



ISSN 1681-4886 (Print)
ISSN 2413-3833 (Online)

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
**ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ**

№2 2023 р.

2 (153)' 2023

ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ

Виходить 4 рази на рік

Видається з 23 квітня 1996 р.

INFORMACIJNO-KERUJUCHI
SYSTEMY NA ZALIZNYCHNOMU
TRANSPORTI

Зміст – Содержание – Contents

Видання

Українського державного
університету залізничного
транспорту



Панченко В. В., Харін Р. О.

Моделювання та техніко-економічний розрахунок
роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції
.....3

Трубчанінова К. А., Черкашин Є. А.

Система «розумного» освітлення
..... 14

Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А.,
Філіп'єва М. В., Багач Р. В.

Підвищення точності моделювання перехідних
процесів і розрахунку втрат потужності
напівпровідникових перетворювачів у програмному
середовищі NI Multisim
.....22

Приходько С. І., Єлізаренко А. О.

Особливості спільної роботи радіостанцій з різним
частотним рознесенням каналів36

Крашенінін О. С., Яковлев С. С., Залата А.С., Головко Я. О. Оцінювання факторів, що забезпечують надійність роботи системи локомотива	43
Філь Н. Ю., Дейнеко Ж. В. Вибір програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислових об'єктів	50
Панченко С. В., Бунчуков О. А., Кустов В. Ф., Сотник В. О. Удосконалення якості оцінювання функційної безпечності систем залізничної автоматики за наявності кратних небезпечних відмов у каналах резервування	55
Vadym Liashenko, Serhii Yatsko, Yaroslav Vaschenko, Mykola Khvorost Simulation of the system of provision of target braking of rolling stock	63
Denis Lomotko, Denis Kovalov Improvement of the logistics of container transportation at border stations and terminals	74
Берестов І. В., Колісник А. В., Пестременко-Скрипка О. С., Богачук Д. П. Обґрунтування доцільності транспортування соняшникової олії з використанням флексітанків в системі інтермодальних перевезень	81

ПАНЧЕНКО В. В., к.т.н.,

ХАРІН Р. О., аспірант

(Український державний університет залізничного транспорту)

Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції

У статті розраховано щорічну генерацію та щорічні втрати з різними типами трекерів у сонячній електростанції. Проведено порівняльний аналіз доцільного використання трекерів на сонячній електростанції. За експериментальними даними на основі програмного комплексу PVsyst виміряно енергію, що передається до мережі в різних варіантах кріпильних конструкцій (статичних і динамічних). Отримано графіки генерації та втрат у трекерних системах за 25 років експлуатації.

Ключові слова: сонячна електростанція, сонячні панелі, статична система, одновісний трекер, двовісний трекер

Проблема постановки дослідження

Ураховуючи сучасні тенденції розвитку світової енергетики, а також наявний позитивний досвід АТ «Укрзалізниця» у використанні електроенергії генерованої відновлювальних джерел енергії пропонується до схеми живлення власних потреб додати сонячні електростанції як основне джерело живлення, при цьому можливості резервування власних потреб без жодних джерел, у тому числі системи зовнішнього електропостачання, зберігаються. У статті [6] розглянуто тягову підстанцію, на якій встановлено статичну сонячну електростанцію, проведено моделювання та отримано результати втрат системи. Проте впровадження трекерних систем сонячних електростанцій на тягових підстанціях не розглядалось. Запропонована концепція модернізації схеми живлення власних потреб тягової підстанції має підвищити надійність електропостачання споживачів власних потреб за рахунок інтеграції до схеми додаткового незалежного джерела живлення.

Аналіз останніх публікацій

Багато наукових досліджень присвячено моделюванню і техніко-економічним розрахункам сонячних електростанцій. Ці дослідження є досить актуальними для нашої країни. У роботі [1] розглянуто трансформацію сонячних систем на залізниці, надано методи та потенційні методи оцінювання енергозабезпечення залізниці. Також проведено економічно-екологічні аспекти. У статті [2] проведено

аналіз можливості використання сонячних трекерів у технологіях сонячної енергетики для альтернативи збільшення захоплення сонячної радіації.

Мета статті

Метою статті є моделювання та проведення техніко-економічного розрахунку роботи сонячної підстанції з різними типами трекерів.

Викладення основного матеріалу

Введення в експлуатацію сонячних станцій дуже позитивно позначиться на економії ресурсів країни, а також буде помічено поліпшення екологічної обстановки.

Існує кілька типів трекерів для сонячних панелей, що керуються різними алгоритмами вибору орієнтації в просторі і мають різні механізми спрацьовування, два основних типи систем динамічного стеження – одновісні та двовісні. На відміну від статичних систем, це може збільшити продуктивність на 35-50 % протягом року.

Переваги динамічних систем для сонячних електростанцій:

- найбільш ефективно використання сонячної енергії порівняно зі статичною;
- збільшення вироблення електроенергії до 40 % порівняно зі стаціонарними спорудами;
- значне збільшення довгострокового прибутку. Кошти, вкладені в сонячні трекери, будуть збільшені втричі до кінця періоду дії українського «зеленого тарифу».

Багаторічна практика показала, що використання трекерів на сонячних панелях працює дуже добре, збільшуючи щорічне виробництво електроенергії до 30-35 %.

Очевидно, що жорстко закріплена сонячна батарея, налаштована на полуденне сонце, виробляє найбільшу кількість енергії опівдні, коли сонячні промені падають вертикально на її поверхню. Ураховуючи особливості добової траєкторії Сонця, можна сказати, що ефективний кут повороту панелі становить близько 150° . Панель, зафіксована в напрямку, рівному середині між точками заходу та сходу сонця, втрачає до 75 % максимально можливого вироблення енергії вранці та ввечері. Тому, якщо кут падіння променів на батарею буде невеликим, кількість виробленої енергії різко зменшується. Також важливо враховувати

географічні координати розташування сонячної станції, оскільки кут оптимального розташування на півночі України буде відрізнятися від кута на півдні та сході. Водночас кожен власник хоче, щоб його сонячна електростанція виробляла однаково багато енергії як протягом усього дня, так і впродовж усього року. Досягти цих параметрів можна за допомогою трекера, який використовує інформацію від спеціальних датчиків, що визначатимуть найкраще положення для сонячних батарей і повертатимуть платформу в потрібний бік і під потрібним кутом [3].

Особливістю такої моделі фотоелектричних модулів є підвищена стійкість до впливу агресивного середовища і мінімальне падіння продуктивності. Виробник дає гарантію, що модуль буде видавати не менше 90 % номінальної потужності через 10 років і не менше 80,7 % через 25 років (рис. 1).

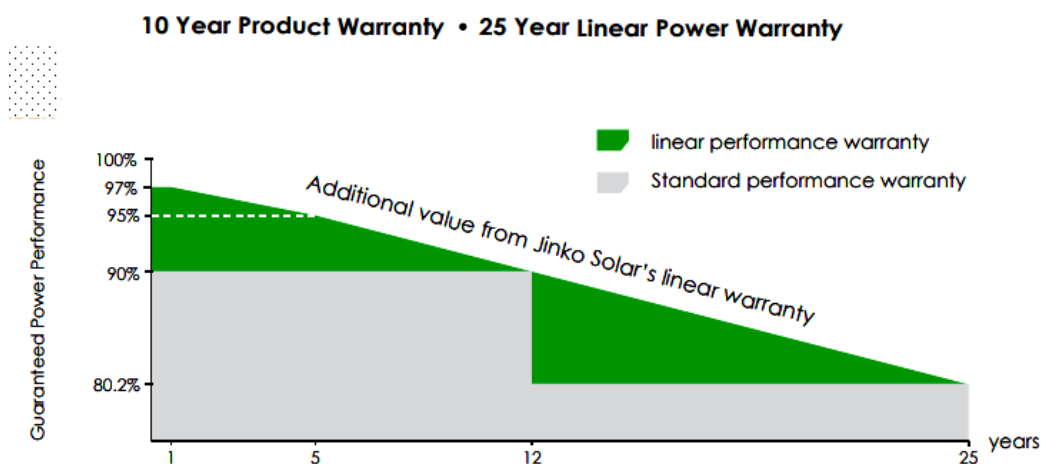


Рис.1. Лінійна гарантія продуктивності

Фотопанелі Jinko Solar Eagle PERC JKM305M-60 можуть бути використані в невеликих і великих сонячних електростанціях для генерації електроенергії в загальну мережу. Гарантія на продукцію, матеріали – 10 років. Гарантія на вироблену потужність: 25 років – не менше 80 %, 12 років – не менше 90 %.

Деградація сонячних панелей

Продуктивність сонячних модулів зменшується з часом. Як правило, деградація дещо вища в перший рік внаслідок початкового впливу світла, потім стабілізується.

Фактори, що впливають на ступінь деградації, включають такі параметри, як матеріали, що

використовуються при виробництві, технічний процес, якість збірки та пакування елементів у модулі, кваліфікація працівників на місцях. Регулярне технічне обслуговування та прибирання обладнання можуть знизити відсоток деградації, але основний вплив залежить від типу використовуваного елемента. Тому провідні виробники сонячних панелей дуже ретельно відстежують якість продукту і відповідність його міжнародним вимогам і стандартам.

На рис. 2 зображено деградацію сонячних панелей за 20 років з різними типами трекерів.

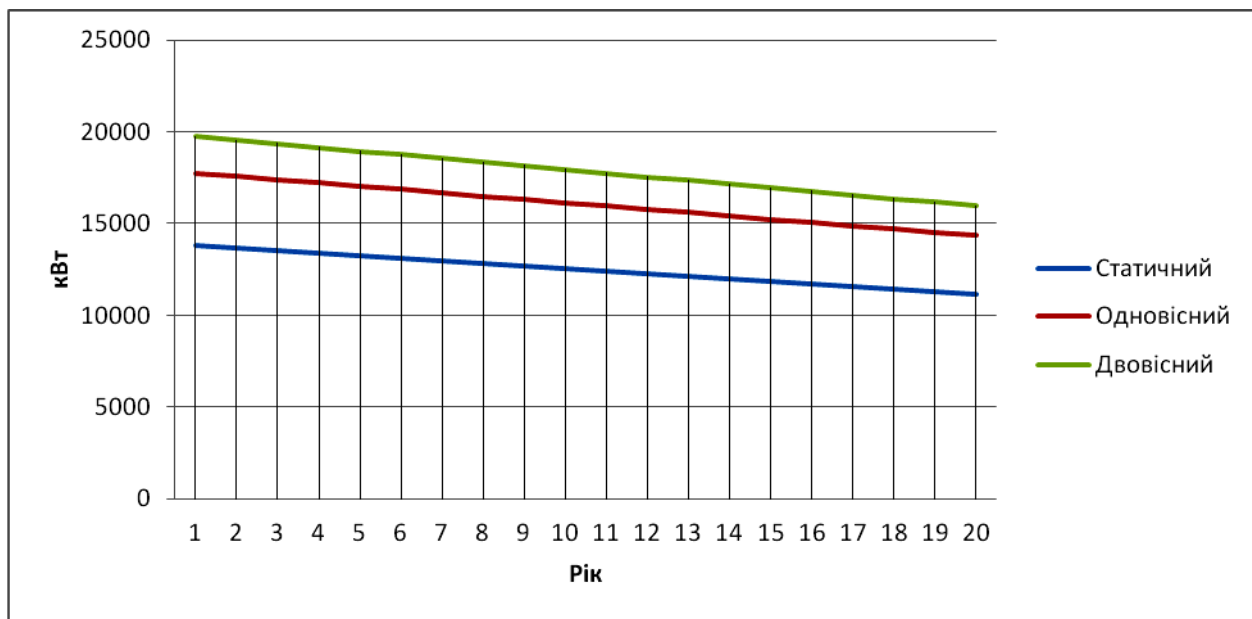


Рис. 2. Деградація сонячних панелей

Сонячні модулі можуть мати довгострокову потужність, швидкість деградації від 0,3 до 1 % на рік.

Ступінь і характер деградації варіює серед різних технологій виготовлення додатків. Для кристалічних модулів елементи можуть страждати від незворотного руйнування, викликаного дією світла. Початкова деградація відбувається через дефекти, що активно проявляють себе при початковому впливі світла [7].

З табл. 1 видно, що загальна генерація сонячних панелей сукупно за 25 років склала:

- статична система – 316680 кВт;
- одновісний трекер – 407882 кВт;
- двовісний трекер – 453770 кВт.

Загальна вироблена потужність різних типів сонячних станцій показана на рис. 3.

