основних параметри вібрації редуктора, кожному з яких відповідає певний вид пошкодження – викришування, тріщини, сколювання, полонка.

Загальним недоліком двох останніх методів діагностики зубчастих передач є залежність точності оцінки технічного стану від кваліфікації діагноста, його знань про особливості конструкції і функціонування, а також природи вібраційних процесів. При цьому аналіз та інтерпретація віброакустичних сигналів має велику долю суб'єктивізму в розшифровці типу дефекту і його кількісної оцінки. Крім того, кожен з вищевказаних методів дає інтегральну оцінку для групи коліс і не дозволяє виявити технічний стан окремого зубчастого колеса, оцінити знос чи викришування його зубців.

У зв'язку з вищевказаним, останнім часом з'явилися напрямки діагностики окремих технічних об'єктів за рівнем накопичених втомних пошкоджень в експлуатації [15, 16]. Найбільш актуальними в рамках проблематики, що розглядається бачаться напрямки діагностики за твердістю металу [17–20], за параметрами деформаційної [18, 21, 22] та магнітної петель гістерезису [23–26].

Зміна властивостей поверхневих шарів металу зубчастих коліс в експлуатації може

бути узагальненим діагностичним критерієм. Вимірюючи в процесі планово-попереджувальних робіт, наприклад твердість металу зубців в зонах можливого руйнування, і порівнюючи отримані значення з гранично досягнутою твердістю дефектного колеса, оцінюють його технічний стан [17]. Однак при застосуванні напрямку діагностики за твердістю металу як діагностичного інструменту для вимірювань на місці треба враховувати, що, як відомо, явище втоми є чутливим щодо вм'ятин або інших розривів матеріалу, які спричиняють концентрації напружень, і можуть утворюватись при вимірюванні твердості. Використання сучасних приладів для замірів нівелює зазначені недоліки методу, таким чином, можна стверджувати, що метод можна вважати неруйнівним. Крім того в роботі [27] уточнюють, що оскільки полірування зразка, пошкодженого втомлюванням, частково, якщо не повністю, видаляє поверхневі зерна, загартовані деформацією, тому, за можливості, зразки повинні бути відшліфовані електрохімічним методом, це слід виконати перед проведенням циклічної обробки. Врахувавши зазначені вимоги при проведенні замірів твердості слід зазначити дуже гарну кореляцію результатів замірів з процесом втомного руйнування [18]. Технічний стан деталі, згідно з патентом [21], можна визначити і за коефіцієнтом внутрішнього розсіювання енергії дослідного об'єкту шляхом вимірювання коерцитивної сили – інформативної характеристики гістерезисних властивостей металу. Коефіцієнт внутрішнього розсіювання енергії деталі порівнюють з даними експериментальної кривої, раніше отриманої для аналогічної деталі зі 100% ресурсом, після чого визначають безаварійно гарантоване напрацювання деталі.

Метод визначення залишкової намагніченості металу деталі базується на тісній кореляційній залежності між структурно-чутливими магнітними параметрами металу і величиною механічного напруження. Залишковий ресурс металоконструкцій за результатами магнітного контролю визначають за попередньо встановленою експериментальною залежністю величини магнітного параметру від кількості циклів навантаження. Широко застосований магнітний параметр – коерцитивна сила має високу чутливість до зміни структури металу при навантаженні: приріст величини коерцитивної сили від вихідного положення до стану руйнування, залежно від марки матеріалу, сягає 100–400%.

При використанні зазначеного методу треба враховувати, що він працює тільки для феромагнітних матеріалів, також у роботі [28] прийшли до висновку, що параметри гістерезису зазвичай не демонструють значних змін до останніх 10–20% терміну служби при втомному руйнуванні, тобто використання методу за межею текучості потребує чутливого обладнання. Методом магнітної структуроскопії визначено залишковий ресурс багатьох металоконструкцій: баштових, козлових, мостових кранів, прокатних валків [29–31]. Нормативною базою цього методу є Міжнародний стандарт ISO 4301.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є розробка алгоритму проведення діагностики технічного стану і прогнозування безаварійно гарантованого напрацювання зубчастих коліс важко навантажених машин.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі:

- розробити процедуру діагностики технічного стану за результатами визначення рівня накопичених втомних пошкоджень в експлуатації;
- вибрати методику прогнозування безаварійно гарантованого напрацювання.

Процедура та методика прогнозування безаварійного-гарантованого напрацювання зубчастих коліс

В цій частині роботи показано розвиток способу діагностики зубчастих коліс за вимірюванням твердості металу поверхневих шарів у зонах, де можливі вогнища руйнування. В публікації [17] вказано зони вимірювання твердості зубця, які розташовано в межах його торцевої поверхні. Однак при цьому відсутні рекомендації відносно числа дослідів, кількості і взаємного розташування точок вимірювання. Від числа дослідів по заміру твердості металу за весь період напрацювання аж до граничного стану появи втомних руйнувань в околиці ділильного діаметру (рис. 1, зона 1) чи втомних руйнувань у ніжці зубця (рис. 1, зона 2) залежить точність побудови функції вичерпання ресурсу. Припустивши, що вичерпання ресурсу зубчастого колеса являє собою функцію, яка не зростає, можна обмежитися мінімальними (п'ятьма) дослідями, що визначають будь-яку криву другого порядку.

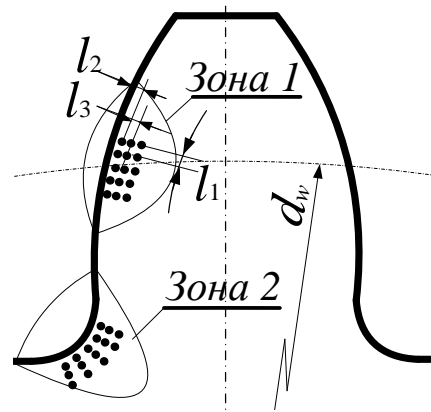


Рис. 1. Торць зубця з зонами вимірювання твердості

Якщо є нехарактерні значення твердості окремих точок, необхідно провести додаткові вимірювання близько від попередніх, оскільки можуть бути не тільки помилки вимірювань, але і неоднорідність металу. Тому кількість точок вимірювань в кожному досліді відповідно до рекомендацій [17] повинно бути не менше трьох...п'яти.

Взаємне розташування точок вимірювань у кожному досліді визначається метою дослідження, методом вимірювання та типом твердоміра. При вимірюванні твердості відстань від краю робочої поверхні зубчастого колеса до центру першого відбитку індентора твердоміра, а також між сусідніми відбитками повинно бути не менше трьох діаметрів відбитків. Збільшення відстаней між точками вимірювань погіршує точність оцінки технічного стану і утруднює прогнозування залишкового ресурсу зубчастого колеса. Усі перераховані вимоги до визначення твердості у локальних зонах зубців захищені патентом [32], який забезпечує необхідну точність діагностики і визначення безаварійно гарантованого напрацювання зубчастих коліс.

Жорсткі вимоги до відстаней між точками вимірювань потребують використання спеціальних шаблонів з можливістю їх одноманітного центрування і закріплення на зубчастому колесі під час дослідів.

Вимірювання твердості зубців можуть бути проведені і на робочих поверхнях зубців – навколо полюсної зони і біля кореня зуба.

Отже, процедура діагностики технічного стану зубчастих коліс за вимірюванням твердості металу повинна включати наступні основні етапи:

1. вибір прибору – портативного твердоміра;
2. вибір схеми вимірювань – з торця чи робочої поверхні зубця;

3. вибір числа дослідів, кількості і взаємного розташування точок вимірювання;

4. розробка конструкції шаблону для вимірювань в зонах можливих руйнувань зубців;

5. розробка пристосування для кріплення шаблонів.

Прогнозування безаварійного гарантованого напрацювання зубчастих коліс за результатами діагностики їх технічного стану виконується за рекомендаціями [33].

Безаварійне гарантоване напрацювання технічного об'єкту це напрацювання впродовж терміну, що забезпечує збереження параметрів нормативно-технічної документації. Прогнозування безаварійного гарантованого напрацювання можливе при наявності трьох умов – відомий ПТС, можливість періодичного (неперервного) контролю ПТС, наявність критерію граничного стану.

Прогнозування гарантованого напрацювання об'єкту звичайно здійснюють за схемою, що зображена на рис. 2.

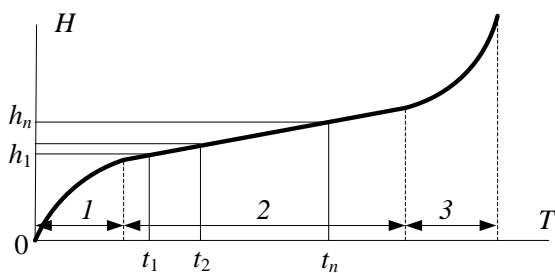


Рис. 2. Типова схема залежності величини (H) пошкоджень від терміну (T) експлуатації: 1 – припрацювання; 2 – стабільне накопичення пошкоджень; 3 – інтенсивне руйнування

Через певні періоди експлуатації t_1, t_2, \dots, t_n вимірюють максимальні величини пошкоджень (знос, деформація) h_1, h_2, \dots, h_n і екстраполюють залежність до гранично допустимої величини пошкодження h_n . Такий спосіб дозволяє отримати достатньо точну оцінку гарантованого напрацювання, якщо відома залежність $h(t)$.

В цій роботі прогнозування гарантованого напрацювання зубчастих коліс пропонується виконувати з урахуванням стадій припрацювання і стабільного накопичення пошкоджень (лінійна функція), оскільки колеса знімають з експлуатації завчасно до можливого їх руйнування. Припускаючи, що пошкодження (параметр контролю) в зубчастому колесі накопичуються монотонно за лінійною функцією, а їх дисперсія не змінюється,

при прогнозуванні гарантованого напрацювання використовують метод за стандартизованими нормами розрахунку. Введені припущення справедливі в тому випадку, коли параметр контролю підпорядковується нормальному закону розподілу. Останнє справедливе для пошкоджень зубців, які залежать від багатьох факторів. Причому вважається, що кожний з факторів має рівновеликий вплив на появу пошкоджень. Отже запропонований вид функції зміни параметра контролю цілком обґрунтований.