Таблиця 1

Щорічна генерація та втрати потужності сонячною електростанцією з різними типами трекерів

Рік експлуатації	Статичний		Одновісний		Двовісний	
	Потужність, кВт/р.	Втрати, кВт/р.	Потужність, кВт/р.	Втрати, кВт/р.	Потужність, кВт/р.	Втрати, кВт/р.
0	13920	0	17929	0	19946	0
1	13781	139	17749	180	19746	200
2	13642	278	17570	359	19547	399
3	13502	418	17391	538	19348	598
4	13363	557	17212	717	19148	798
5	13224	696	17032	897	18949	997
6	13085	835	16853	1076	18749	1197
7	12946	974	16674	1255	18550	1396
8	12806	1114	16495	1434	18350	1596

Продовження таблиці 1

9	12667	1253	16315	1614	18151	1795
10	12528	1392	16136	1793	17951	1995
11	12389	1531	15957	1972	17752	2194
12	12250	1670	15777	2152	17552	2394
13	12110	1810	15598	2331	17353	2593
14	11971	1949	15419	2510	17154	2792
15	11832	2088	15240	2689	16954	2992
16	11693	2227	15060	2869	16755	3191
17	11554	2366	14881	3048	16555	3391
18	11414	2506	14702	3227	16356	3590
19	11275	2645	14522	3407	16156	3790
20	11136	2784	14343	3586	15957	3989
21	10997	2923	14164	3765	15757	4189
22	10858	3062	13985	3944	15558	4388
23	10718	3202	13805	4124	15358	4588
24	10579	3341	13626	4303	15159	4787
25	10440	3480	13447	4482	14959	4987
Сукупна генерація Σ	316680	45240	407882	58272	453770	64826

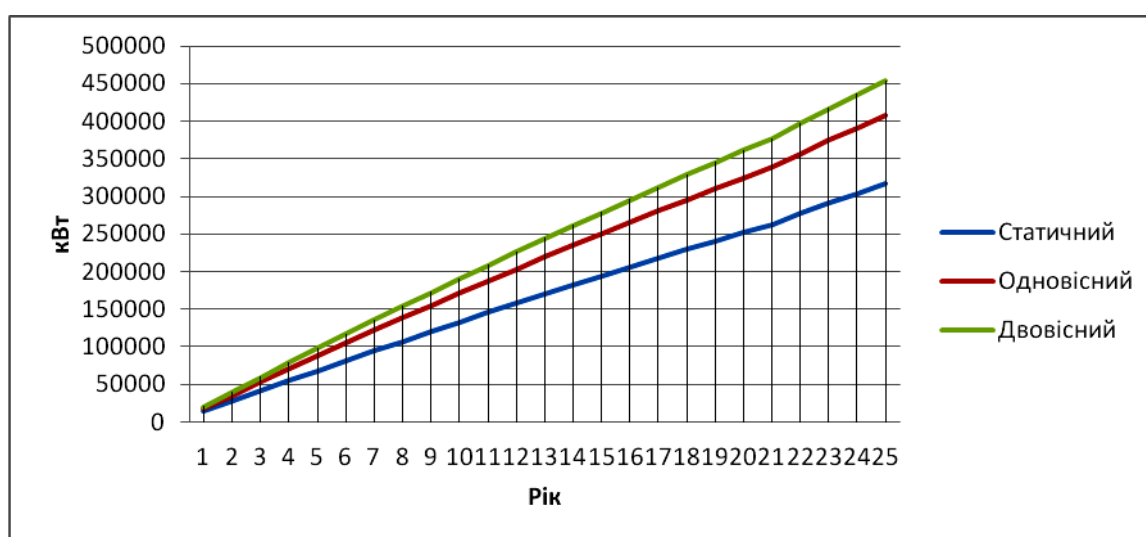


Рис. 3. Загальна вироблена потужність різних типів сонячних станцій

Для оцінювання рівня втрат були проведені математичні розрахунки та розроблена імітаційна модель об'єкта дослідження в програмному середовищі PVsyst з такими вихідними даними: обрані сонячні панелі марки Jinko Solar JKM305M60 Eagle 305 Вт, інвертори марки Ainelec K3 130-350 V/50Hz, задані кліматичні умови Харківської області та площа даху тягової підстанції [6]. Загальні втрати за рахунок

деградаційних процесів у сонячних панелях з різними типами трекерів сукупно за 25 років експлуатації склали (рис. 4):

- втрати статичної системи 45240 кВт;
- втрати одновісного трекера 58272 кВт;
- втрати двовісного трекера 64826 кВт.

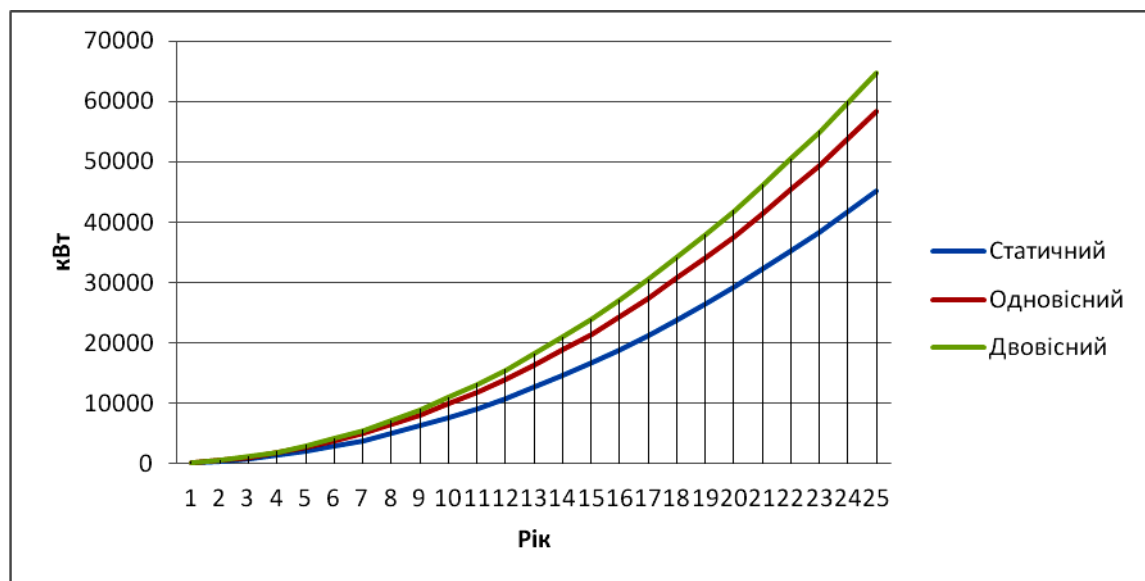


Рис. 4. Втрати потужності трекерів

Для підтвердження розрахунків були розроблені 3D-моделі сонячної електростанції. Проведене попереднє моделювання тягової підстанції (ТП), обладнаної сонячною електростанцією (СЕС) з різними типами трекерів; модель ТП максимально наближена до реального вигляду.

Статична система

Моделювання проведено з урахуванням усіх кліматичних умов Харківського регіону. На рис. 4

зображено 3D-модель тягової підстанції, на даху якої розміщено статичну систему СЕС, сонячні панелі розташовані в чотири ряди по 10 панелей загальною потужністю 12,2 кВт і займають загальну площу 65 м². Сонячні панелі встановлено з кутом нахилу 33° і направлено на схід для отримання максимальних показників виробництва енергії.

Результати моделювання наведено на рис. 5, генерація потужності статичної системи – рис. 6.

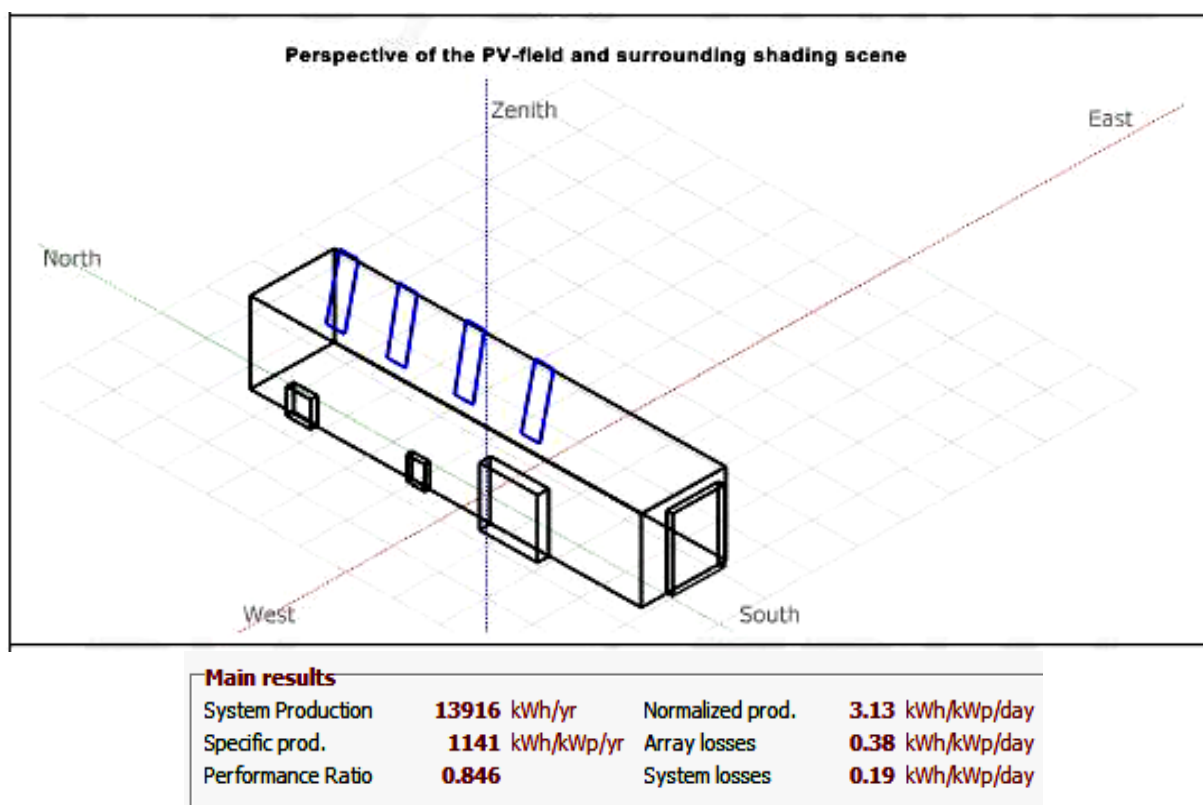


Рис. 5. Результати моделювання статичної системи

З результатів моделювання статичної системи електричної енергії за перший рік. Сумарні втрати в видно, що станція згенерувала 13916 кВт/год масиві та системні втрати складають 0,57 кВт/день.

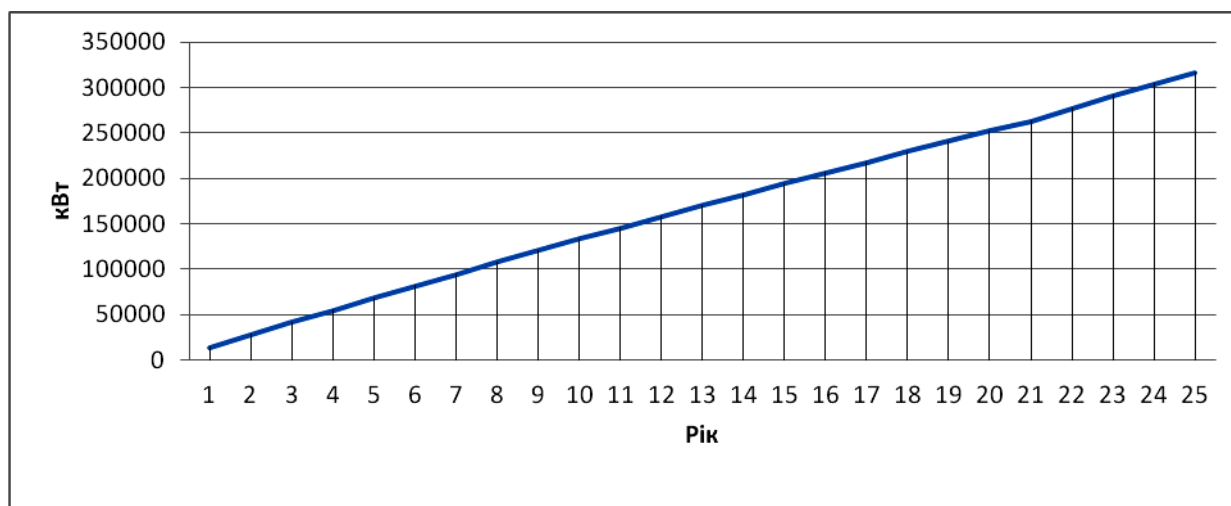


Рис. 6. Генерація потужності статичної системи

Одновісний сонячний трекер

Динамічна система кріплення призначена для горизонтальної фіксації. Цінність пристрою – протягом світлового дня він автоматично змінює положення фотомодулів залежно від траєкторії переміщення сонця в одній площині (по вертикалі).

Також така система кріплення корегує кут нахилу батарей виходячи з пори року.

Переваги одновісної трекерної системи:

- надійна стійкість до зовнішніх впливів природи: снігопаду, туману, вітрових навантажень, опадів, граду та ін. При цьому в зимовий сезон не потребує очищення від снігу;
- для встановлення конструкції не потрібно великих часових чи фізичних витрат. Ремонтні роботи також виконуються оперативно і просто;
- положення для сонячних панелей з мінімальним опором повітряним потокам;

- тривалий гарантійний період – 12 років, але експлуатаційний термін при цьому становить 25-30 років;

- рухома установка допомагає збирати на 25-40 % більше енергії, ніж статичні аналоги;

- рівномірне завантаження сонячного інвертора, зниження втрат генерації;

- встановлення на ґрунтових майданчиках з будь-яким рельєфом;

- працює повністю автоматично без втручання людини [4].

На рис. 7 зображено модель одновісного трекера, сонячні панелі розміщені так, як і на статичній системі – у чотири ряди по 10 панелей горизонтальної фіксації і змінюють положення модулів за траєкторією сонця (по вертикалі).

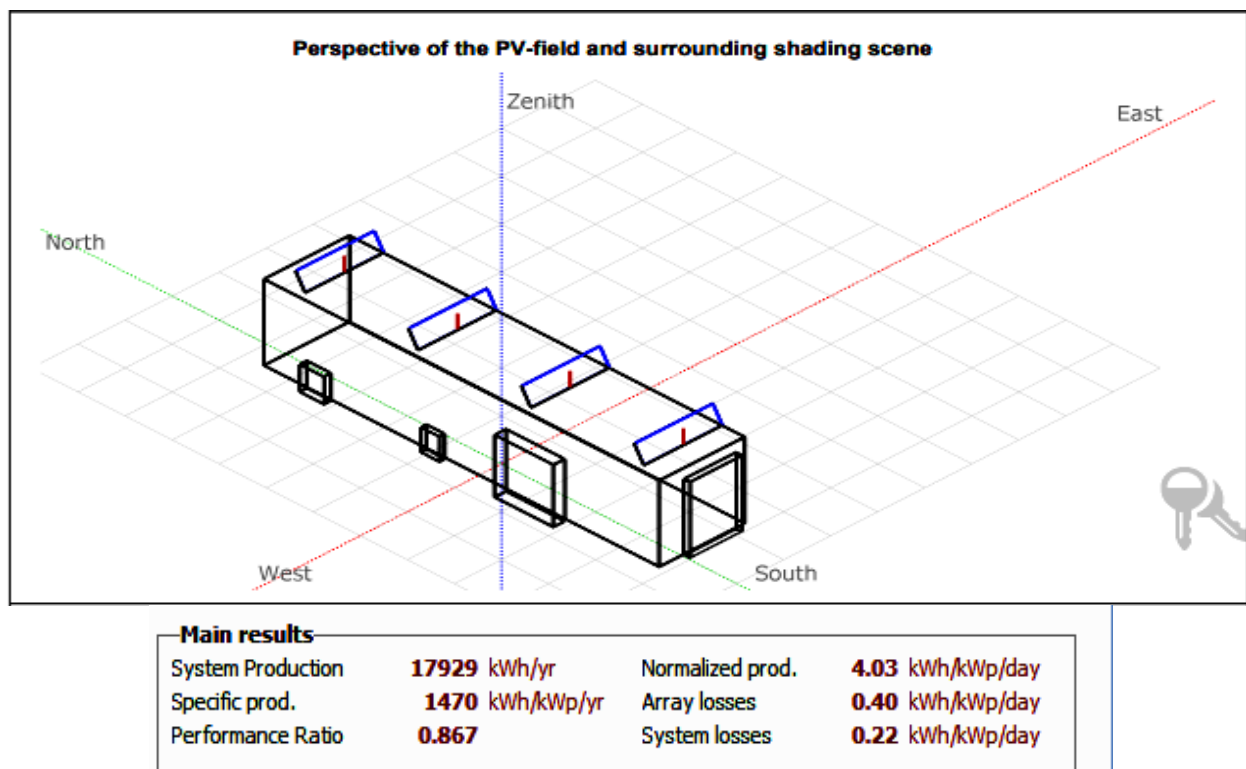


Рис. 7. Результати моделювання одновісного трекера

З результатів моделювання одновісного трекера, розміщеного на даху тягової підстанції, видно, що станція згенерувала 17929 кВт/год електричної енергії

за перший рік. Сумарні втрати в масиві та системні втрати складають 0,62 кВт/день (рис. 8).

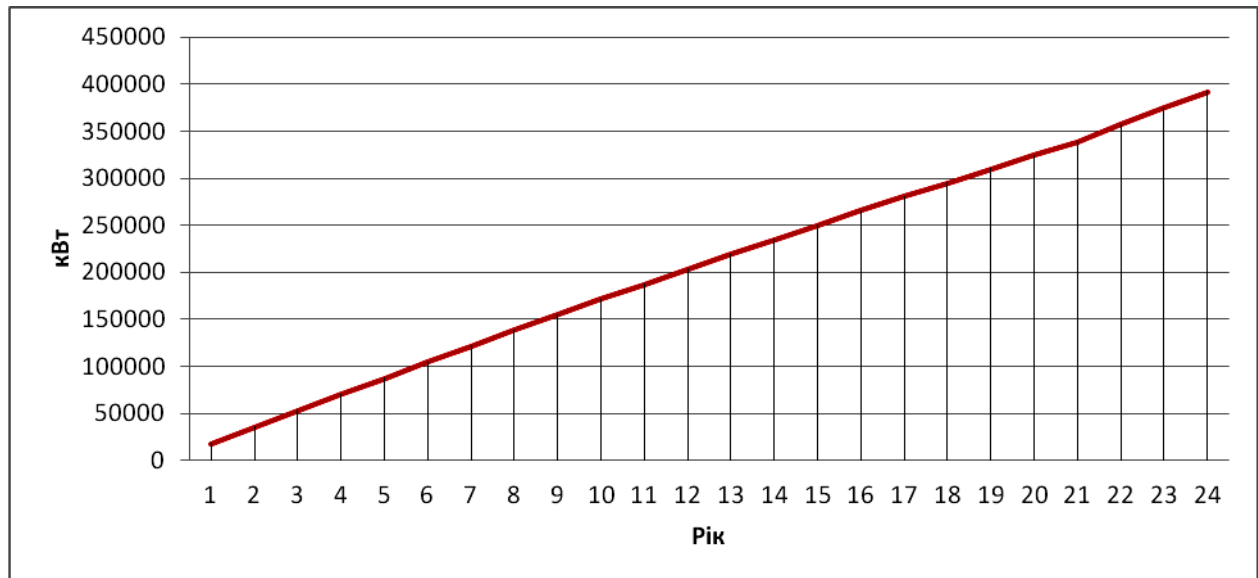


Рис. 8. Генерування потужності одновісного трекера

Двовісний сонячний трекер

Рухомі установки на двох осях для сонячних електростанцій. Це динамічна система, що відстежує переміщення сонця протягом усього світлового дня, корегує нахил панелей для максимального отримання енергії. Отже, продуктивність об'єкта альтернативної енергії порівняно з аналогічними СЕС на статичних установках збільшується до 45 %. Кріплення також регулює положення сонячних панелей залежно від сезону.

Переваги двовісної трекерної системи:

- вибирає позицію для панелей з мінімальним опором повітряного потоку;
- прийнятність встановлення каркасних і безкаркасних додатків;

- регулювання фотомодулів у двох площинах: горизонтальній, вертикальній;
- усі процеси повністю автоматизовані, тому для керування обладнанням не потрібна участь людини;
- захист від блискавок і перевантажень, наявність датчиків льоду, снігу, граду та вітру;
- збирання сонячної енергії навіть у похмурі дні;
- можливість керувати, моніторити роботу установки дистанційно [5].

На рис. 9 зображено модель двовісного трекера, сонячні панелі розміщені на чотирьох трекерах по 10 панелей (два ряди по п'ять сонячних панелей) на двох осях, система відстежує переміщення сонця і корегує панелі як по горизонталі, так і вертикалі.

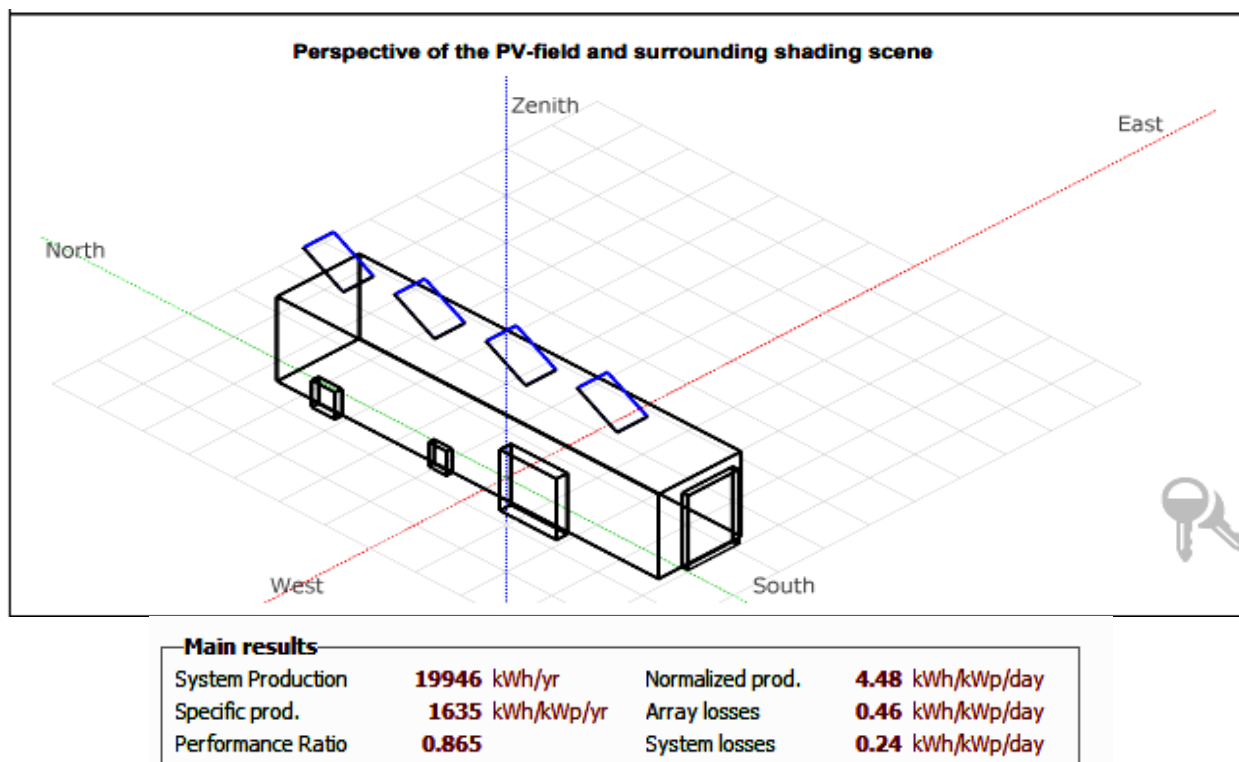


Рис. 9. Результати моделювання двовісного трекера

З результатів моделювання двовісного трекера, розміщеного на даху тягової підстанції, видно, що станція згенерувала 19946 кВт/год електричної енергії

за перший рік. Сумарні втрати в масиві та системні втрати складають 0,70 кВт/день (рис. 10).

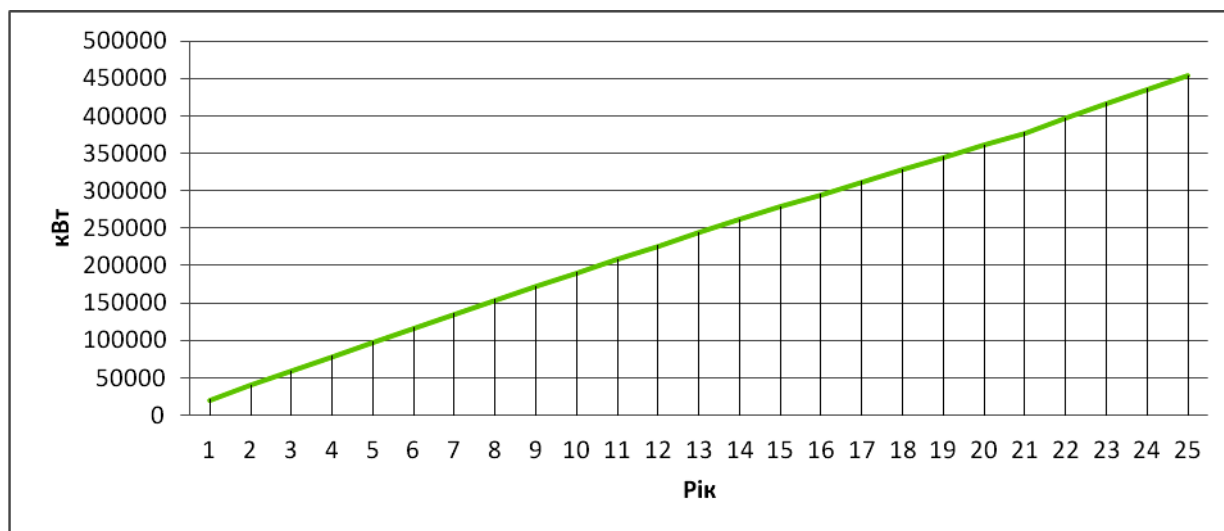


Рис. 10. Генерація потужності двовісного трекера

З табл. 2 видно, що різниця між одновісним трекером і статичною системою складає 4009 кВт за перший рік експлуатації СЕС, вартість одновісного трекера становить 88000 грн [4], а статична система не потребує додаткових затрат. Різниця між одновісним і двовісним трекерами становить 2017 кВт за перший рік експлуатації СЕС, різниця вартості цих трекерів становить 163000 грн [5]. За цими даними можна зробити висновок, що доцільніше встановлювати одновісний трекер на таку СЕС.

Таблиця 2

Порівняльні дані різних типів трекерів

	Потужність, кВт/год	Вартість, грн
Статичний	13920	0
Одновісний	17929	88,000
Двовісний	19946	251,000

Висновки

У статті розглянуто і проведено техніко-економічний розрахунок і моделювання сонячної підстанції, встановленої на тяговій підстанції, розраховано щорічну генерацію та щорічні втрати з різними типами трекерів.