Лінійна функція зміни параметра контролю приймається у вигляді:

$$x(t) = c_1 + c_2 \cdot \tau, \quad (1)$$

де c_1, c_2 – коефіцієнти лінійної функції зміни параметра; $\tau = t_i - t_0$, $\tau \geq 0$, $t_0 \geq 0$ – початкове значення напрацювання.

Параметр призначення (наприклад пошкоджуваність) оцінюють по зміні параметру контролю за виразом:

$$y_i = x(t_i) + \xi_i, \quad i = 1 \dots N, \quad (2)$$

де t_i – значення напрацювання i -тий термін вимірювання, $t_0 \leq t_1 \leq t_2 \dots \leq t_N$, ξ_i – необмежена випадкова величина з дисперсією σ^2 , що симетрично розташована відносно нульового математичного очікування або симетрично розподілена обмежена випадкова величина, для якої при всіх значеннях напрацювання виконується умова:

$$-\xi \leq \xi(t) \leq \xi, \quad 0 \leq \xi \leq \infty. \quad (3)$$

При цьому число вимірювань вибирають за умови $N \geq 2m$, де m – кількість невідомих коефіцієнтів закону зміни параметра (рекомендується $N \geq 11$), а терміни вимірювань t_i – так, щоб випадкові величини ξ_i були практично незалежними.

Рекомендується наступний порядок прогнозування при N вимірюваннях величини y_i через довільні інтервали експлуатації:

1. Розраховують величини:

$$Y_1 = \sum_{i=1}^N y_i, Y_2 = \sum_{i=1}^N \tau_i \cdot y_i. \quad (4)$$

$$D = N \sum_{i=1}^N \tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N \tau_i \right)^2; \quad D_{11} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i^2}{D}; \quad (5)$$

$$D_{12} = D_{21} = -\frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{D}; \quad D_{22} = \frac{N}{D}.$$

2. Розраховують оцінки коефіцієнтів c_1, c_2 :

$$c_1 = Y_1 \cdot D_{11} + Y_2 \cdot D_{21}, \quad c_2 = Y_1 \cdot D_{12} + Y_2 \cdot D_{22}. \quad (6)$$

3. Розраховують оцінку середнього квадратичного відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - c_1 - c_2 \cdot t_i)^2 / (N - 2)}. \quad (7)$$

4. Розраховують середні квадратичні відхилення коефіцієнтів c_1, c_2 :

$$\sigma_1 = \sigma \sqrt{D_{11}}, \quad \sigma_2 = \sigma \sqrt{D_{22}}. \quad (8)$$

5. Розраховують гарантовані оцінки коефіцієнтів c_1, c_2 :

$$c_{1r} = c_1 \pm K \cdot \sigma_1; \quad (9)$$

$$c_{2r} = c_2 \pm K \cdot \sigma_2, \quad (10)$$

де $K = 1,282$ з довірчою ймовірністю $\gamma = 0,9$; $1,646$ ($\gamma = 0,95$); $2,32$ ($\gamma = 0,99$); (+) береться при збільшенні параметру призначення «пошкоджуваності», (-) при зменшенні.

6. Розраховують середнє (очікуване) безаварійне напрацювання:

$$T_\gamma = (Y_{гр} - c_{1r}) / c_{2r} - t_k, \quad (11)$$

де $Y_{гр}$ – граничне значення параметру призначення; t_k – напрацювання на момент останнього вимірювання.

7. Розраховують гарантоване безаварійне напрацювання:

$$T_\gamma = (Y_{гр} - c_{1r}) / c_{2r} - t_k. \quad (12)$$

Висновки

За аналізом технічної літератури встановлено два перспективні способи діагностики зубча-

стих коліс важко навантажених машин за рівнем накопичених втомних пошкоджень в експлуатації: за твердістю металу і за параметрами магнітної петлі гістерезису.

Розроблено процедуру діагностики технічного стану зубчастих коліс за вимірюванням твердості металу, яка включає п'ять основних етапів: вибір прибору; вибір схеми вимірювань; вибір числа замірів, кількості і взаємного розташування точок вимірювання; розробку конструкції шаблону для вимірювань; розробку пристосування для кріплення шаблонів.

Використання запропонованої методики прогнозування безаварійного гарантованого напрацювання зубчастих коліс з урахуванням стадій припрацювання і стабільного за лінійною функцією накопичення пошкоджень в експлуатації потребує мінімально можливих п'яти дослідів по трьом точкам вимірювань. В порівнянні з розвинутим віброакустичним методом, при використанні якого необхідна значна кількість датчиків, так в роботі [18], для виявлення пошкоджень застосовувалось 28 датчиків, для локалізації пошкодження вже знадобилися 72 датчики.

При визначенні безаварійного гарантованого напрацювання на основі декількох критеріїв граничного стану остаточне рішення приймається по тому критерію, який визначає мінімальний термін.

Подяка

Ця робота проводилась у рамках договору № БФ 1301 з Національним технічним університетом «Харківський політехнічний інститут» на виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки. Розробка методологій і шляхів підвищення технічного рівня деталей та вузлів машин важких режимів експлуатації», що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

- Гапонов, В. С., Музыкин, Ю. Д., Татьков, В. В., Путноки А. Ю., Войтович. А. И. (2013) Характеристики режима работы зубчатых передач прокатного стана 1680 ЦПТЛ металлургического комбината ОАО

- «Запорозжсталь». Вісник НТУ «ХП», № 42 (1015). С 42-48. Garonov V., Muzykin Y., Tatkov V., Putnoki A., Vojtovich. A. (2013) Charakteristiki rezhima raboty zubchatykh peredach prokatnogo stana 1680 CGPTL metallurgicheskogo kombinata OAO «Zaporozhstal». [Characteristics of the operating mode of the gears of the rolling mill 1680 TsGPTL metallurgical plant JSC «Zaporizhstal»]. Visnik NTU «HPI». [in Ukrainian].
- Клітної, В. В., Клітної, В. В., Батрак, П. О. (2020). Оптимізація планетарної передачі бортового редуктора з використанням методу диференціальної еволюції. Автомобільний транспорт, (47). 15. С. 15-20. Klitnoy, V., Klitnoi, V., Batrak, P. (2020) Optimizaciya planetarnoi peredachi bortovogo reduktora z vikoristannyam metodu diferencialnoi evolyucii. [Optimization of planetary gear of onboard gear-box using the method of differential evolution]. Avtomobilnij transport. (47). 15. 15-20. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2020.47.0.15>
 - Onishchenko, V. (2015). Investigation of tooth wears from scuffing of heavy duty machine spur gears. Mechanism and Machine Theory, Volume 83. P. 38-55. <https://doi.org/10.1115/1.802922.paper30>
 - Крот, П. В. (2005) Проблемы управления технической эксплуатацией оборудования прокатных станов. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 10. С. 327-334. Krot, P. (2005) Problemy upravleniya tekhnicheskoy ekspluatatsiej oborudovaniya prokatnykh stanov. Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii. [Problems of managing the technical operation of rolling mill equipment]. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. 10. 327-334. [in Ukrainian].
 - Крот, П. В. (2006) Анализ результатов исследований в области динамики и диагностики оборудования прокатных станов. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 12. С. 298-310. Krot, P. (2006) Analiz rezultatov issledovaniy v oblasti dinamiki i diagnostiki oborudovaniya prokatnykh stanov. [Analysis of research results in the field of dynamics and diagnostics of rolling mill equipment]. Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoj metallurgii. 12. 298-310. [in Ukrainian].
 - Klitnoi, V., Gaydamaka, A. (2020) On the problem of vibration protection of rotor systems with elastic adaptive elements of quasi-zero stiffness. Diagnostyka, 21(2). P. 69-75. <https://doi.org/10.29354/diag/122533>
 - Gaydamaka, A., Muzikin, Y., Klitnoi, V., Basova, Y., Dobrotvorskiy, S. (2021) Selecting the Method for Pre-tightening Threaded Connections of Heavy Engineering. International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE), P. 69-77. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83368-8_7
 - Антипенко, Г. Л., Судакова, В. А., Шамбалова, М. Г. (2016) Оценка технического состояния зубчатых колёс по анализу кинематической погрешности передачи. Вестник Белорусского университета, 3(52). С. 6–18. Antipenko, G., Sudakova, V., Shambalova, M. (2016) Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya zubchatykh kolyos po analizu kinematischej pogreshnosti peredachi. [Assessment of the technical condition of gears by analyzing the kinematic error of transmission]. Vestnik Belorusskogo universiteta. 3(52). 6–18. [in Russian].
 - Frini, M., Soualhi, A., El Badaoui, M. (2019) Gear faults diagnosis based on the geometric indicators of electrical signals in three-phase induction motors. Mechanism and Machine Theory, Volume 138. P. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.030>
 - Yuejian, C., Stephan, S., P. Stephan, H., Ming, J. Z. (2021) A time series model-based method for gear tooth crack detection and severity assessment under random speed variation. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 156. 107605. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107605>
 - Yuejian, C., Xihui, L., Ming, J. Z. (2020) An improved singular value decomposition-based method for gear tooth crack detection and severity assessment. Journal of Sound and Vibration, Volume 468. 115068. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115068>
 - Ишин, Н. Н., Гоман, А. М., Скороходов, А. С., Натурьева, М. К. (2014) Оценка остаточного ресурса зубчатых передач в условиях эксплуатации. Неразрушающий контроль и диагностика, № 2. С. 2–6. Ishin, N., Goman, A., Skorohodov, A., Natur'eva, M. (2014) Ocenka ostatochnogo resursa zubchatykh peredach v usloviyah ekspluatatsii. [Estimation of the residual life of gears under operating conditions]. Nerazrushayushchij kontrol i diagnostika. 2. 2–6. [in Russian].
 - Omar D. M., Matti R. (2020). Gear fault models and dynamics-based modelling for gear fault detection – a review. Engineering Failure Analysis, Vol. 117. 104798. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104798>
 - Anil, K., Gandhi, C. P., Yuqing, Z., Rajesh, K., Jiawei, X. (2020) Latest developments in gear defect diagnosis and prognosis: A review. Measurement, Vol. 158. 107735. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107735>.
 - Yucesan, Y. A., Dourado, A., Viana, F. A. C. (2021) A survey of modeling for prognosis and health management of industrial equipment. Advanced Engineering Informatics, Volume 50.