За допомогою програмного комплексу PVsyst було отримано результати моделювання різних типів трекерів. Встановлено сукупну генерацію СЕС з різними типами трекерів за 25 років експлуатації, де статична система генерує 316680 кВт, одновісний трекер генерує 407882 кВт, двовісний трекер генерує 453770 кВт. З урахуванням вартості трекерних систем найбільш доцільною є станція з одновісною трекерною установкою, оскільки вона генерує на 91202 кВт більше, ніж статична система за 25 років експлуатації, але на 45888 кВт менше, ніж двовісна система за ці роки, різниця в ціні складає 163000 грн.

За рахунок техніко-економічного розрахунку отримано графіки генерації та втрат у трекерних системах за 25 років експлуатації.

Список використаних джерел

1. The Potential of Photovoltaics to Power the Railway System in China / Li Ji, Zhenwei Yu, Jing Ma, Limin Jia, Fuwei Ning. *Energies*. 2020. 13(15). 3844. URL: <https://doi.org/10.3390/en13153844>.
2. Indexes for the evaluation of a Solar Tracker / Carlos R. Batista-Rodríguez, Rosa I. Urquiza-Salgado, Elio R. Hidalgo-Batista *Ingeniería y Desarrollo*. 2018. Vol. 36. №. 1. P. 172-186. URL: <https://doi.org/10.14482/inde.36.1.10945>.
3. Збільшення продуктивності сонячних панелей. URL: https://solarsystem.com.ua/ru/_zbilshennya-produktyvnosti-sonyachnyh-panelej-sonyachnyj-treker/.

4. Трекер слежения за солнцем одноосевой. URL: https://www.solarstrategia.com/_oborudovanie/treker-slezheniya-za-solntsem/the-power-10p-single-60/.
5. Трекер слежения за солнцем двухосевой. URL: https://www.solarstrategia.com/_oborudovanie/treker-slezheniya-za-solntsem/dvukhosnyy-treker/the-power-10p-60/.
6. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження втрат енергії в сонячній електростанції на тяговій підстанції. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 196. С. 149-160. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242262>.
7. Дюсьмикеев А. Б. Учебная программа по подготовке и переподготовке специалистов в области солнечной энергетики. Минск, 2016.

Panchenko Vladyslav, Kharin Ruslan. Modeling and technical and economic calculations of the solar power plant work at the traction substation.

Abstract. In this study, the task of modeling and making technical and economic calculations of the work of the solar substation with different types of trackers was set.

Commissioning the solar power plants will have a very positive effect on saving the country's resources, as well as improving the environmental situation. Trackers for solar panels come in several types, are controlled by different algorithms when choosing the direction of spatial orientation and have different drive mechanisms.

There are two main types of dynamic tracking systems - uniaxial and biaxial.

Practice has long shown excellent results in the use of trackers for solar panels with the maximum increase in annual electricity production by 30 - 35%.

The efficiency of solar modules decreases over time. As a rule, degradation is slightly higher in the first year due to the initial exposure to light, then it stabilizes.

Factors influencing the degree of degradation include parameters such as materials used in production, technical process, quality of assembly and packaging of the elements in the module, as well as the qualifications of field workers.

The proposed concept of modernization of the traction substation's own power supply scheme should increase the reliability of electricity supply to consumers' own needs by integrating an additional independent power supply into the scheme.

To assess the level of losses, mathematical calculations were performed and a simulation model of the object of study was developed in the PVsyst software environment with the following initial data: selected Jinko Solar JKM305M60 Eagle 305 W solar panels, Ainelec K3 130-350 V / 50Hz inverters, climate conditions of Kharkiv region and the area of the traction substation roof.

To confirm the calculations, 3D models of solar power plant systems were developed.

The results of the static system modeling show that the station generated 13,916 kW / h of electricity in the first year.

The results of the uniaxial tracker modeling, which is located on the roof of the traction substation, show that the station generated 17929 kW / h of electricity in the first year.

The results of the biaxial tracker modeling, which is located on the roof of the traction substation, show that the station generated 19946 kW / h of electricity for the first year.

Conclusions. In the article the technical and economic calculation and modeling of the solar substation installed on the traction substation are reviewed and carried out, the annual generation and annual losses with different types of trackers are calculated. The results of modeling different types of trackers were obtained with the help of PVsyst software. The total generation of the solar power plant with different types of trackers during 25 years of operation was determined, where the static system generates 316,680 kW, uniaxial tracker generates 407,882 kW, biaxial tracker generates 453,770 kW. Taking into account the cost of tracker systems, a uniaxial tracker station installation is the most expedient, as it generates 91,202 kW more than a static system during 25 years of operation, but 45,888 kW less than a biaxial system during the same time, the price difference is 163,000 UAH.

On account of the technical and economic calculation, graphs of generation and losses in tracker systems for 25 years of operation were obtained.

Keywords: solar power plant, solar panels, static system, uniaxial tracker, biaxial tracker.

Надійшла 14.03.2023 р.

Панченко Владислав Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>.

E-mail: panchenko_vv@krt.edu.ua.

Харін Руслан Олександрович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0747-209X>.

E-mail: kharinruslan07@gmail.com.

Panchenko Vladyslav, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>.

E-mail: panchenko_vv@krt.edu.ua.

Kharin Ruslan, postgraduate student, department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0747-209X>.

E-mail: kharinruslan07@gmail.com.

ТРУБЧАНИНОВА К. А., д-р техн. наук, професор

ЧЕРКАШИН Є. А., магістрант

(Український державний університет залізничного транспорту)

Система «розумного» освітлення

Проведено аналіз навколишнього середовища, що впливає на освітлення приміщень, визначено оптимальні показники для користувач та основні етапи створення системи «розумне» освітлення в будинку. Показано, що побудову схеми освітлення слід починати з порівняння запропонованих варіантів комплектуючих, що входять до системи та мають характеристики, задані початковими умовами. Рекомендовано розрахувати складову проекту шляхом побудови дерева рішень. Проведено розрахунок бінарного дерева рішень і визначено, що дерево рішень будуватиметься після розрахунку інформаційної ентропії.

Ключові слова: інформаційна ентропія, «розумний» будинок, «розумне» освітлення, бінарне дерево рішень.

Вступ

З кожним днем смарт-технології стають усе більш зручними для використання і при цьому дешевшають. Так що нема нічого дивного в тому, що з рідкісного явища смарт-пристрої перетворилися в практично повсякденні речі. Це дає змогу створити систему «розумного» освітлення в кожному домі, але вимагає точного розрахування системи, для того щоб уникнути неприємних наслідків.

Постановка проблеми, аналіз досліджень і публікацій

Система «розумного» освітлення в «розумному» будинку передбачає економічність електроенергії та розподіл будинку на зони, що дозволяє продовжити строк служби ламп, і повне керування кімнатами як автоматично, так і в ручному режимі.

Формування системи «розумне» освітлення передбачає аналіз функцій, виконуваних такою системою. Для цього потрібно виявити бажані функції системи для користувачів будинку, побудувати модель нечіткої когнітивної карти в онлайн середовищі Mental Modeler [1] і створити дерево рішень за допомогою онлайн середовища Silver Decisions [2].

Системи автоматизації освітлення з'явилися ще наприкінці XX століття, але появу «розумного» освітлення можна приурочити лише до активного використання LED-ламп [3]. З початком оснащення джерел світла модулями зв'язку почалася взаємодія користувача з IoT технікою, що розширює можливості першого. Просто налаштування яскравості і кольору, і тим самим акцентувати увагу на певному об'єкті, відкриває можливості для мистецтва, безпеки і функціональності в повсякденних завданнях. За смарт-функціями розумні світильники поділяються на три типи.

Перший – пристрої, якими не можна керувати зі смартфона або планшета. Такі пристрої комплектуються пультом керування, встановлюваним у кімнаті або поруч з місцем освітлення. Також такими пристроями можна керувати з головного пульта керування «розумним» будинком, але підключити їх безпосередньо до смартфона або планшета для отримання розширеного набору можливостей не вдасться. Якщо в будинку є «розумний» пульт або смарт-система, то можна робити все те саме, що з пульта керування пристроєм, а крім того, використовувати схеми і сценарії роботи, для того щоб світильник спрацював за сигналом датчика або подією [4].

Другий тип пристроїв теж залежить від датчиків системного будинку, але в них вже є Wi-Fi або ZigBee, за допомогою яких можна керувати пристроєм зі смартфона [4].

Третій – самостійні повнофункціональні девайси, яким не потрібен для роботи жоден керуючий гаджет. Ви можете підв'язувати їх безпосередньо до смартфона через мережі Wi-Fi або ZigBee, щоб потім керувати роботою світильника навіть поза межами будинку. У них вже є вбудовані датчики руху і освітлення, за якими вони можуть вмикатися, наприклад, якщо в кімнату заходить людина або світло з вікна стає занадто слабким, лампа вмикається автоматично [4]. Використання датчиків освітленості в системі освітлення дає можливість реалізувати функцію «розумного» освітлення, що самостійно вмикає і вимикає освітлення тоді, коли це потрібно. Додавши датчики руху та інфрачервоні датчики відстані, світло почне вмикатися при появі або знаходженні людини в приміщенні.

«Розумне» освітлення застосовується в громадських коридорах, кімнатах очікування, на зупинках і в інших місцях, що потребують освітлення та економії коштів. На сьогодні розумне освітлення

все частіше з'являється в будинках людей, з кожним днем вартість «розумних» пристроїв зменшується, а попит на енергозберігаючі технології збільшується, тому розроблення системи автоматизації приміщень з можливістю керування роботою її об'єктів (освітленням, електропостачанням) в автоматичному режимі є актуальним завданням [5].

Викладення основного матеріалу

Система автоматизації та керування «розумним» освітленням являє собою сукупність апаратних і програмних засобів, націлених насамперед на економічність, тобто зниження можливих витрат (електроенергії) користувача, а також дає додаткові можливості, наприклад контроль присутності [6]. Розроблення економічно збалансованої системи автоматизації та керування «розумним» освітленням складається з таких етапів (рис. 1).

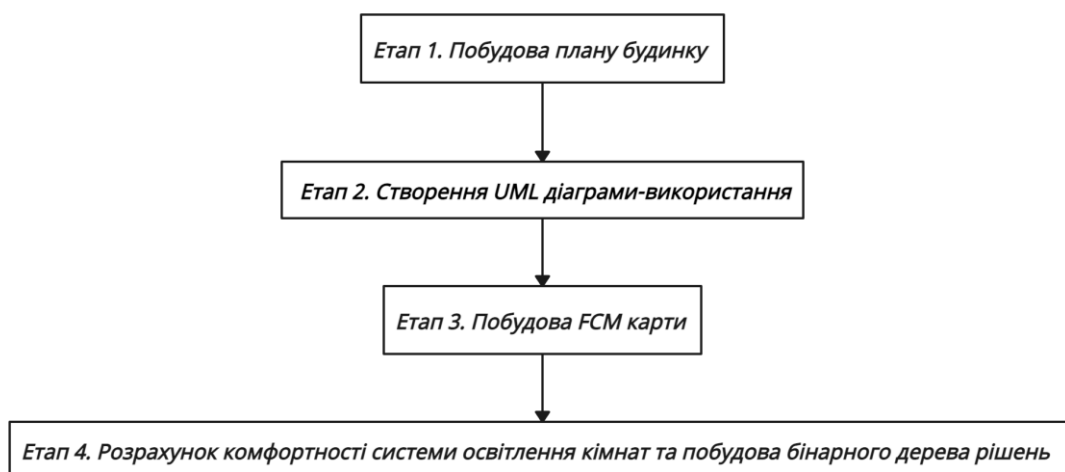


Рис. 1. Структура побудови системи автоматизації та керування «розумним» освітленням

Етап 1. Побудова плану будинку.

План будинку, що складається з трьох кімнат (спальня, дитяча та гостьова кімнати), кухні та ванної кімнати, наведений на рис. 2.



Рис. 2. План будинку

потужніші світлові пристрої або світлові пристрої денного освітлення. Схема випромінювання світла в будинку показана на рис. 3.



Рис. 3. Схема випромінювання світла в будинку

Для ефективності штучного освітлення потрібно створити зонування кожної кімнати і визначити, де найбільше проводиться час, і в тих місцях поставити

На схемі випромінювання світла в кімнатах яскраво-жовтим кольором позначено найяскравіше випромінювання в кімнаті, недостатньо жовтим кольором – більш розсіяний промінь із джерела освітлення.

Отже, схема випромінення світла в будинку дозволяє розрахувати ефективність встановлення штучного джерела світла в кожній кімнаті.

Етап 2. Створення UML діаграми-використання.

Після зображення плану будинку потрібно створити UML діаграму-використання, у якій буде зображено всі можливі варіанти користування сучасною системою освітлення.

UML – це уніфікована мова моделювання (UML), створена для формування загальної, семантично та синтаксично багатой мови візуального моделювання для архітектури, проектування та реалізації складних програмних систем як структурно, так і поведінково. UML має додаткові програми, окрім розроблення програмного забезпечення, такі як технологічний процес у виробництві. Він аналогічний кресленням, використовуваним в інших сферах, і складається з різних типів діаграм. У сукупності діаграми UML описують межу, структуру та поведінку системи та об'єктів у ній [7].

UML не є мовою програмування, але існують інструменти, які можна використовувати для генерації коду різними мовами за допомогою діаграм UML. UML має пряме відношення до об'єктно-орієнтованого аналізу та проектування.

Існує чотири категорії моделей вирішення проблем: імперативні, функціональні, декларативні та об'єктно-орієнтовані мови. В об'єктно-орієнтованих мовах алгоритми виражаються визначенням «об'єктів» і забезпеченням взаємодії об'єктів між собою. Ці об'єкти – речі, якими слід маніпулювати, і вони

існують у реальному світі. Це можуть бути будівлі, віджети на робочому столі або люди.

Об'єктно-орієнтовані мови домінують у світі програмування, оскільки вони моделюють об'єкти реального світу. UML – це поєднання декількох об'єктно-орієнтованих позначень: об'єктно-орієнтованого проектування, техніки об'єктного моделювання та об'єктно-орієнтованої програмної інженерії [7].

UML використовує сильні сторони цих трьох підходів, щоб подати більш послідовну методологію, простішу у використанні. UML являє собою найкращі практики побудови та документування різних аспектів моделювання програмного забезпечення та бізнес-систем [7].

На рис. 4 зображена UML діаграма варіантів використання системою «розумного» освітлення будинку, у якій головним елементом є користувач – User. Користувач може перевіряти систему, слідкувати за загальним освітленням кімнат, природним освітленням кімнат, кімнатами, які автоматично регулюють жалюзі, додають або знижують освітлення кімнати, реагують на шум у кімнаті та закривають або відкривають штори.

Для забезпечення безпечного світла в кімнатах потрібно проаналізувати всі чинники та побудувати FCM карту, що дає змогу більш детально проаналізувати вплив чинників і компонентів, що впливають на користувача.

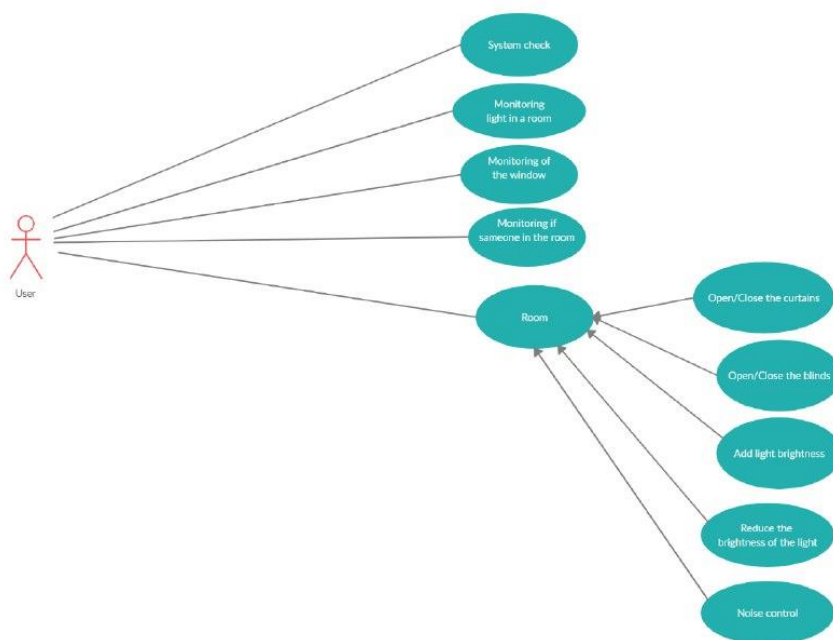


Рис. 4. UML діаграми-використання

Етап 3. Побудова FCM карти.

FCM карта показує більшу та меншу залежність усіх чинників у системі освітлення, що впливають на рівень освітлення в приміщенні. Це дає змогу визначити, які чинники є опорними в системі освітлення. Когнітивна FCM карта освітлення в будинку зображена на рис. 5.

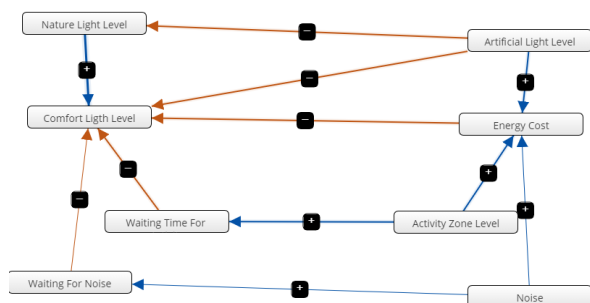


Рис. 5. Когнітивна FCM карта освітлення в будинку

Аналіз когнітивної FCM карти показує, що головним чинником є натуральне світло, яке визначає освітлення кімнати і вартість спожитої електроенергії за проміжок часу, коли природне світло було на високому рівні випромінювання або низькому рівні випромінювання. Велике значення має температура світла,

тому що температура впливає на зір і концентрацію користувача. Для великої продуктивності людини потрібно ввімкнути яскраво-білий колір, а для відпочинку - ввімкнути тепло-жовтий колір. У системі «розумного» освітлення має бути режим різнокольорового освітлення, такий режим дає змогу користувачу морально та емоційно відпочити.

Проаналізувавши параметри зовнішнього середовища, визначено такі головні показники:

- ✓ вартість лампи, грн;
- ✓ натуральне світло, люкс;
- ✓ штучне світло, люкс;
- ✓ температуру випромінюваного світла з лампи, К;
- ✓ наявність мультикольорового режиму, К.

Етап 4. Розрахунок комфортності системи освітлення кімнат і побудова бінарного дерева рішень.

Після аналізу показників створено таблицю з розрахунками комфортності системи освітлення і класи даних, яким задано імена і діапазон їхніх значень (рис. 6).

Показники комфортності для різних кімнат будуть різними у зв'язку з типом користувача, тобто комфортні умови для дитячої кімнати будуть відрізнятися для них же, наприклад, у ванній кімнаті. У роботі наведено приклад для дитячої кімнати.

1	P	NL	AL	RGB	H	Comfort		P	NL	AL	RGB	H
2	10	25	650	0	3500	N.C		>=45	>=100	>=650	>=1	>=3500
3	25	50	800	1	4150	C		<45	<100	<650	<1	<3500
4	30	75	850	0	3800	N.C						
5	15	300	50	1	3200	N.C						
6	45	350	900	1	3600	C						
7	35	200	700	0	4500	C						
8	70	250	950	1	3100	N.C						
9	85	100	750	0	3000	C						
10	90	70	600	1	2800	N.C						
11	100	55	640	1	3555	C						

Рис. 6. Розрахунок комфортності системи освітлення дитячої кімнати

За результатами аналізу таблиці створено комфортні умови для користувача системи:

P (Price, 10 – 100 грн) – вартість елемента освітлення (середня ціна 45 грн за одиницю лампи);

NL (Natural Light, 25 – 350 Lux) – натуральне світло (комфортний рівень світла 100 люксів або більше);

AL (Artificial Light, 50 – 900 Lux) – штучне світло (комфортний рівень світла 650 люксів або більше);

RGB (Multicolor, 0 - 1) – підтримка різнокольорового режиму (корисний рівень різнокольорового освітлення - 1);

H (Temperature Light, 2800 – 4500 K) – температура світла (комфортний рівень температури світла 3500 K або більше).

Для візуалізації бінарного дерева рішень потрібно розрахувати комфортні показники та визначити опорні точки комфортності для кожного елемента розумної системи освітлення. На рис. 7 зображено визначені опорні точки комфортності системи розумного освітлення.

P	NL	AL	RGB	H
>=45	>=100	>=650	>=1	>=3500
<45	<100	<650	<1	<3500

Рис. 7. Визначені опорні точки комфортності

Спираючись на визначені опорні точки розраховується інформаційна ентропія.

Інформаційна ентропія – поняття з теорії інформації. Вона повідомляє, скільки інформації містить подія. Загалом чим більш певною або детермінованою є подія, тим менше інформації вона міститиме. Простими словами, інформація – це збільшення невизначеності або ентропії [8, 9].

Інформаційна ентропія розраховується для візуалізації бінарного дерева рішень.

При розрахунку слід звернути увагу на задані дані комфортності системи освітлення дитячої кімнати (рис. 6):

- кількість даних, що задовольняють чи не задовольняють задані умови опорних точок; для кожного виду даних буде окремий розрахунок;
- кількість комфортних і некомфортних даних, заданих у попередніх умовах.

Одразу після визначення чинників потрібно окремо визначити кількість даних, що задовольняють

задані умови, і визначити серед них кількість комфортних (задовольняють всім умовам) і некомфортних даних (частково задовольняють деякі з умов).

Розглянемо розрахунок на прикладі одного з головних чинників – Р – це умовна вартість одного елемента освітлення, що має бути не більше вказаної в таблиці комфортності системи освітлення (рис. 6). Зазначена вартість становить не менше 45 грн за елемент освітлення. Це дає змогу стати системі економічно-комфортною для користувача, але за умови, що інші чинники потрапляють до заданих параметрів комфортності.

У нашому випадку є 10 елементів освітлення, серед яких п'ять мають вартість від 45 грн і більше, і ще п'ять, у яких вартість менше 45 грн, тому потрібно їх відокремити на початку розрахунків:

Var P has value >=45 for 5 records out of 10 and 5 records with value <45 value.

Після відокремлення елементів освітлення за вартістю потрібно визначити параметри комфортності у відокремлених елементах освітлення. Параметри комфортності залежать від характеристик елементів освітлення: якщо вартість і функції відповідають заданим умовам користувача, такий елемент вважається комфортним. В умовах вартості елемента більше 45 грн три елементи комфортні та два

некомфортні, їх потрібно розділити для точності розрахунку:

For Var P >= 45 & class == comfort: 3/5.

For Var P >= 45 & class == nocomfort: 2/5.

Наступним кроком потрібно порахувати ентропію для параметрів, задані умовами вартості елемента більше 45 грн:

$$Entropy(3,2) = -1 * ((3/5) * \log_2(3/5) + (2/5) * \log_2(2/5)) = 0,979.$$

Розрахунок для елементів, що коштують менше 45 грн, виконується аналогічно.

Для розрахунку загальної ентропії вартості елементів освітлення потрібно вказати параметри комфортності та ентропії відокремлених елементів освітлення. Від отриманого результату загальної

ентропії залежить бінарне дерево рішень: якщо результат становить 0, цей параметр не впливає на систему та не позначається на дереві рішень. Розрахунок загальної ентропії вартості елементів освітлення матиме такий вигляд:

$$Entropy(Target, P) = P(>=45) * E(3,2) + P(<45) * E(2,3) = (5/10) * 0,979 + (5/10) * 0,979 = 1 - 0,979 = 0,021.$$

Загальний вигляд розрахунків за кожним параметром комфортності, що впливає на економічно комфортну систему, має вигляд

Var P has value >=45 for 5 records out of 10 and 5 records with value <45 value.

For Var P >= 45 & class == comfort: 3/5

For Var P >= 45 & class == nocomfort: 2/5

$$Entropy(3,2) = -1 * ((3/5) * \log_2(3/5) + (2/5) * \log_2(2/5)) = 0,979$$

For Var P <45 & class == comfort: 2/5

For Var P <45 & class == nocomfort: 3/5

$$Entropy(2,3) = -1 * ((2/5) * \log_2(2/5) + (3/5) * \log_2(3/5)) = 0,979$$

$$Entropy(Target, P) = P(>=45) * E(3,2) + P(<45) * E(2,3) = (5/10) * 0,979 + (5/10) * 0,979 = 1 - 0,979 = 0,021$$

Var NL has value ≥ 100 for 6 records out of 10 and 4 records with value < 100 value.

For Var NL ≥ 100 & class == comfort: 3/6

For Var NL ≥ 100 & class == nocomfort: 3/6

Entropy(3,3) = $-1 * ((3/6) * \log_2(3/6) + (3/6) * \log_2(3/6)) = 1$

For Var NL < 45 & class == comfort: 2/4

For Var NL < 45 & class == nocomfort: 2/4

Entropy(2,2) = $-1 * ((2/4) * \log_2(2/4) + (2/4) * \log_2(2/4)) = 1$

Entropy(Target, NL) = $P(\geq 100) * E(3,3) + P(< 100) * E(2,2) = (6/10) * 1 + (4/10) * 1 = 1 - 1 = 0$

Var AL has value ≥ 650 for 7 records out of 10 and 3 records with value < 650 value.

For Var AL ≥ 650 & class == comfort: 4/7

For Var AL ≥ 650 & class == nocomfort: 3/7

Entropy(4,3) = $-1 * ((4/7) * \log_2(4/7) + (3/7) * \log_2(3/7)) = 0,99$

For Var AL < 650 & class == comfort: 1/3

For Var AL < 650 & class == nocomfort: 2/3

Entropy(1,2) = $-1 * ((1/3) * \log_2(1/3) + (2/3) * \log_2(2/3)) = 0.92$

Entropy(Target, AL) = $P(\geq 650) * E(4, 3) + P(< 650) * E(1,2) = (7/10) * 0.99 + (3/10) * 0.92 = 1 - 0,969 = 0,031$

Var RGB has value ≥ 1 for 6 records out of 10 and 4 records with value < 1 value.