101404.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101404>
16. Worden, K., Cross, E. J., Dervilis, N., Papatheou, E., Antoniadou, I. (2015) Structural health monitoring: from structures to systems-of-systems. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48. 21. P. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.497>
 17. Звонарев, И. Е., Иванов, С. Л., Шишлянников, Д. И., Фокин, А.С. (2014) Исследования поверхностной твёрдости металла в области повышенного износа и разрушения деталей горных машин. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, № 11. С. 67–76. Zvonarev, I., Ivanov, S., Shishlyannikov, D., Fokin, A. (2014) Issledovaniya poverhnostnoj tvordosti metalla v oblasti povyshennogo iznosa i razrusheniya detalej gornyh mashin. [Investigations of the surface hardness of metal in the area of increased wear and destruction of parts of mining machines]. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 11. 67–76. [in Russian].
 18. BJORHEIM, F., SIRIWARDANE, S. C., PAVLOU, D. (2022) A review of fatigue damage detection and measurement techniques. *International Journal of Fatigue*, Vol. 154. 106556. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106556>
 19. Drumond, G., Roudet, F., Chicot, D., Pinheiro, B., Pasqualino, I. (2021) A damage criterion to predict the fatigue life of steel pipelines based on indentation measurements. *J Offshore Mech Arct Eng*, 143(1). 011701. <https://doi.org/10.1115/1.4047203>
 20. Sulko, M., Chmelko, V., Кепка, М. (2017) Possibility of fatigue damage detection by non-destructive measurement of the surface hardness. *Procedia Structural Integrity*, 7. P. 262-267.
 21. Санкин, Ю. Н., Гурьянов, М.В. (2007) Способ неразрушающего контроля и прогнозирования ресурса деталей машин. Пат. 2305268 RU. G01N 3/32. заявл. 06.02.2006; опублик. 27.08.2007. № 2006103454/28. 4 с. Sankin, Y., Gur'yanov, M. (2006) Sposob nerazrushayushchego kontrolya i prognozirovaniya resursa detalej mashin. [Method of non-destructive testing and predicting the resource of machine parts]. Pat. 2305268 RU. [in Russian].
 22. Mocko, W., Grzywna, P., Kowalewski, Z. L., Radziejewska, J. (2016) An influence of cyclic loading on the form of constitutive relationship for DP500 steel. *Materials & Design*, Vol.103. P. 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.075>
 23. Горецкий, В. М., Дубов, А. А., Демин, Е. А. (2000) Исследование структурной повреждаемости стальных образцов с использованием метода магнитной памяти металла. *Контроль. Диагностика*, № 3. С. 23-26. Goreckij, V., Dubov, A., Demin, E. (2000) Issledovanie strukturnoj povrezhdaemosti stalnyh obrazcov s ispolzovaniem metoda magnitnoj pam'yati metalla. [Investigation of the structural damage of steel samples using the metal magnetic memory method]. *Kontrol. Diagnostika*. 3. 23-26. [in Russian].
 24. Serbin, E. D., Kostin, V. N., Vasilenko, O. N., Ksenofontov, D. G., Gerasimov, E. G., Terentev, P. B. (2020) Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state. *NDT & E International*, Vol. 116. 102330. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102330>
 25. Venkatachalapathi, N., Jameel basha, S. MD., Raju, G. J., Raghavulu, P. (2018) Characterization of fatigued steel states with metal magnetic memory method. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5. 2. Part 2. P. 8645-8654. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.002>
 26. Губский, С. А., Сухомлин, В. И., Волох, В. И. (2014) Контроль напряжённого состояния сталей по коэрцитивной силе. *Машинобудування*, №13. С. 6-10. Gubskij, S., Suhomlin, V., Voloh, V. (2014) Kontrol napryazhyonnogo sostoyaniya stalej po koercitivnoj sile. [Control of the stress state of steels by coercive force]. *Mashinobuduvannya*. [in Ukrainian]. 13. 6-10.
 27. Ye. D. Y., Wang, D. J., An, P. (1996) Characteristics of the change in the surface microhardness during high cycle fatigue damage. *Mater Chem Phys*, 44(2). P. 179-181.
 28. Chen, Z. J., Strom, A., Jiles, D. C. (1993) Micromagnetic surface measurements for evaluation of surface modifications due to cyclic stress. *IEEE Trans Magn*, 29(6). P. 3031-3033.
 29. Уралов, Я. С. Ватулин, С. К. Коровин, А. П. Попов, В. А. (2004) Методика определения остаточного ресурса металлоконструкций башенных кранов БК-1000. *Известия Петербургского университета путей сообщения*, № 2. С. 162-167. Uralov, Y., Vatulin, S., Korovin, A., Popov, V. (2004) Metodika opredeleniya ostatochnogo resursa metallokonstrukcij bashennyh kranov BK-1000. [Methodology for determining the residual life of metal structures of tower cranes BK-1000]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*. 2. 162-167. [in Russian].
 30. Сниткин, В. М., Фролов, И. П., Овсянников, Е. М., Овсянников, В. Е. (2015) Оценка остаточного ресурса мостовых кранов коробчатого сечения. *Инженерный вестник Дона*, № 3(37). С. 89. Snitkin, V., Frolov, I., Ovsyannikov, E., Ovsyannikov, V. (2015) Ocenka ostatochnogo resursa mostovyh kranov reshetchatogo secheniya. [Estimation of the residual life of box-section overhead cranes]. *Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Inzhenernyj vestnik Dona»*. 3(37). 89. [in Russian].
 31. Бойко, Г. О., Бойко, Т. В., Спіхін, Р. А. (2018) Методи оцінки технічного стану вантажопідійомних кранів. *Вісник*

- східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, № 2 (243). С. 42-49. Boiko, H., Boiko, T., Yepikhin, R. (2018) Metody otsinky tekhnichnoho stanu vantazhopidiomnykh kraniv. [Methods for assessing the technical condition of cranes]. Visnyk skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. Volodymyra Dalia. 2 (243). 42-49. [in Ukrainian].
32. Гайдамака, А. В., Клітної, В. В., Музикін, Ю. Д., Татьков, В. В., Наумов, О. І., Бородин, Д. Ю. (2020) Спосіб діагностики коліс зубчастих передач за зміною твердості їх торців в зонах можливого руйнування. Пат. 145452, Україна: МПК G01M 13/02. заяв. 13.07.2020. опубл. 10.12.2020. бюл. № 23. 4 с. Gajdamaka, A., Klitnoi, V., Muzikin, Y., Tatkov, V., Naumov, O., Borodin, D. Spisib diagnostiki kolis zubchastih peredach za zminoyu tverdosti ih torciv v zonah mozhlivogo rujnuvannya. [Method of diagnosing gear wheels by changing hardness of their ends in zones of possible destruction]. Patent number 145452. [in Ukrainian].
33. ДСТУ 8646:2016 Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (строки служби) технічних систем [Чинний від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 63 с. DSTU 8646:2016 Nadiinist tekhniky. Otsiniuvannia ta prohnouzuvannia zalyshkovoho resursu (stroky sluzhby) tekhnichnykh system [Reliability of equipment. Estimation and forecasting of residual resource (service life) of technical systems]. Vyd. ofits. Kyiv: DP «UkrNDNTs». [in Ukrainian].

Гайдамака Анатолій Володимирович¹, д.т.н., зав. каф. деталей машин та гідропневмосистем, тел. +38057-707-61-28, е-mail: anatolij.gaydamaka@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6952-4086

Музикін Юрій Дмитрович¹, к.т.н., проф. каф. деталей машин та гідропневмосистем, е-mail: Yurii.muzykin@khpi.edu.ua, тел. +38057-707-61-28, ORCID: 0000-0002-2356-7689

Клітної Володимир Вікторович¹, к.т.н., доц. каф. деталей машин та гідропневмосистем, тел. +38 067-282-93-24, Vladklitnoi@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0024-5959

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, Україна, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Diagnostics of the technical condition and prediction of accident-free guaranteed operating time of heavy loaded machines gear wheels

Abstract. Problem. This article highlights the current state of diagnostics of gears on the level of

accumulated fatigue damage in operation. The generalization of the known information on determination of a technical condition of separate gear wheels, especially with big modules ($m > 20$ mm), allows to outline prospects of development of such diagnostics of a technical condition of gear wheels directly in the course of operation. **Goal.** The goal of this study is to develop an algorithm for diagnosing the technical condition and forecasting a fault-free operation of the gears of heavy-duty machines. **Methodology.** The least squares method and the confidence interval method are used to predict accident-free guaranteed gear operation. **Results.** A procedure for diagnosing the technical condition of gears by measuring the hardness of the metal has been developed, which includes five main stages: selection of the device; choice of measurement scheme; selection of the number of measurements, number and relative position of measuring points; development of a design of a template for measurements; development of a device for fastening templates. When determining the accident-free guaranteed operating time on the basis of several criteria of the limit state, the final decision is made on the criterion that determines the minimum term. **Originality.** The method of forecasting accident-free guaranteed operating time of gears is chosen taking into account the stages of running-in and stable in linear function accumulation of damage in operation. **Practical value.** The use of the developed procedure for diagnosing the technical condition of the gears of gearboxes of heavy-duty machines will significantly increase the efficiency of their operation due to the transition from scheduled preventive maintenance to maintenance according to the actual technical condition.

Key words: diagnostics, technical condition, prediction, guaranteed operating time, gear wheel, fatigue damage.

Gaydamaka Anatoliy¹, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Machine Components and Hydraulpneumatic Systems, тел. +38057-707-61-28, anatolij.gaydamaka@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6952-4086

Muzykin Yurii¹, Ph.D., Prof. Department of Machine Components and Hydraulpneumatic Systems, тел. +38057-707-61-28, Yurii.muzykin@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2356-7689

Klitnoi Volodymyr¹, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Machine Components and Hydraulpneumatic Systems, тел. +38 067-282-93-24, Vladklitnoi@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2356-7689

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

Аналіз та програмна реалізація модифікованого криптографічного шифру Вернама та шифру Цезаря

Фастовець В. І.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. В статті проведено аналіз та реалізовані практичні підходи до підвищення інтересу студентів, які навчаються на спеціальності «Кібербезпека», до курсу криптографії. Обрано гнучкі методи, що дозволяють різні підходи до навчання. Реалізовано модифікований симетричний шифр Вернама та шифр Цезаря з використанням концепції, що комбінує сучасні мови програмування та принципи криптографії, які студенти вивчають на профільних спеціальностях.

Ключові слова: шифр, криптографія, програмування, секретний ключ, стійкість, криптосистема, навчання.

Вступ

Сьогодні у світі інформаційних технологій без кордонів та цифрової глобалізації питання інформаційної безпеки стоїть на порядку денному як ніколи актуально.

З огляду на величезну кількість передач даних у сучасному світі, підтримувати безпеку даних надзвичайно важливо та складно. У цій роботі пропонується дослідження та реалізація модифікованого криптографічного шифру Вернама та шифру Цезаря, які можна використовувати для захисту конфіденційної інформації [1-4].

Алгоритми програмно реалізовані на мові C++, їх дослідження проведено експериментально, і результати оцінки, а також порівняння з аналогічними роботами демонструють хороші якості запропонованої схеми.

У роботі розглянуто захист даних за допомогою криптографічних методів та алгоритмів, що забезпечує безпеку даних, що передаються, та конфіденційність, цілісність та доступність інформації. Криптографічні алгоритми діляться на дві категорії: криптографія із симетричним ключем, де один ключ використовується як для шифрування, так і для дешифрування, та криптографія з асиметричним ключем: коли використовуються два різні ключі, один використовується для шифрування, а другий – для дешифрування.

Аналіз публікацій

Постійне поліпшення інтернет зв'язку стало невід'ємною частиною життя, наприклад, на роботі або в навчальному закладі, і навіть при повсякденному використанні, наприклад, під час листування електронною поштою та обміну миттєвими повідомленнями.

З розвитком технологій зберігання та обміну даними різними способами по мережі від відправника до адресата постає питання захисту цієї інформації від загроз або перешкод. Захист інформації має здійснюватися за допомогою методів захисту, які забезпечують безпеку даних серед задіяних сторін [5-7].

Інформаційна безпека стає все більш важливим компонентом будь-якої інформаційної системи. Дані та інформація, що зберігаються на складах, магазинах, банках, підприємствах та проходять через канали зв'язку, повинні бути захищеними.

Використання криптографічних механізмів і протоколів може вирішити багато проблем безпеки (цілісність, конфіденційність, достовірність і неспростовність інформації).

Хоча спочатку криптографія виникла у військовій галузі, нині її використання широко поширилося на різні цивільні сфери, як-то інтернет-банкінг, державні установи, електронна комерція та соціальні мережі [8-10].

Розвиток криптографічних технологій має безпосередній вплив на економіку, соціальні та політичні аспекти суспільства. З одного боку, повсюдне використання криптографії сьогодні підвищує важливість курсу кібербезпеки в університеті. З іншої сторони, викладачі з кібербезпеки стикаються з деякими труднощами в ході читання цього курсу.

Кібербезпека тісно пов'язана з іншими науками; вона є перетином математики, інформатики, комп'ютерних мереж та обробки даних. Основи ж криптографії, однієї з найважливіших складових кібербезпеки, лежать глибоко в таких прикладних науках, як теорія чисел і абстрактна алгебра.

Однак окрім різної математичної підготовки, студенти мають ще і різні академічні інтереси. Щоб мати можливість вивчати криптографічні системи, студенти повинні мати сильні математичні знання, особливо в таких дисциплінах, як теорія чисел, абстрактна алгебра, теорія ймовірності і статистика [11-12].

Вища математика, лінійна алгебра є дуже важливими предметами. Але, якщо ми хочемо заохотити студентів криптографією, треба ефективніше використовувати всі аспекти IT кластеру. Ідеально для цього підходить саме реалізація алгоритмів та програм за допомогою мов програмування.

Перевага криптографії з симетричним ключем полягає в тому, що робота з цим методом дуже проста для користувачів, так як для шифрування використовується один ключ, як і для цілей дешифрування. Цей ключ має бути секретним і повинен бути відомим тільки відправнику та одержувачу і нікому іншому.

З іншого боку, у криптографії з відкритим ключем є два ключі. Один ключ називається відкритим ключем, який може бути доступний будь-кому, хто хоче зашифрувати повідомлення, а інший називається секретним ключем або закритим ключем, який повинен зберігатися тільки у одержувача.

На жаль, це викриває недоліки безпеки, так як цілісність шифрування повністю залежить від надійності пароля.

Хоча майже всі університети мають сучасні електронні лабораторії з мережевими комп'ютерами та доступом до Інтернету, практика викладання курсу криптографії в багатьох університетах не включає експериментування. Ця відсутність практичного застосування криптографії є основною причиною відсутності інтересу студентів до вико-

нання практичних завдань [13-15].

Розвиток сучасних та найпопулярніших мов програмування надає можливість створювати як криптографічні десктопні додатки під операційну систему Windows так і мобільні застосунки під операційні системи IOS та Android. Засоби ж Web-програмування дозволяють реалізувати криптографічні методи на мові JS та Python. Скрипт-програми реалізовані на цих мовах програмування доступні користувачам з браузерів та месенджерів.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є підвищення інтересу студентів, які навчаються на спеціальності «Кібербезпека», до курсу Криптографії. Дуже важливо і корисно проілюструвати, де і яким чином можливо створювати програмні реалізації методів шифрування/дешифрування, а також навести приклади модифікації існуючих алгоритмів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз та реалізувати практичні підходи до підвищення інтересу студентів до криптографії, методи повинні бути гнучкими та дозволяти різні підходи до навчання;
- реалізувати модифікований симетричний шифр Вернама;
- реалізувати шифр Цезаря.

Аналіз та програмна реалізація шифру Вернама

Шифр Вернама є системою симетричного шифрування, і був запропонований співробітниками АТ & Т Гільбертом Вернамом і Мейджором Джозефом Моборном в 1917 році. У 1949 роках була опублікована робота Клода Шеннона «Математична теорія криптографії», де він довів абсолютну стійкість шифру Вернама і його висновком стало наступне твердження: «шифр Вернама - найбезпечніша криптосистема з усіх наявних».

Однак для того щоб шифр дійсно був стійким, необхідно виконання наступних трьох правил:

1. Ключ для шифрування вибирається випадковим чином.
2. Довжина ключа повинна дорівнювати довжині відкритого тексту.
3. Ключ повинен використовуватися тільки один раз.

У криптографії шифр Вернама називають також «схемою одноразових записників». На

практиці можна один раз фізично передати носій інформації з довгим істинно випадковим ключем, а потім, у міру необхідності, пересилати повідомлення. На цьому заснована ідея шифрозаписника: шифрувальник дипломатичною поштою або при особистій зустрічі забезпечується записником, кожна сторінка якого містить ключі. Такий же записник є і у приймаючої сторони. Використані сторінки знищуються.

Шифр Вернама базується на двійковій арифметиці. Основним об'єктом розгляду в даному методі шифрування є логічна операція XOR (виключне АБО). Таким чином, так як використовується двійкова система числення, то всі операції будуть здійснюватися над нулем (0) і одиницею (1). Логічна операція XOR на відміну від операції OR при логічному порівнянні 0 і 1 дає 1, при порівнянні 1 з 1 дає 0, а при 0 з 0 дає 0. Отже, якщо ми виконаємо операцію XOR над числами 10110 і 11010, то отримаємо: 10110 xor 11010 = 01100.

Далі, так як шифр працює з двійковою системою числення, необхідно пам'ятати, що букви - це всього лише деяка інтерпретація числа, тобто число є кодом символу деякої таблиці кодувань. Наприклад, найбільш популярні таблиці кодувань це: ANSI, ASCII і UTF (unicode). В кожній таблиці один і той же символ може мати різний код, тому необхідно використовувати одне і те ж кодування для шифрування і дешифрування. Таким чином, перед тим як здійснити шифрування, необхідно перевести всі символи в їх однозначну числову інтерпретацію.

Використовувати будемо власну систему кодування. При застосуванні шифру Вернама до письмового тексту, кожній букві використовуваного алфавіту дамо відповідний їй порядковий номер у двійковій системі числення. Наприклад, якщо ми використовуємо український алфавіт, то це буде виглядати так: а → 00000, б → 00001, в → 00010, г → 00011, ... я → 11111. Тим самим ми визначили свою таблицю кодування.