For Var RGB ≥ 1 & class == comfort: 3/6

For Var RGB ≥ 1 & class == nocomfort: 3/6

Entropy(3,3) = $-1 * ((3/6) * \log_2(3/6) + (3/6) * \log_2(3/6)) = 1$

For Var RGB < 1 & class == comfort: 2/3

For Var RGB < 1 & class == nocomfort: 1/3

Entropy(2,1) = $-1 * ((2/3) * \log_2(2/3) + (1/3) * \log_2(1/3)) = 0.92$

Entropy(Target, RGB) = $P(\geq 1) * E(3, 3) + P(< 1) * E(2,1) = (6/10) * 1 + (3/10) * 0.92 = 1 - 1.476 = 0,124$

Var H has value ≥ 3500 for 6 records out of 10 and 4 records with value < 3500 value.

For Var H ≥ 3500 & class == comfort: 4/6

For Var H ≥ 3500 & class == nocomfort: 2/6

Entropy(4,2) = $-1 * ((4/6) * \log_2(4/6) + (2/6) * \log_2(2/6)) = 0.92$

For Var H < 3500 & class == comfort: 1/4

For Var H < 3500 & class == nocomfort: 3/4

Entropy(1,3) = $-1 * ((1/4) * \log_2(1/4) + (3/4) * \log_2(3/4)) = 0.843$

Entropy(Target, H) = $P(\geq 3500) * E(4, 2) + P(< 3500) * E(1,3) = (6/10) * 0.92 + (4/10) * 0.843 = 1 - 0.8852 = 0.1108$

Отримані результати обчислення бінарного дерева застосовувати при візуалізації бінарного дерева (рис. 8) за критерієм отримання інформації можна рішень.

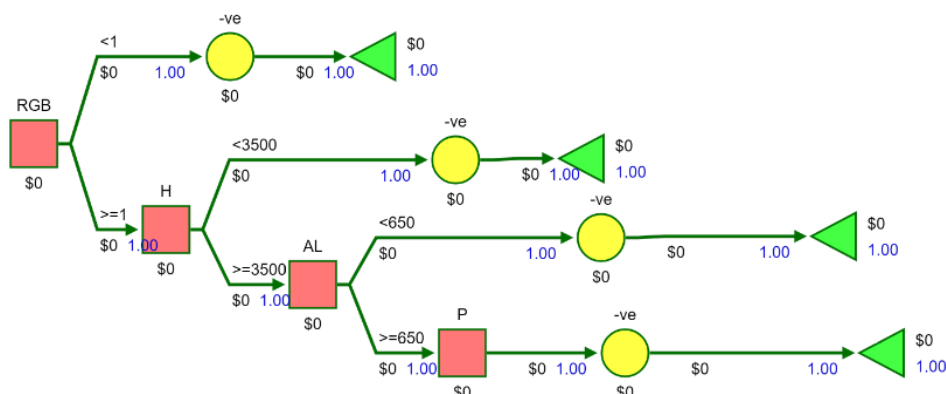


Рис. 8. Бінарне дерево рішень для дитячої кімнати

У свою чергу дерево рішень дає можливість створити концепт «розумного» освітлення в дитячій кімнаті та визначити ефективність системи «розумного» освітлення, тобто визначати помилки в системі. Наприклад, якщо датчик світла, який вийшов із ладу, передає від'ємні показники на мікроконтролер, то за допомогою дерева рішень система уникає негативних наслідків [10-12].

Розрахунки показників освітлення та побудова дерева рішень для всіх приміщень будинку проводяться за аналогічним алгоритмом.

Висновки

Показано, що «розумний» будинок займе своє місце у сфері побутової електроніки і ввійде в повсякденне життя багатьох користувачів. Цьому сприятимуть і поява простих, функціональних і відносно дешевих контролерів, і підвищення обчислювальної потужності смарт-пристроїв. Результати роботи можуть бути використані для розгортання системи автоматизації освітлення як у звичайному будинку, так і спеціалізованих приміщеннях з більш жорсткими вимогами.

Список використаних джерел

1. What is Mental Modeler? *MentalModeler*. URL: <https://www.mentalmodeler.com>.
2. SilverDecisions. URL: <https://silverdecisions.pl>.
3. A Brief History of Smart Home Automation. *Zeusintegrated systems*. URL: <https://zeusintegrated.com/blog/item/a-brief-history-of-smart-home-automation>.
4. Розумне освітлення в будинку – сучасні технології у вашому будинку. *Розумний дім*. URL: <https://noviydom.com.ua/umnoe-osveshhenie>.
5. Smart lighting for your home. *Atamate*. URL: <https://www.atamate.com/atamate-blog/what-is-smart-lighting>.
6. What is SysML? *Systems Modeling Language*. URL: <https://www.omg.sysml.org/what-is-sysml.htm>.
7. Панченко С., Серков О., Трубочанінова К. Теорія і практика електромагнітної сумісності телекомунікаційних систем: монографія. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 249 с.
8. Introduction to Lighting Controls. *Lighting Controls Association*. URL: <https://lightingcontrolsassociation.org/2017/07/21/introduction-to-lighting-controls>.
9. Serkov A., Kniazhev V., Yakovenko I., Trubchaninova K. *Electromagnetic Compatibility of Mobile Telecommunication Systems*. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week, UkrMW 2020 (Kharkiv, 21 September 2020 – 25 September 2020). Proceedings. 2020. P. 1041–1044.
10. Neelam Verma, Anjali Jain. *Optimized Automatic Lighting Control in a Hotel Building for Energy Efficiency*. International Conference on Power Energy. 2018. 170 p.
11. Hajjaj M., Miki M., Shimohara K. *The Effect of Using the Intelligent Lighting System to Deduct the Power Consumption at the Office*. IEEE 7th Conference on Systems, Process and Control (ICSPC). 2019. 66 p.
12. Smart lightning for top class schools. *Interact*. URL: <https://www.interact-lighting.com/global/what-is-possible/interact-pro/schools>.

Trubchaninova K., Cherkashyn Y. Smart lighting system.

Abstract. An analysis of the environment that affects the lighting of the premises was carried out and the optimal indicators for the user were determined. The main stages of creating a "smart lighting in the house" system have been determined. The construction of the lighting scheme should begin with a comparison of the proposed options of components that are part of the system and have the characteristics specified by the initial conditions. Some components have a negative effect on the lighting in the rooms, which leads to impaired vision, reduced immunity

and deterioration of health. In order to avoid problems with vision and health, it is necessary to correctly calculate the lighting in the rooms, for this, a lighting plan is built in the house, which indicates artificial and natural light sources that affect the user's condition. To build "smart" lighting, a UML diagram of use cases is created, which shows all the functions and shortcomings found in the given system. When constructing a use case diagram, all hardware capabilities and user preferences are taken into account. In advance, you need to create a cognitive FCM map in which to depict the relationship between the system of components and the environment in the conditions of a permanent stay in the house. The FCM map allows you to depict the dependence of all user needs and their impact on artificial lighting. The binary decision tree shows how comfortable and economical the system is for the user, if one of the factors does not meet the initial requirements, then the system becomes uncomfortable to use. It is recommended to calculate the project component by building a decision tree. A binary decision tree was calculated and it was determined that the decision tree is built after calculating the information entropy, this makes it possible to depict an economical and comfortable system of "smart" lighting in the house.

Keywords: entropy, smart home, smart lighting, binary decision tree.

Трубчанінова Карина Артурівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: tka2@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2078-2647>.

Черкашин Євгеній Андрійович, магістрант кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: evgenii.cherkashyn@gmail.com.

Trubchaninova Karyna, Doctor of sciences (engineering), Full Professor, Professor of Transport Communication Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: tka2@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2078-2647>.

Cherkashyn Yevhenii, Master's student of the Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: evgenii.cherkashyn@gmail.com.

Надійшла 16.02.2023 р.

НЕРУБАЦЬКИЙ В. П., канд. техн. наук,
ПЛАХТІЙ О. А., канд. техн. наук,
ГОРДІЄНКО Д. А., аспірант,
ФІЛІП'ЄВА М. В., аспірантка
(Український державний університет залізничного транспорту),
БАГАЧ Р. В., аспірант (Харківський національний автомобільно-дорожній університет)

Підвищення точності моделювання перехідних процесів і розрахунку втрат потужності напівпровідникових перетворювачів у програмному середовищі NI Multisim

У статті наведено дослідження перехідних процесів і результати розрахунків статичних і динамічних втрат потужності в силових IGBT- та MOSFET-транзисторах при моделюванні у програмних середовищах Matlab / Simulink і NI Multisim. Визначено, що моделювання в NI Multisim більш коректне і точно відображує перехідні процеси ввімкнення та вимкнення силових транзисторів і зворотного відновлення діодів, що дає змогу визначати динамічні втрати силових транзисторів і силових діодів. Показано, що модель силових транзисторів у NI Multisim враховує більше сорока семи параметрів, включаючи температурні характеристики, паразитні вхідні та вихідні ємності і індуктивності, нелінійності вольт-амперних характеристик транзисторів тощо. У програмному середовищі NI Multisim розроблено схему транзисторного MOSFET-ключа IRFZ44n, керування здійснює драйвер IR2104PBF. Подано адекватність часів ввімкнення та вимкнення силового транзистора, характер перехідних процесів при резистивному та резистивно-індуктивному навантаженні, залежність сумарних втрат потужності від частоти комутації.

Ключові слова: Matlab, NI Multisim, вольт-амперна характеристика, втрати потужності, напівпровідниковий перетворювач, перехідний процес, силовий транзистор.

Вступ

Одним з важливих напрямів дослідження напівпровідникових перетворювачів є визначення їхнього коефіцієнта корисної дії та складових втрат потужності, а також дослідження шляхів покращення енергетичної ефективності перетворювачів [1, 2]. При цьому комп'ютерне моделювання роботи перетворювачів є важливим етапом у розробленні та дослідженні енергетичних показників напівпровідникових перетворювачів під час їхнього проектування. Одним із найпопулярніших інструментів при моделюванні силових напівпровідникових перетворювачів є програмне середовище Matlab / Simulink [3, 4]. До переваг моделювання напівпровідникових перетворювачів можна віднести [5, 6]:

– універсальність, тобто можливість моделювання будь-яких силових електричних схем з малими струмами та будь-яких систем керування;

– зручний інтерфейс, який за рахунок створення блочних схем дає змогу досить просто без знань мов програмування створювати досить складні системи керування;

– потужний вбудований математичний апарат, що дає змогу проводити дуже багато різних видів аналізу (Фур'є-аналіз, алгоритми синтезу цифрових та аналогових фільтрів, алгоритми синтезу регуляторів і т. п.).

Для отримання адекватних результатів моделювання роботи електричних схем важливим є врахування внутрішніх основних і паразитних параметрів напівпровідників, що необхідно для визначення характеру перехідних процесів при комутації, а також визначення втрат потужності та перегріву силових ключів [7, 8].

Постановка проблеми, аналіз досліджень і публікацій

При вирішенні завдання дослідження втрат потужності в силових напівпровідникових перетворювачах базовий функціонал програмного середовища Matlab / Simulink має досить суттєві недоліки [9, 10]: при моделюванні силових перетворювачів некоректно визначаються статичні втрати потужності в силових IGBT-, MOSFET-, GTO-транзисторах, а також повністю не враховуються динамічні втрати потужності. Це пов'язано з тим, що Matlab / Simulink не відображає процеси зростання та спадання струму і напруги в часі при комутації. Через це визначення динамічних втрат потужності в силових транзисторах практично неможливо. І це при тому, що динамічні втрати потужності складають більшу частину відносно статичних втрат потужності.

Одним зі шляхів точного врахування втрат потужності в силових транзисторах у програмному середовищі Matlab / Simulink є створення додаткових субмоделей, що здійснюють розрахунок миттєвих значень статичних і динамічних втрат потужності у функції значення величини миттєвого струму [11, 12]. Ці методи дають змогу визначати втрати потужності в силових транзисторах, проте вимагають попередньої лінійної чи поліноміальної апроксимації характеристик $U_{ce}(I)$, $E_{on}(I)$, $E_{off}(I)$, $E_{rec}(I)$. За відсутності цих характеристик у документації наведені методи застосувати неможливо.

У публікації [13] подано методику моделювання перехідних процесів комутації силових транзисторів у програмному середовищі Matlab / Simulink шляхом додавання до моделі паразитних параметрів індуктивності та ємності. Проте цей метод не визначає залежностей перехідного процесу від параметрів опору резистора затвора.

У публікації [14] наведено суттєву різницю результатів моделювання перехідних процесів комутації силових транзисторів у програмному середовищі Matlab / Simulink, Spice-моделюванні та результатів реальних осцилограм.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є підвищення точності моделювання перехідних процесів у силових напівпровідникових перетворювачах, що дасть можливість більш коректно визначати динамічні втрати потужності. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- огляд перехідного процесу в силовому транзисторі під час комутації;
- визначення недоліків моделювання силових транзисторів і діодів у програмному середовищі Matlab / Simulink;

– дослідження деталізації моделювання силових транзисторів і діодів у програмному середовищі NI Multisim;

– подання перехідних процесів комутації струму, напруги і потужності в розробленій моделі напівпровідникового ключа на базі MOSFET-транзистора.

Викладення основного матеріалу

Розрахунок втрат потужності в силових транзисторах і діодах. Перехідний процес зміни напруги, струму та потужності в силовому транзисторі під час комутації наведено на рис. 1 [15, 16].