Після цього, написавши повідомлення і вгадавши ключ, кожен символ необхідно перетворити в його числове значення, відповідне до нашої таблиці кодування, і після цього здійснити операцію XOR над кожною відповідною парою. Так як даний метод шифрування є симетричним, отже застосувавши операцію XOR для кожної пари символів шифр-тексту (шифrogramи) і ключа, ми отримаємо відкритий текст.

Програмну реалізація шифру Вернама було вирішено робити на мові програмування C++.

Припустимо, що у нас є рядок або масив символів - Str0. Це буде відкритий текст, який треба зашифрувати. Тепер нам треба визначити випадковий ключ з довжиною, що дорівнює довжині відкритого тексту. Скористаємося стандартною функцією генерації випадкових чисел rand для C++. Для реалізації шифрування опишемо цикл, в якому будемо посимвольно здійснювати операцію XOR. Але для цього нам знадобитися ще оголосити масив-приймач, в який ми помістимо зашифрований текст.

Програмна реалізація шифрування шифром Вернама:

```
void shifr_Vernam
{ int i,len; // Визначаємо необхідні змінні
  len = strlen("Infomatiks");// визначаємо довжину рядка відкритого тексту
  char *Str0 = new char[len]; // оголошуємо динамічний масив зазначеної довжини для відкритого тексту
  char *key = new char[len]; //точно такий же масив оголошуємо для ключа
  char *shStr = new char[len]; // оголошуємо масив-приймач для зашифрованого тексту
  Str0=" Infomatiks"; // поміщаємо в масив відкритий текст
  // визначаємо ключ випадковим чином
  for(i = 0; i < len; i++)
  key[i]=(char)rand()%255;
  // безпосередньо саме шифрування
  for(i = 0; i < len; i++)
  shStr[i]= Str0[i]^key[i];
  // для наочності виведемо на екран результат роботи
  printf("\nOtkryti text: %s", Str0);
  printf("\nZashifrovanyi text: %s", shStr);}
Для дешифрування ті самі дії проводимо для зашифрованого тексту.
```

Аналіз та програмна реалізація шифру Цезаря

Розглянемо систему шифрування, яка носить ім'я «шифр Юлія Цезаря». Знаний римський імператор і полководець, що жив в 1 столітті до нашої ери, використовував цей шифр в своєму листуванні.

Шифр Цезаря стосовно до української мови полягає в наступному. Кожна буква повідомлення замінюється на іншу, яка в українському алфавіті знаходиться від вихідної на три позиції далі.

Таким чином, буква А замінюється на Г, Б

на Д і так далі до букви Я, яка замінюється на В.

Для розшифрування повідомлення необхідно знати тільки сам алгоритм шифрування. Будь-яка людина, що знає спосіб шифрування, легко може розшифрувати секретне повідомлення. Таким чином, ключем в даному методі є сам алгоритм.

Спробуємо модифікувати шифр Цезаря для його вдосконалення. Можна було б спробувати розширити алфавіт з 33 до 36 символів і більше за рахунок включення розділових знаків, апострофа і пробілів. Це збільшення алфавіту замаскувало б довжину кожного окремого слова.

Припустимо, що букви зсуваються не на три знака вправо, а на n ($0 < n < 33$). В цьому випадку в системі шифрування з'являється ключ - число n - параметр зсуву. Так як n може приймати різні значення, знання одного тільки алгоритму не дозволить противнику розшифрувати секретне повідомлення.

Противник, намагаючись знайти значення секретного ключа, зможе тільки проводити атаку по шифротексту способом послідовного перебору всіх можливих ключів (так званий метод "грубої сили").

При такому методі відбувається пошук осмисленого повідомлення. Таке допущення про одиничність рішення цілком обґрунтовано, коли вихідне повідомлення складено на одній з природних мов і містить більше п'яти-шести знаків. Але якщо повідомлення дуже коротке, можливих рішень може бути кілька. Єдине рішення також дуже важко знайти, якщо вихідне повідомлення, складається, наприклад, з цифр.

При методі послідовного перебору всі отримані варіанти будуть рівнозначні і зловмисник не зможе зрозуміти, яка саме комбінація істинна. Аналізуючи шифротекст, він не зможе знайти значення секретного ключа. Звичайно, у якийсь момент один з варіантів підійде до кода, але в настільки простий метод шифрування не можна розраховувати на більшу секретність.

На основі цих міркувань була побудована математична модель шифра Цезаря. Якщо співставити кожному символу алфавіту його порядковий номер (проводячи нумерацію з 0), то шифрування і дешифрування можна висловити формулами модульної арифметики:

$$y = (x + k) \bmod n;$$

$$x = (y - k + n) \bmod n,$$

де x – символ відкритого тексту, y – символ шифрованого тексту, n – потужність алфавіту, k – ключ.

З точки зору математики шифр Цезаря є окремих випадком афінного шифру.

Програмна реалізація шифрування / дешифрування шифром Цезаря для латинського алфавіту:

```
#include "stdafx.h"
#include <iostream>
#include <string>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#include <sstream>
#include <fstream>
using namespace std;
int main()
{int k; // Змінна вибору -
шифрування/дешифрування
int shift; //Величина зсуву
string result = ""; // рядок - результат
cout<<" Введіть 1 для шифрування та для
розшифрування 2\n"; cin>>k;
switch (k) //Якщо k
{ case 1: // Якщо вибрано шифрування
{ cout<<" Введіть значення зсуву для
шифрування \n";
cin>>shift;
if (shift > 26)
shift = shift % 26; // обчислення зсуву
cout<<"Read of file...\n";
// читання файлу
string s; // Рядок, зчитаний з файлу
ifstream in("Test.txt");
getline(in,s);
cout<<"Текст файлу: \n"<<s<<endl;
in.close();
cout<<"Читання завершено!\n";
cout<<"Шифрування...\n";
for (int i = 0; i < s.length(); i++) {
// Якщо не латиниця
if (((int)(s[i]) < 65)||((int)(s[i]) > 122))
result += s[i];
// Якщо буква є рядковою
if (((int)(s[i]) >= 97) && ((int)(s[i]) <= 122))
// Якщо буква після зсуву виходить за
межі алфавіту
{ if ((int)(s[i]) + shift > 122)
// Додавання в рядок результатів символа
result += (char)((int)(s[i]) + shift - 26);
// Якщо буква після зсуву виходить за
межі алфавіту
else
// Додавання в рядок результатів символа
result += (char)((int)(s[i]) + shift); }
}
```

```

// Якщо буква є прописною
if (((int)(s[i]) >= 65) && ((int)(s[i]) <= 90)){
// Якщо буква після зсуву виходить за
межі алфавіту
if ((int)(s[i]) + shift > 90)
// Додавання в рядок результатів символу
result += (char)((int)(s[i]) + shift - 26);
// Якщо буква може бути зсунута в межах
алфавіту
else
// Додавання в рядок результатів символу
result += (char)((int)(s[i]) + shift); } }
cout<<"Шифрування завершено!\n";
cout<<"Результат:\n";
cout<<result; //Вивід результату
break; }
case 2:
// Якщо вибрано дешифрування
{ cout<<" Введіть значення зсуву для
розшифрування \n";
cin>>shift;
if (shift > 26)
shift = shift % 26;
cout<<"Прочитати файл...\n";
string s;
ifstream in("Test.txt");
getline(in,s);
cout<<"Текст файлу: \n"<<s<<endl;
in.close();
cout<<"Читання завершено!\n";
cout<<"Розшифровка...\n";
for (int i = 0; i < s.length(); i++)
{ if (((int)(s[i]) < 65)||((int)(s[i]) > 122))
result += s[i];
if (((int)(s[i]) >= 97) &&
((int)(s[i]) <= 122))
{ if ((int)(s[i]) - shift < 97)
result += (char)((int)(s[i]) - shift + 26);
else
result += (char)((int)(s[i]) - shift); }
if (((int)(s[i]) >= 65) &&
((int)(s[i]) <= 90))
{ if ((int)(s[i]) - shift < 65)
result += (char)((int)(s[i]) - shift + 26);
else
result += (char)((int)(s[i]) - shift); } }
cout<<"Розшифровка завершена!\n";
cout<<"Результат:\n";
cout<<result; //Вивід результату
break; }
default:
// Якщо помилкове значення
{ cout<<"Помилка\n";
break; } }
getch();
return 0; }

```

Висновки

У статті описано погляд на криптосистеми шифрування з боку мов програмування.

Наведені аналіз та реалізація модифікованого криптографічного шифру Вернама та шифру Цезаря з використанням концепції, що комбінує сучасні мови програмування та принципи криптографії, які студенти вивчають на профільних спеціальностях.

Використання криптографії як навчального засобу допоможе студентам розвивати свої навички в програмуванні та розуміти поняття кібербезпеки на прикладах реалізації модифікованого шифру Вернама та шифру Цезаря.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Bhandari R., Kirubanand V. B. (2019) Enhanced encryption technique for secure iot data transmission. 9. 5. 3732–3738.
2. Chałupnik R., Kędziora M., Józwiak P., Józwiak I. (2020) Correspondent Sensitive Encryption Standard (CSES) Algorithm in Insecure Communication Channel in IEEE Systems Journal. 12. 4. 90–98.
3. Bhanot R., Hans R. (2015) A review and comparative analysis of various encryption algorithms. Int. J. Secur. its Appl. 9. 4. 289–306.
4. Din R., Bakar R., Utama S., Jasmis J., Elias S. J. (2019) The evaluation performance of letter-based technique on text steganography system. Bull. Electr. Eng. Informatics. 8. 1. 291–297.
5. Singh N. (2020) XOR Encryption Techniques of Video Steganography: A Comparative Analysis. Springer International Publishing 203–214.
6. Namasudra S. (2019) An improved attribute-based encryption technique towards the data security in cloud computing. Concurr. Comput. 31. 3. 1–15.
7. Ogiela M. R. (2019) Cognitive solutions for security and cryptography. Cogn. Syst. Res. 55. 258–261.
8. Hatkar S. S., Bhagyashri K. Pawar. (2016) Symmetric key algorithm using vernam cipher: VSA. Inventive Computation Technologies (ICICT). International Conference on. Vol. 3.
9. Zimmermann M., Staicu C. A., Tenny C., Pradel M. (2019) Small world with high risks: A study of security threats in the npm ecosystem in Proc. 28th USENIX Sec., Santa Clara. CA.
10. Nath A., Das S., Chakrabarti A. (2010) Data Hiding and Retrieval. Proceedings of IEEE International conference on Computer

- Intelligence and Computer Network held at Bhopal.
11. Adamovic S., Sarac M., Stamenkovic D., Radovanovic D. (2018) The Importance of the Using Software Tools for Learning Modern Cryptography. *International Journal of Engineering Education*. 34. 1, 256–262.
 12. Yang F., Zhong C., Yin M., Huang Y. (2009) Teaching Cryptology Course Based on Theory-Algorithm-PracticeApplication Mode. *Proceedings of the First International Workshop on Education Technology and Computer Science*. Wuhan. 468–470.
 13. Adamovic S., Sarac M., Veinovic M., Milosavljevic M., Jevremovic A. (2014) An Interactive and Collaborative Approach to Teaching Cryptology, *Journal of Educational Technology & Society*. 17(1). 197–205.
 14. Olejar D., Stanek M (1999) Some Aspects of Cryptology Teaching. *Proceedings of the 1st World Conference on Information Security Education*. Stockholm (Sweden). 1–9.
 15. Song X., Deng H. (2009) Taking Flexible and Diverse Approaches to Get Undergraduate Students Interested in Cryptography Course. *Proceedings of the First International Workshop on Education Technology and Computer Science*. Wuhan. 490–494.

Фастовець Валентина Іванівна¹, к.т.н., доц., кафедри кафедра Інформатики та прикладної математики, тел. +380632840672, e-mail: tinafast2013@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8428-747X.

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

Analysis and software implementation of the modified cryptographic Vernam cipher and the Caesar cipher

Abstract: Problem. *Modern cryptography is a very important part of cybersecurity and confidentiality of many operations. It covers almost all parts of our lives, from e-commerce to specialized education of*

students. Goal. *The advantage of symmetric key cryptography is that working with this method is very easy for users, as one key is used for encryption, as well as for decryption purposes, and this key must be secret and should be known only to the sender and recipient and no one else. On the other hand, public key cryptography has two keys. Unfortunately, this exposes the inherent security flaws, as the integrity of the encryption depends entirely on the password. It was decided to consider the implementation of a modified symmetric Vernam cipher that avoids these problems, and its modification and experimental studies should further strengthen data protection. Methodology.* *Higher mathematics, linear algebra are very important subjects. But if we want to encourage students with cryptography, we need to use all aspects of the IT cluster more effectively. Ideal for this is the implementation of algorithms and programs using programming languages. It is very important and useful for students studying Cybersecurity to illustrate where and how it is possible to create software implementations of encryption / decryption methods. Results.* *The article presents the analysis and implementation of the modified cryptographic Vernam cipher and Caesar cipher using a concept that combines modern programming languages and the principles of cryptography, which students study in subject-oriented specialties. Originality.* *An original approach to teaching Cybersecurity students by implementing ciphers using applied programming is described. Practical value.* *Using cryptography as a learning tool will help students develop their programming skills and effectively understand the concept of cybersecurity in real-world examples.*

Keywords: *cipher, cryptography, programming, secret key, stability, cryptosystem, study.*

Fastovets Valentyna¹, Assoc. Prof, cand. eng. sc., e-mail: tinafast2013@gmail.com, tel. +380632840672, ORCID: 0000-0002-8428-747X.

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Peculiarities of English-teaching practice for students of electrical engineering

Ponikarovska S. V.¹

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

Annotation. Problem. As engineering is a vast area of study in the world and English is a recognized language of international communication, knowledge of English is compulsory. Besides, we live in the digital age and English is the only language in latest version applications, installation guides and software instructions. Learning for students of engineering from not English-speaking countries is very important not only for their scholastic life, but also for their prospective career, mobility and successful communication. **Goal.** The goal of the work is to determine the features of teaching English to the students of electrical engineering, specify the role of English language for engineering students, outline the technique and methods of organizing the teaching process, look into innovative technologies of teaching. **Methodology.** The methodology is based on the analysis of the existing methods of teaching which are many, comparison of classical and innovative methods and analysis of the strategies of different methods. The paper emphasizes creative approach in teaching as a key to success. **Results.** The work provides a brief theoretical grounding and a working definition for creativity and motivation in teaching English for Specific Purposes and English as a Foreign language. It also explores the role and function of creativity in the context of the changing paradigm regarding the overall scope of the educational system in general and of the language learning in particular. **Originality.** The work offers combining creative methods and active strategies in fostering better language acquisition during English classes. When we see that the students are involved and motivated, it means that the strategy works. The teacher-oriented method is not currently welcomed in language teaching, and the ways to make it student-oriented are offered in the work. **Practical value.** The paper contains some practical advice on how a teacher can create more situations in which students can contribute, initiate, control and create. Keeping in mind the dependence of the learning success on creativity of teachers and motivation of students, new innovative methods of teaching in proper combination with theory of language can be used.

Key words: creativity, engineering students, communicative, competence, learning success.

Introduction

Engineering is a vast area of study worldwide. As English is a recognized language of international communication, it is quite understandable that in order that the results of the studies are known to everyone who is concerned, they should be and most often are published in English. Besides, decent knowledge of English for students of engineering from not English-speaking countries is very important not only for their scholastic life, but also for their prospective career, mobility and successful communication as everybody today faces the necessity to communicate in English somewhere some day. It is a primary language of global communica-

tion as we live in the digital age and English is the only language in latest version applications, installation guides, software instructions which are available before they are or are not translated into other languages. If you want to study abroad or achieve a higher rank and degree in science, English language of some specific level is compulsory. If you want to understand and be understood when going across the borders – the decent knowledge of English is your way to success. As engineering is the biggest field of study in the world and English is one of the most necessary social knowledge, we can see how these two areas overlap. So, English communication competence is an important part of

academic and social life of engineering students and their career [1].

Analysis of publications

Teaching English language to engineers (both English for Specific Purposes and English as a foreign language) has been undergoing considerable changes and challenges because there are many factors influencing the process. Many scientists have looked into the problem since it appeared as a separate area of language learning.

It was T. Dudley-Evans who admitted that teaching ESP requires a specific approach, different from the general language teaching. In his definition of ESP, he included three differentiating factors: ESP must be connected to a specific discipline or field of study, teachers should use different methodology than the one usually used in teaching languages and the level of the students should start from intermediate adult learners [2]. B. Jeffrey and A. Craft focused on the creativity of teaching process, characterized by imaginative, dynamic, and innovative approaches [3]. G. Molnár and Z. Szűts, understanding that students communicate more self-confidently via Facebook, using mobile communicational technology rather than they do in the actual classrooms, researched how mobile devices can enhance engagement and interaction with learning activities [4]. H. Gu, H. Bo and L. Ren studied students' attitude to different forms of educational materials and found out that about 85% of the students prefer using e-textbook, and 53.33% of the students vote for interactive teaching method [5]. H. Ning, G. Hornby examined the impact of cooperative learning on tertiary EFL learners' motivation [6]. The authors of [7] maintained that students should speak in English during the group activities, and they should be congratulated whenever they succeed in their attempt. They insist that in order to reduce the anxiety levels of the students, the teacher should build a supportive and cooperative atmosphere rather than a competitive or stressful one [7]. A. Keane says that oral skills allow you to interact at different technical levels, both formal and informal. Filming or recording a presentation of this type of activity, group discussion of the strengths and weaknesses of its implementation and evaluation of results have a very effective feedback between the teacher and students, as well as between the students themselves [8]. N. Bilan underlines that communica-

tive method is a means of learning foreign languages, it is aimed at the development and improvement of personality, the disclosure of its reserve capabilities and creative potential, it creates the conditions for effective improvement of the educational process in higher education [9]. T. Honcharenko says that the teacher must focus on the prospects for effective use of acquired knowledge, skills and abilities in future activities of the engineer, on the formation of their ability and inner need for constant self-study, self-education and self-improvement during all active labor activity [10].

Purpose and Tasks

The goal of the work is to determine the features of teaching English to the students of engineering, specify the role of English language for them, outline the technique and methods of organizing the teaching process, look into innovative technologies of teaching including teaching through online resources as well as in the real classrooms.

In accordance with this goal the following issues are considered: the dependence of the learning success on creativity of teachers and motivation of students, innovative methods of teaching, the right choice of the strategy, materials and activities for successful acquisition of foreign language skills and competences and achieving overall language success.

Factors facilitating success of engineering students at English classes

The social nature of language as a means of communication dictates the need to learn a foreign language as a specially organized communication, taking into account the principles of its optimization. As foreign language communication becomes an essential component of the future professional activity of the specialist, a significant emphasis should be placed on the selection of content, methods, techniques, organizational forms of rational combination of teaching material and independent student learning, preparation of differentiated, professionally oriented sets of exercises. An important point in teaching foreign languages is the creation of pedagogical conditions for the intensification of educational and cognitive activities of students and the productive implementation of technologies in the process of acquiring knowledge.

The purpose of teaching foreign languages in non-language universities is to achieve a suffi-

cient level for their practical use in future professional activities. Training specialists means formation and development of such communication skills that would allow to make professional contacts in a foreign language in various fields of activity and unforeseen situations. Thus, professional competence largely depends on the communicative competence of the specialist.

For engineering students, knowledge of a foreign language, including English, is important for both education and career advancement. The analysis of questioning about English for the future career is in the diagram, Fig. 1.