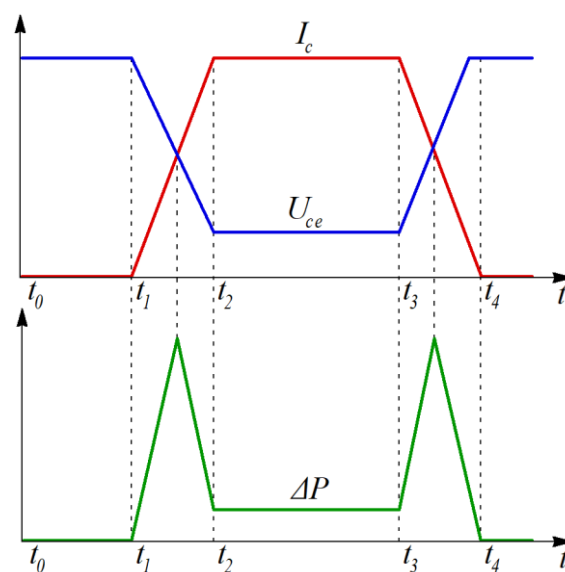


Рис. 1. Перехідний процес у силовому транзисторі під час комутації

На рис. 1 визначено чотири інтервали комутації.

Інтервал $t_0 - t_1$. Цим інтервалом часу описано вимкнений стан силового транзистора. На цьому інтервалі часу напруга, прикладена до транзистора, є максимальною, але струм через транзистор не протікає. Відповідно втрати потужності на ньому дорівнюють нулю.

Інтервал $t_1 - t_2$. Під час цього інтервалу описано процес комутації силового транзистора після подання на нього сигналу ввімкнення. На цьому інтервалі часу напруга, прикладена до транзистора, зменшується з максимальної до величини прямого падіння напруги U_{ce} в транзисторі, а струм через транзистор починає зростати з нуля до максимального значення. Відповідно енергія, що відповідає динамічним втратам потужності на інтервалі ввімкнення, визначається як

$$E_{on} = \int_{t_1}^{t_2} I_c \cdot U_{ce} \cdot dt, \quad (1)$$

де I_c , U_{ce} – величини струму та напруги в провідному стані ключа.

Інтервал $t_2 - t_3$ відповідає провідному стану транзистора. Цей інтервал часу визначає статичні втрати потужності в транзисторі. На цьому інтервалі сигнали ввімкнення або вимкнення на транзистор не подаються. При цьому напруга та струм на транзисторі визначаються схемою, у якій працює транзистор, тобто можуть бути постійними, наприклад у схемі чопера, або змінюватись у часі, наприклад у схемі підвищувального імпульсного перетворювача. Відповідно енергія, розсіювана на транзисторі під час імпульсу ввімкнення, відповідає статичним втратам потужності і аналогічно визначається інтегралом миттєвої потужності як

$$E_{cond} = \int_{t_2}^{t_3} I_c \cdot U_{ce} \cdot dt. \quad (2)$$

Інтервал $t_3 - t_4$ відповідає інтервалу процесу комутації вимкнення силового транзистора. Цей інтервал часу визначає динамічні втрати потужності вимкнення. Відповідно енергія, розсіювана на транзисторі під час вимкнення, відповідає динамічним втратам потужності вимкнення і визначається як

$$E_{off} = \int_{t_3}^{t_4} I_c \cdot U_{ce} \cdot dt. \quad (3)$$

У режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) при режимі роботи перетворювача з постійним навантаженням та постійною величиною коефіцієнта заповнення в ШІМ статичні та динамічні втрати потужності можна визначити як [17, 18]

$$P_{cond} = I_c \cdot U_{ce} \cdot \gamma, \quad (4)$$

де γ – коефіцієнт заповнення в ШІМ;

$$P_{SW} = f_{PWM} \cdot (E_{on} + E_{off}), \quad (5)$$

де f_{PWM} – частота комутації.

У силових діодах процес виникнення статичних втрат потужності є аналогічним. Проте динамічні втрати потужності в силових діодах відрізняються.

На рис. 2 наведено один із типових фрагментів електричних схем з діодами та напівпровідниковими ключами. Ця схема визначає жорсткий режим відновлення зворотної провідності діода. На прикладі

цієї схеми пояснено процес відновлення зворотної провідності діода. А часові діаграми струмів і напруг, що описують процеси у схемі, наведено на рис. 3.

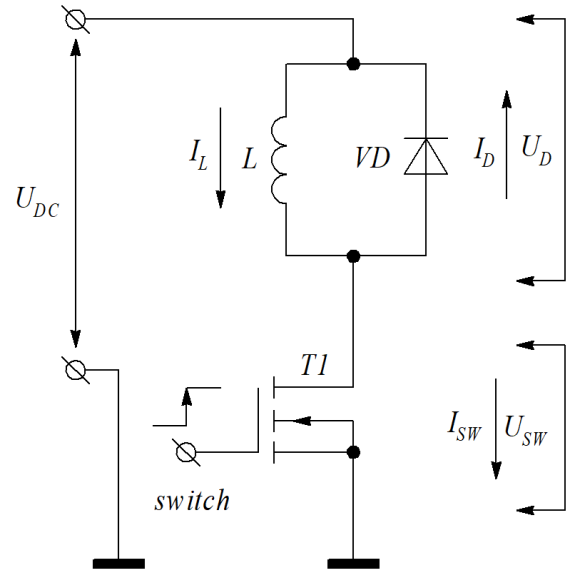


Рис. 2. Електрична схема підключення діода

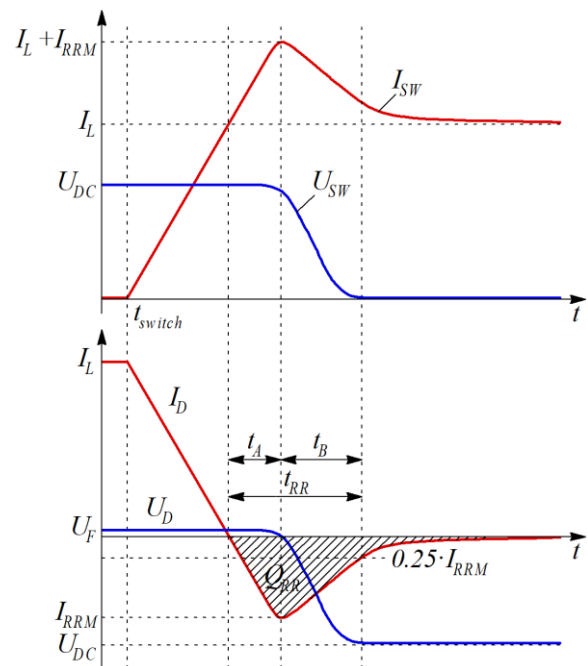


Рис. 3. Процес зворотного відновлення діода

У початковий час напівпровідниковий ключ закритий, і струм індуктивності повністю замикається через діод. Після подачі керуючого імпульсу на затвор транзистора і перевищення ним деякої порогової напруги відбувається поступове зростання струму через ключ I_{SW} , починаючи з часу t_{switch} . При цьому

струм, що протікає через діод I_D , поступово зменшується, оскільки струм індуктивності починає частково витікати через ключ, що відкривається. У деякий момент часу (початок інтервалу t_A), коли струм індуктивності повністю замкнеться через ключ ($I_L = I_{SW}$), струм через діод змінить свій напрямок. У першій половині імпульсу реверсного струму (період t_A) відбувається розряд ємності p - n -переходу, при цьому напруга на діоді деякий час залишається позитивною, а зворотний струм досягає максимуму. Далі зворотний струм через діод починає знижуватись (період t_B), а зворотна напруга зростає до напруги джерела U_{DC} .

$$E_{rec} = \int_{t_A}^{t_B} I_D \cdot U_D \cdot dt, \quad (6)$$

де E_{rec} – енергія зворотного відновлення.

При цьому виробники силових транзисторів наводять у документації на силові транзистори вже визначені залежності енергії відновлення від величини комутованого струму. Залежність енергії зворотного відновлювання від величини комутованого струму силового діода RM1000DC-66F наведено на рис. 4.

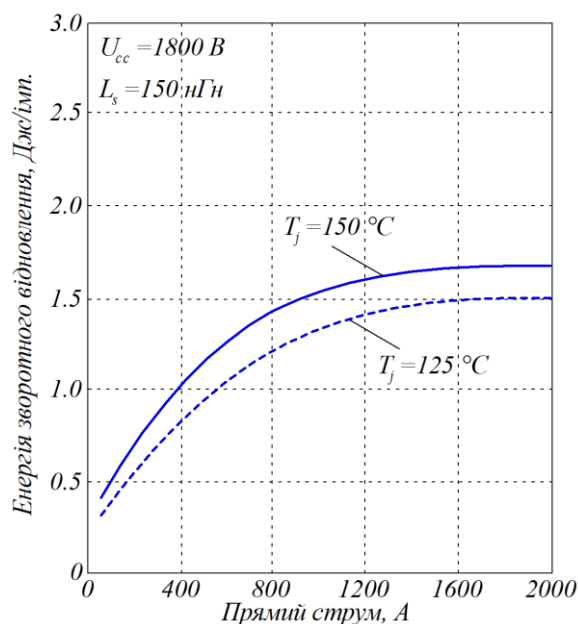


Рис. 4. Залежність енергії зворотного відновлювання від комутованого струму

Знаючи фактичне значення залежності енергії відновлення значення ШІМ при режимі роботи зі сталою частотою енергія зворотного відновлення може бути визначена як

$$P_{rec} = E_{rec} \cdot f_{PWM}. \quad (7)$$

Деталізація моделей силових транзисторів і діодів у програмному середовищі Matlab / Simulink. Статичні втрати потужності транзисторів і діодів визначаються значеннями струму та напруги у провідному стані [19, 20]. При цьому напруга на діоді та транзисторі залежить від величини струму, що визначається вольт-амперною характеристикою (ВАХ) ключа. При цьому значення падіння напруги, крім струму, також залежить від величини температури напівпровідника. На рис. 5 наведено реальні вольт-амперні характеристики силового діода RM1000DC-66F з напругою 3,3 кВ і номінальним струмом 1000 А і вольт-амперну характеристику, за якою моделюється робота силового діода та IGBT-транзистора в Matlab / Simulink.

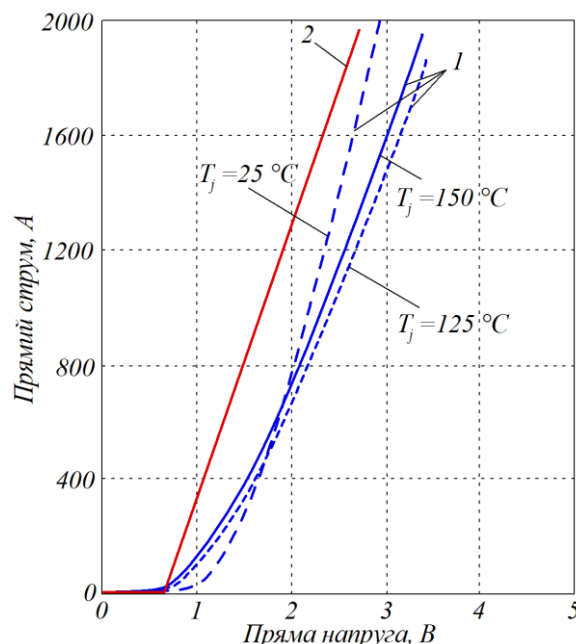


Рис. 5. Вольт-амперна характеристика силового діода RM1000DC-66F:

1 – реальні; 2 – подання ВАХ у Matlab / Simulink

Як видно з рис. 5, реальні вольт-амперні характеристики діода при температурах 25 °С, 125 °С і 150 °С мають параболічну форму. Червоною лінією наведено ВАХ діода та силового IGBT-транзистора, що моделюється в Matlab / Simulink значеннями за замовчуванням (default settings). Вольт-амперна характеристика силового діода в Matlab / Simulink моделюється як величина прямого падіння напруги U_f (стандартне значення 0,8 В) з послідовним активним опором $R_{on} = 1$ мОм. Ці значення можуть бути налаштованими, проте заміна параболі ВАХ діода та IGBT-транзистора прямою так чи інакше в повному

діапазоні струму ключа призводить до похибок у розрахунках статичних втрат потужності.

Суттєвим недоліком моделювання роботи силових транзисторів і діодів є відсутність у моделях паразитних параметрів внутрішніх ємностей та індуктивностей, внаслідок чого комутація силових транзисторів відбувається за один програмний інтервал розрахунку в моделі Matlab / Simulink [21, 22]. Внаслідок цього динаміка, а саме час вмикання і вимикання силових транзисторів у моделі ігноруються, динамічні втрати потужності в силових MOSFET- та IGBT-транзисторах ігноруються. Процес комутації силового IGBT-транзистора, а саме миттєві значення напруги, струму та потужності під час вмикання та вимкнення, наведено на рис. 6.