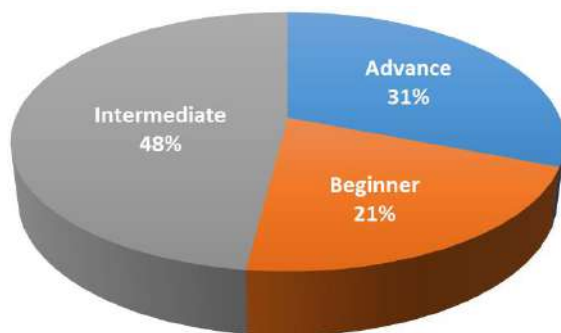


Fig. 1. The English proficiency level for student's career

It shows that the advanced level is not necessary while the beginner's level is still not enough.

Engineering is one of the largest industries knowledge, so many research and academic papers are presented in English. Without sufficient knowledge of English, it is difficult to understand the basic ideas and concepts of foreign authors. Besides, one of the main motivation to master a foreign language is student social life, which provides prospects for the development of close partnerships with peers and receiving grants to study outside their home country. Acquired communication skills are the key to success in the world of growing globalization, where the English language plays a dominant role. In addition, quality training offered by foreign partners provides a significant competitive factor in the labor market, as the need for highly qualified specialists in engineering is constantly growing. The globalization of the English language in modern society provides opportunities for the implementation of international projects, intercultural communication and cooperation at a high professional level. The survey shows the following picture of English language usage, Fig. 2.

Knowing at a decent level English grammar and having a large vocabulary on stand-by, students are still often unable to overcome the language barrier and express their thoughts freely.

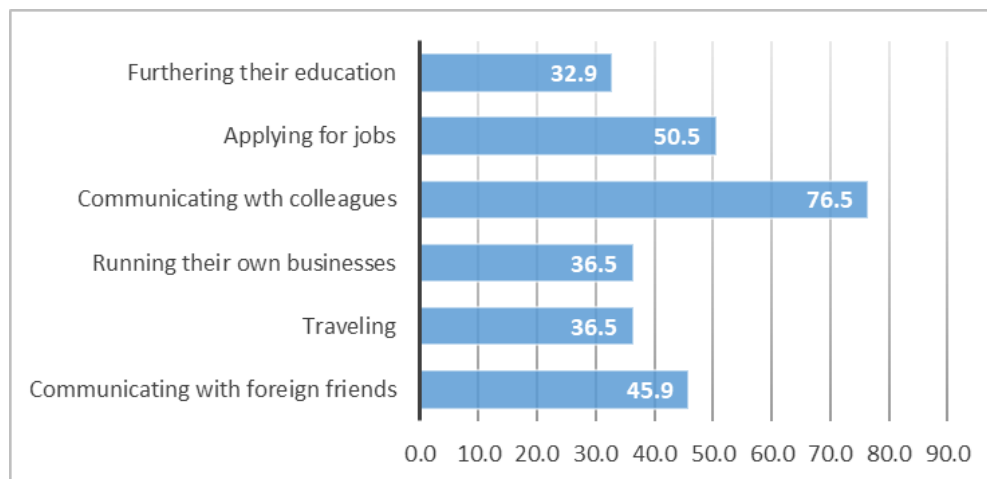


Fig. 2. Percentage of students using English for various purposes

Knowing at a decent level English grammar and having a large vocabulary on stand-by, students are still often unable to overcome the language barrier and express their thoughts freely.

Learning the language of the specialty requires mastering a large number of terms and special concepts needed by the future specialist. A non-language student must be a specialist who

has a sufficient level of communicative competence in a particular field of activity, but the number of classroom hours does not always allow the teacher to achieve the desired result. According to the working curricula, students are given many hours to work independently, which, given the specifics of the subject, is not quite effective as is not usually done properly

and honestly. So teamwork is needed - in a group, in a team, in pairs. It is clear that you can learn to express your thoughts competently in the process of live communication, when you see that you are understood, when you can react instantly and explain everything you are asked. The three reasons which reduce the emotional and value motives for learning a foreign language are low communication skills of the student, poorly developed foreign language course in the specialty, incorrectly selected method. According to Littlewood [11], the active involvement of learners in the learning process depends on such components as the favorable conditions for learning and communication and the subject of discussion which should meet the interests and needs of students, be relevant to here and now. Close cooperation between teachers and students, teamwork training is the key to success in learning the language of the specialty and significantly increases the internal motives, which is manifested in improving oral and written skills [8]. Types of lexical and grammatical exercises, taking into account specific terminology, significantly expand the active lexical minimum and passive professional jargon. As professional communication is currently one of the main requirements of the employer to a young specialist in engineering, and emotional intelligence plays an important role in strengthening communication skills, self-awareness and self-regulation should already be formed in students during training [12].

Language teachers teaching ESP are confronted with a series of professional challenges surpassing the regular requirements of a general language teacher. It is rather difficult to find a standardized ESP textbook which should fit perfectly the linguistic needs of a specific group of students and the complexities of designing proper activities to practice all language skills.

All components of education including teachers face a new reality when the focus shifts from the traditional informative purposes which are becoming more and more outdated due to the fast digital connectivity of the modern world and the availability of information, towards a more skill-based and attitude-based approach in order to fit this new reality.

This context has made English teachers reconsider their position and the specifics of their activity in the classroom. By resorting to creative methodologies, they may create and successfully implement activities which compensate for the lack of standard resources while

providing a motivating learning environment. At the same time, a creative approach to teaching ESP brings about the conditions which allow students to develop their personal and professional skills and manifest them openly. ESP teachers' creativity may be the best solution to overcome the complexity of teaching a specialized form of linguistic discourse and that of creating the conditions fostering student communication skills and attitude formation. Creativity as a motivating factor can be implemented in the curriculum, the materials, the choice of activities and teaching methods, the assessment techniques.

The significant changes in the way all education is given require that rather than focusing on informative purposes, which are very easily achieved by a millennial who is very well aware of many ways to find the information online, ESP teachers should switch to a more holistic approach. To do this, they should find and apply creative, innovative ideas in their teaching routine, with a double benefit. On the one hand, creative teaching strategies foster motivation, which is a catalyst of learning. The use of innovative teaching strategies has been a hot topic since the last decade. Many studies consider creativity as a personal trait and intellectual ability of different individuals, associating creativity with genius and intelligence or with knowledge. Tomorrow's professionals are required to be flexible, critical and creative thinkers rather than patterned ones. In this perspective, the concept of teaching is integrated with creativity and innovation.

When considering creativity in ESP, but also in the entire educational field, the distinction between creative learning and innovative teaching is worth mentioning. The former can be defined as any learning which involves understanding and new awareness and focuses on thinking skills. Innovative teaching is the process leading to creative learning, the implementation of new methods, tools and contents which could benefit learners and their creative potential.

If we wanted to sum up the main ingredients of creative ESP teaching, perhaps M. Michalko would give a possible answer. According to him, creative teachers look at "what possibilities there are" and "what can be done with the present resources" instead of "what is not possible". "Instead of excluding possibilities, creators include all possibilities, both real and imagined" [13]. Also, a creative teaching process is charac-

terized by imaginative, dynamic, and innovative approaches [3].

According to Dana Rus, applied to the specific case of ESP, the features above would include the following methodological possibilities: syllabus construction following needs analysis and benchmark analysis; cohesive, consistent, integrated-skill lessons centered around language functions; a predominance of communicative activities; the consistent use of technologies in all phases of the teaching process; technical vocabulary, which should only be taught in a communicative context; grammar, which should only serve as a means to a communicative end; use of varied patterns of interaction with a focus on collaborative tasks (group work, pair work); interesting, alternative, project-based types of assessment; intensive use of authentic materials from the students' field of study; the extrapolation of specialized texts/topics to general communication subjects; constant attention paid to personal development skills (e.g. oral presentation skills); contact with representatives from relevant industry to make students familiar with real job-related topics (invited speakers, roundtables, workshops, visits, video conferences etc.); the use of direct test items to make assessment as similar as possible with real-life situations in professional backgrounds (e.g. interviews, presentations, writing technical reports, following oral directions to complete a task, labeling diagrams/charts, writing technical documentation, writing blog entries, filming videos etc.) [13].

Enhancing creativity and motivation of engineering students at English classes

The concept of creativity is quite complex and diverse, and its aspects are usually studied and analyzed from different points of view. This is one of the reasons why there is no generally accepted definition of creativity, and therefore we should always consider from what point of view we define this concept.

A creative approach to teaching a foreign language is to present creativity as one of the many natural skills and talents that everyone has. This approach is based on the idea that everyone can use their hidden potential to be creative under certain conditions, and that students have different forms and levels of creativity. The teacher's task is to stimulate their creative potential in the learning process. Foreign language teachers have the opportunity to take ad-

vantage of the following methodological advantages in order to stimulate students' creativity.

First, language is creative in nature. We can express or convey an idea in different ways. In addition, any expressed idea can cause many different reactions and emotions. Any sentence, phrase or word that we say or write is formed in a unique moment of communication, they can be created, formulated or paraphrased depending on the goals of the author.

Secondly, during foreign language classes, the teacher, in addition to the subject, can touch on the topics of philosophy, management, jurisprudence, focusing on language priorities. Under such circumstances, a creative atmosphere is created when students and teachers have the opportunity to share their individual experiences, their own knowledge and skills.

Third, students can also be easily involved in creative situations in which they have to find one or more answers to a number of interrelated problems. They do not know how to solve the problem, they may not be sure how many solutions the problem has - one, several or it can not be solved at all. Students are not offered simple situations with clear decisions won-lost or right-wrong. Most likely, they will encounter difficult situations with unclear or plausible solutions. Because language use is a form of communication that can be used in almost any situation, situations which are close to reality can be created much more easily than when teaching other subjects.

As a result, it should be noted that the use of creative methods in teaching a foreign language promotes the acquisition of foreign language material. It demonstrates to students all the versatility and complexity of the structure of language, improves the skills of its application in real life situations in a favorable and dynamic environment.

For all kinds of communication language learning is stimulating and provoking debates and discussion. Classes can be organized as a regular discussion of events or topics, as well as a game of debate. This will help students to deeply understand the topic and prepare for the speech so that they can quickly and easily express their opinion, which will help them to speak freely in real life. Besides, when they further use social network in communication on the topics, it will prove effective in ESP teaching and can improve students' ESP proficiency and enhance their motivation for studying [14].

Using “real grammar” is crucial. Grammar is too often associated with rules and exercises where students work in uncreative situations and their answers are either correct or not. In other words, they succeed or fail. Some creative exercises can provide a motivation for students to learn grammar creatively.

For example, a certain grammatical topic is considered during the class. It is a good practice to give real examples from movies or songs and a homework to look for the examples and make a list of them would be a good motivation. This activity stimulates creativity and critical thinking, as students need to choose films or videos that could theoretically contain these grammatical constructions. There are also no right or wrong solutions in this exercise, because even those who do not find examples but show a list of materials they have worked with will be successful. The reason for everyone's success is the fact that it forces students to spend time thinking and focusing on the specific grammatical structure in the films they watch, in the music they listen to, and ultimately in real life.

Introducing students to an interesting topic that will make them think is a good idea. All project-based lessons are based on solving a major issue or problem. Ideally, these questions / problems are asked by students. In order for students to think, we need to provide them with some ambiguous and interesting information. This can happen organically or intentionally. The teaching-learning process has to adapt to changing learning contexts. Technology provides a learner independent in language learning. Thus, technology enables the learner's efforts easier and faster [15]. A book, a tour (even a virtual one) or an article according to the interests of the students are all great ways to make students think. When developing a topic and question, we should remember that Google does not need to know the answers! If Google can respond instantly, that's certainly not enough to conduct meaningful research. The problem should be such that only in the process of studying and collecting information it could be solved and the individual point of view is critical for the result of the research. We can help the students by identifying some critical questions once the topic is chosen. We should not forget that the students of engineering specialties are mostly not used to “many-words” discussions, and here our task is not only the answer but the real debate, the reason and consequences of the decisions on the topic are important. For example –

Your district is very dirty and not green at all. Which must come first – planting trees or sorting garbage? The topic must be studied, not only the question answered. This is the main point of the project.

Conducting your own research on the topic and supervising students in their search is another way. Students will need additional support during the research phase. We can help a little by doing some research for them and narrowing the search to a few articles of the appropriate level. During the research phase, we will be a guide for students, as well as pay close attention to how well students are oriented for educational purposes.

For some projects, this may only include a presentation. Nevertheless, all students should be able to present their results to the audience. This gives students a real practice of speaking and answering questions, as well as forcing them to critically evaluate the work they have done.

Considering and including the professional topics in discussions and debates is one more way to integrate ESP and EFL during the English classes. The topics can be many as the range of engineering and foreign language overlapping is endless.

We depend on the student's success during the classes. We feel great if it was lively and interesting. We usually feel that everything went well because we saw that the students were involved and motivated. A teacher-oriented couple ceases to be an interaction and becomes a lecture, which is not usually expected in language learning. Therefore, the teacher needs to create more situations in which students can contribute, initiate, control and create. With this in mind, we can also become partners in the learning process, and realize that we can also learn a lot from students and can be impressed with what they managed to do.

Conclusion

This paper provides a brief theoretical substantiation and a working definition for creativity and motivation in teaching English for Specific Purposes and English as a Foreign language. It also explores the role and function of creativity in the context of the changing paradigm regarding the overall scope of the educational system in general and of the language learning in particular. Finally, it analyses the role and potential of creative methods and active strategies in fostering

better language acquisition during English classes. Creative methods mark a next level in modernizing the teaching strategies so that the full potential of a student's abilities can be activated and the desire for independence and originality, for competition, for searching novelty and working better in the language classes are encouraged to the students' and teachers' best satisfaction.

Acknowledgement

This work was conducted under the Scientific research "Acute problems of methodology for teaching foreign languages, communicative linguistics and theory of translation", UDC 378.147+81`243+81`25, funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

References

- Latha, K. (2014). American International Journal of Research in Humanities, Arts and Social Sciences, 7(2), June-August, pp. 122–123.
- Dudley-Evans, T. (2001). English for Specific Purposes, in R. Carter and D. Nunan (eds), Teaching English to Speakers of Other Languages, Cambridge, Cambridge University Press. 131–136.
- Jeffrey, B., Craft, A. (2004) Teaching creatively and teaching for creativity: distinctions and relationships. Educational Studies, 30 (1). 77–87.
- Molnár, G. and Szűts, Z. (2014). Advanced mobile communication and media devices and applications in the base of higher education. IEEE 12th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY), 169–174.
- Gu, H., Bo, H. and Ren, L. (2019) Developing ESP Teaching Materials Based on the Analysis of Information Engineering Majors' Needs. Open Journal of Social Sciences, 7, 121–131.
- Ning, H, Hornby, G (2014) The impact of cooperative learning on tertiary EFL learners' motivation. Educational Review 66(1): 108–24.
- Zhang, X., Ardasheva, Y., & Austin, B. W. (2020). Self-efficacy and English public speaking performance: A mixed method approach. English for Specific Purposes, 59, 1–16.
- Keane, A. (1999). Communication trends in engineering firms: implications for undergraduate engineering courses. I.S. Gibson. International J. of Engng. Educ. 15, 2, 115–121.
- Білан Н. (2012). Комунікативний метод навчання іноземних мов студентів немовних ВНЗ. Молодь і ринок. 5. 149–153. Bilan N. (2012). Komunikatyvnyi metod navchannia inozemnyh mov ytvjdyb[VNZ. [Communicative method of teaching foreign language to students of non-language higher schools]. Molod I rynok. No.5. pp. 149–153. [in Ukrainian].
- Гончаренко Т. (2010). Мотивація вивчення іноземної мови як соціальна функція освіти. Теорія і практика управління соціальними системами: філософія, психологія, педагогіка, соціологія. 4. 47–55. Honcharenko T. (2010). Motyvatsiia vyvchennia inozemnoi movy iak sotsialna funktsiia osvity. [Motivation of learning foreign language as a social function of education]. Teoriiia i practyka upravlinnia sotsialnymy systemamy: filosofiiia, psykholohiia, pedahohika, sotsiolohiia. 4. 47–55. [in Ukrainian].
- Littlewood, W. (1992). Teaching Oral Communication: a Methodological Framework. William Littlewood. Oxford: Blackwell. 108 p.
- Goleman, D. (1998). Working with Emotional Intelligence/Daniel Goleman. – London: Bloomsbury Publishing, 385 p.
- Michalko, M. (2006). Thinkertoys Second edition, Berkeley: Ten Speed Press, p. 14.
- Saienko, N., Semyda, O., & Akhmad, I. (2020). Using social networks in teaching ESP to engineering students. Advanced Education, 7 (14), 38–45.
- Pratibha, M. (2019). Language Learning and Teaching Using New Technologies. IRA International Journal of Education and Multidisciplinary Studies, 14 (1), 14–20.

Svitlana Ponikarovska¹, Asst. Prof. Department of foreign languages, e-mail: ponikarovska@gmail.com, tel.: +38067-782-52-50, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9432-402X>

¹Kharkiv National Automobile and Highway University Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

Особливості практики викладання англійської мови студентам електротехнічної спеціальності

Анотація. Проблема. Зважаючи на те, що електротехніка та електромеханіка є величезною областю знань у світі, а англійська мова є визнаною мовою міжнародного спілкування, знання англійської мови є обов'язковим. Крім того, ми живемо у цифровому віці, а англійська мова є єдиною мовою в останніх версіях додатків, інструкцій та програмного забезпечення. Навчання для студентів-інженерів не англійськомовних країн дуже важливо не тільки для їх навчального життя, а й для перспективної кар'єри, мобільності та успішного спілкування. **Мета.** Метою роботи є визначення

особливостей викладання англійської мови для студентів інженерних спеціальностей, окреслення техніки та методики організації навчального процесу, аналіз інноваційних технологій навчання. **Методологія.** Методологія ґрунтується на аналізі існуючих методів навчання, яких багато, порівнянні класичних та інноваційних методів, аналізі стратегії різних методів. У статті підкреслюється важливість креативного підходу до навчання як ключа до успіху. **Результати.** У роботі надається коротке теоретичне обґрунтування та робоче визначення творчості та мотивації у викладанні англійської мови для конкретних цілей та англійської мови як іноземної мови. У роботі також досліджується роль творчості в контексті змінної парадигми щодо загальної сфери освітньої системи в цілому та вивчення мови зокрема. **Оригінальність.** У статті пропонується поєднання творчих методів та активних стратегій у створенні кращих умов оволодіння мовою під час занять з англійської мови. Коли ми бачимо, що студенти залучені та мотивовані, це означає, що стратегія працює. Метод, орієнтований на викладача, наразі не

вітається у вивченні мови, актуальним є спроба зробити навчання орієнтованим на студента. **Практичне значення.** Стаття містить деякі практичні поради щодо того, як викладач може створити більше ситуацій, в яких студенти можуть сприяти, ініціювати, контролювати та створювати. Успіх навчання залежить від творчості викладачів та мотивації студентів, це дозволяє знайти нові інноваційні методи викладання в належному поєднанні з теорією мови.

Ключові слова: творчість, студенти інженерних спеціальностей, комунікативний, компетенція, успіх навчання.

Понікаровська Світлана Володимирівна¹, старший викладач кафедри іноземних мов, e-mail: ponikarovska@gmail.com, tel.: +38067-782-52-50, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9432-402X>

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