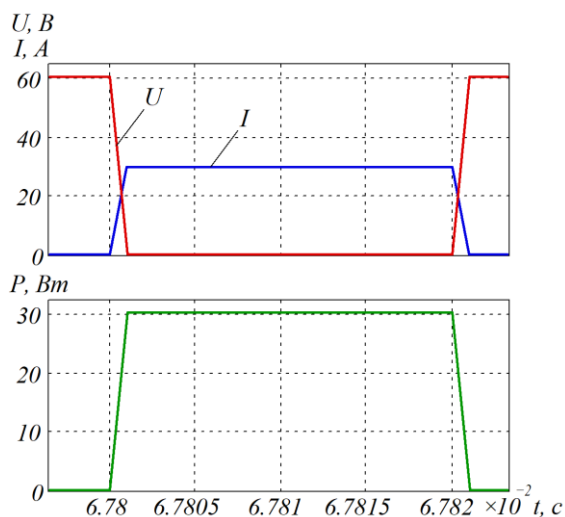


Рис. 6. Результати моделювання перехідних процесів при комутації IGBT-транзистора в Matlab / Simulink

З рис. 6 видно, що час вмикання і вимкнення силового транзистора складає 1 мкс, проте це зумовлено не властивістю моделі транзистора, а загальними налаштуваннями мінімального часу дискретизації моделювання в Matlab / Simulink. Внаслідок цього проміжні точки миттєвих значень струму та напруги знаходяться в межах однієї дискрети часу, тобто миттєвих значеннях струму і напруги між значеннями вимкнення та вмикання ($t_1 = 0,0678$ с і $t_2 = 0,067801$ с), і програмою не розраховуються. При цьому форма напруги та струму IGBT-ключа при комутації резистивного чи резистивно-індуктивного навантаження не

відрізняється. Тобто під час комутації (середина процесу), коли миттєве значення струму складає 15 А, значення напруги на транзисторі дорівнює 30 В, миттєве значення потужності має дорівнювати 450 Вт. Проте внаслідок того, що проміжні точки струму та напруги ключа не розраховуються, Matlab / Simulink розраховує лише миттєві значення до та після комутації, внаслідок цього проміжне значення миттєвої потужності під час комутації відображується як 15 Вт. Крім того, Matlab / Simulink не моделює процеси зворотного відновлення силових діодів, внаслідок чого енергія відновлення діодів у моделях не враховується.

Отже, моделювання силових схем у Matlab / Simulink принципово не дає змоги визначати динамічні втрати потужності в силових транзисторах і діодах. Щодо статичних втрат потужності, за рахунок налаштування величини прямого падіння напруги та внутрішнього активного опору ключа в певному діапазоні величин струмів статичні втрати можна моделювати коректно, проте у випадку, коли миттєві значення струму ключа змінюються від нуля до максимуму, розрахунок статичних втрат потужності буде мати похибки. Крім того, Matlab / Simulink не дає змоги визначати ефективність роботи снаберів силових транзисторів, не дозволяє досліджувати силові перетворювачі в режимах роботи zero-voltage switching та zero-current switching, вплив затворного резистору на тривалість перехідного процесу, вплив температурних параметрів і багато інших параметрів [23, 24].

Деталізація моделей силових транзисторів і діодів у програмному середовищі NI Multisim. Програмне середовище NI Multisim використовує схожий принцип моделювання електричних схем: створення систем диференціальних рівнянь, що описують електричну схему, і розв'язання цієї системи чисельними методами з заданим часом дискретизації [25, 26]. Проте базові розрахункові моделі силових транзисторів і діодів суттєво відрізняються. Моделі силових діодів і транзисторів у NI Multisim є суттєво складнішими та враховують значно більшу кількість параметрів, а також вплив на параметри ключів температури [27, 28]. Так, наприклад, модель MOSFET враховує 47 параметрів ключа, а модель силового діода враховує 28 параметрів.

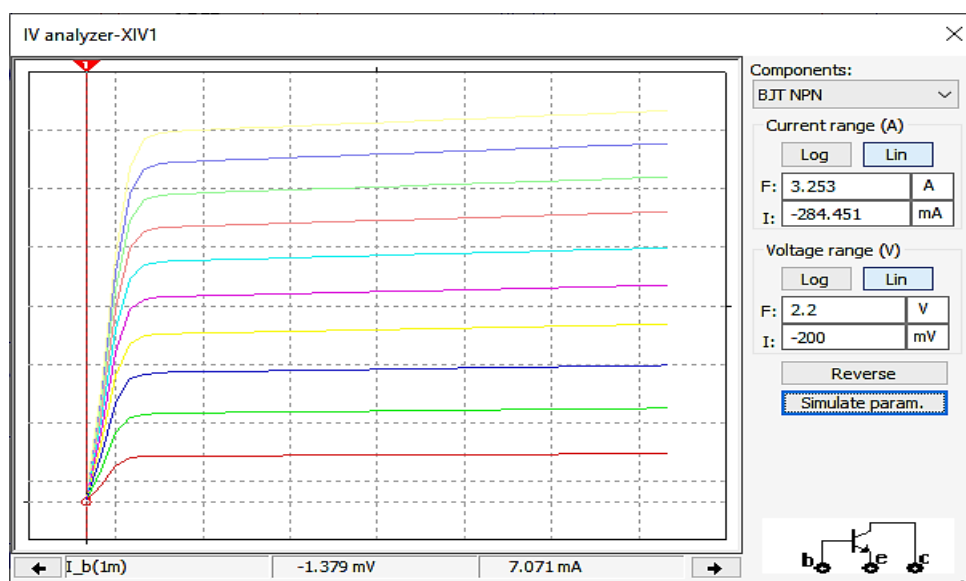
Перелік параметрів SPICE-моделі MOSFET-транзистора та їхні значення за замовчуванням (default settings) наведено на рис. 7.

.model NMOS_VIRTUAL_1 nmos Tools Views

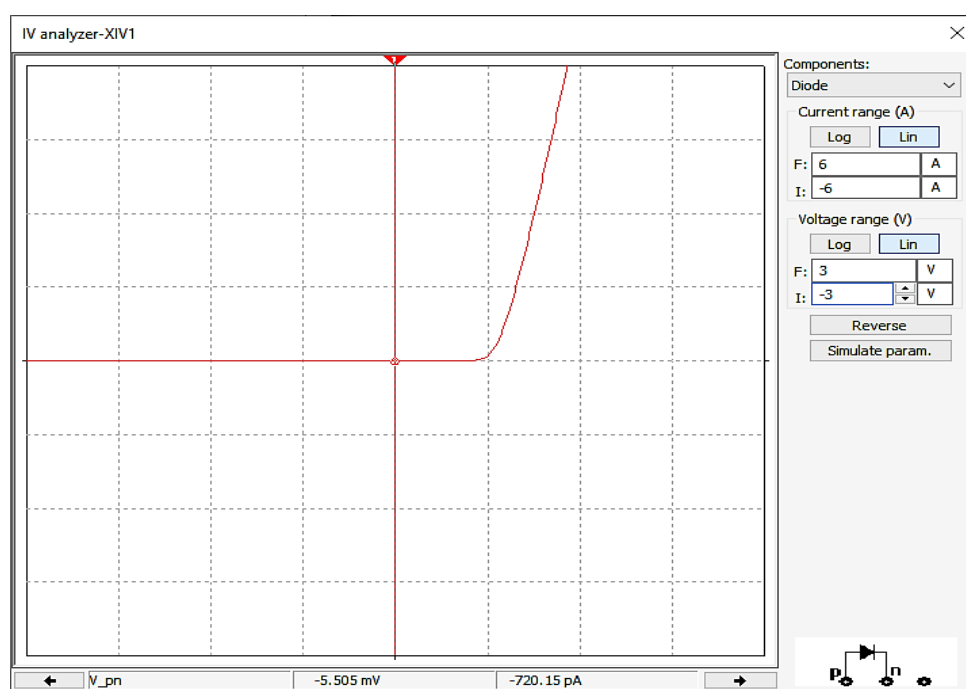
Name	Description	Value	Units	Use default
VTO	Threshold voltage	0	V	☒
KP	Transconductance parameter	2e-5	A/V ²	☒
GAMMA	Bulk threshold parameter	0	V ^{0.5}	☒
PHI	Surface potential	0.6	V	☒
LAMBDA	Channel length modulation	0	1/V	☒
RD	Drain ohmic resistance	0	Ω	☒
RS	Source ohmic resistance	0	Ω	☒
RG	Gate ohmic resistance	0	Ω	☒
RB	Bulk ohmic resistance	0	Ω	☒
RDS	Drain source shunt resistance	0	Ω	☒
CBD	Bulk-drain junction capacitance	0	F	☒
CBS	Bulk-source junction capacitance	0	F	☒
IS	Bulk junction saturation current	1e-14	A	☒
PB	Bulk junction potential	0.8	V	☒
CGSO	Gate-source overlap capacitance	0	F/m	☒
CGDO	Gate-drain overlap capacitance	0	F/m	☒
CGBO	Gate-bulk overlap capacitance	0	F/m	☒
RSH	Sheet resistance	0	$\Omega/\text{sq.}$	☒
CJ	Bottom junction capacitance per area	0	F/m ²	☒
MJ	Bottom grading coefficient	0.5		☒
CJSW	Side junction capacitance per area	0	F/m	☒
MJSW	Side grading coefficient	0.33		☒
JS	Bulk junction saturation current density	0	F/m ²	☒
TOX	Oxide thickness	4e-9	m	☒
LD	Lateral diffusion	0	m	☒
U0	Surface mobility	600	cm ² /...	☒
FC	Forward bias junction fit parameter	0.5		☒
NSUB	Substrate doping	0	1/cm ²	☒
TPG	Gate type	1		☒
NSS	Surface state density	0	1/cm ²	☒
TNOM	Parameter measurement temperature	27	°C	☒
KF	Flicker noise coefficient	0		☒
AF	Flicker noise exponent	1		☒
L	Length	100e-6	m	☒
W	Width	100e-6	m	☒
WD	Lateral diffusion (Width)	0	m	☒
N	Bulk P-N emission coefficient	1		☒
JSSW	Bulk P-N saturation sidewall current/le...	0	A/m	☒
PBSW	Bulk P-N sidewall potential	0	V	☒
TT	Bulk p-n transit time	0	sec	☒
NLEV	Noise equation selector	2		☒
GDSNOI	Channel shot noise coefficient (used w...	1		☒
T_MEASURED	Parameter measurement temperature	27	°C	☒
T_ABS	Absolute temperature	27	°C	☒
T_REL_GLOBAL	Relative to current global temperature	0	°C	☒

Рис. 7. Параметри SPICE-моделі MOSFET-транзистора та їхні значення

Внаслідок досить точної деталізації моделей силових транзисторів вольт-амперні характеристики силових транзисторів і діодів моделюються досить точно [29, 30]. ВАР силового діода SURS8340T3G в NI Multisim наведено на рис. 8.



а



б

Рис. 8. Моделі BAX напівпровідників в NI Multisim:
а – n-p-n транзистора NSS12501UW3T2G; б – силового діода SURS8340T3G

У документації на діод SURS8340T3G зазначено, що при величині струму 3 А величина падіння напруги на ньому буде складати 1,25 В. При моделюванні в NI Multisim величина падіння напруги складає 1,251 В.

Моделювання перехідних процесів і втрат потужності в MOSFET-транзисторі IRFZ44N. Для

оцінювання адекватності моделювання перехідних процесів у силових транзисторах у програмному середовищі NI Multisim було розроблено схему силового MOSFET-транзистора IRFZ44N, що керується драйвером IR2104 (рис. 9).

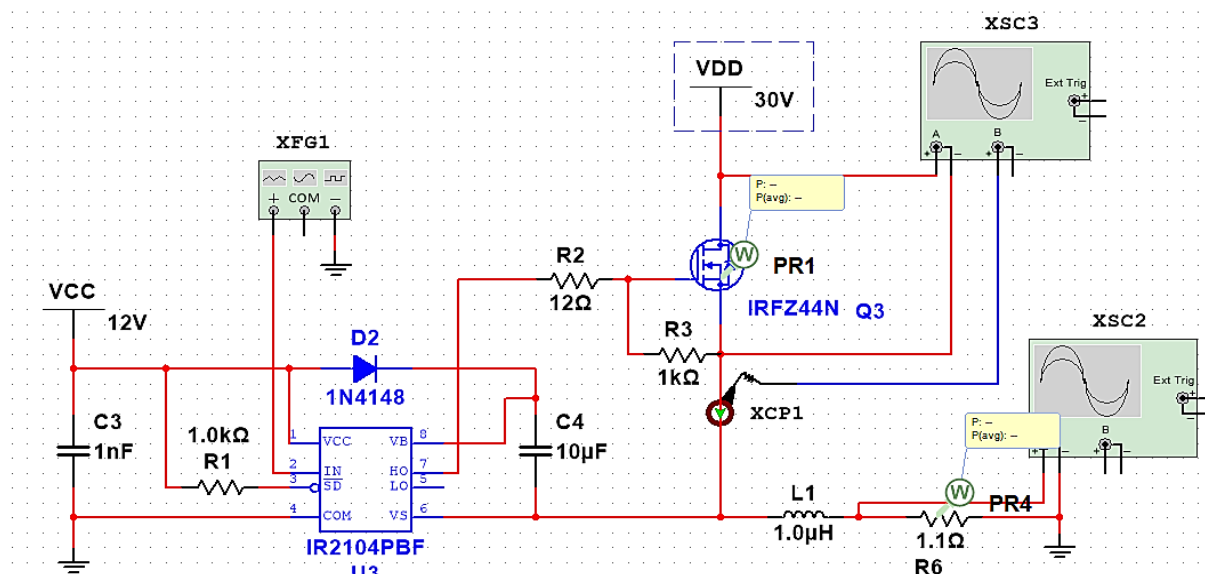
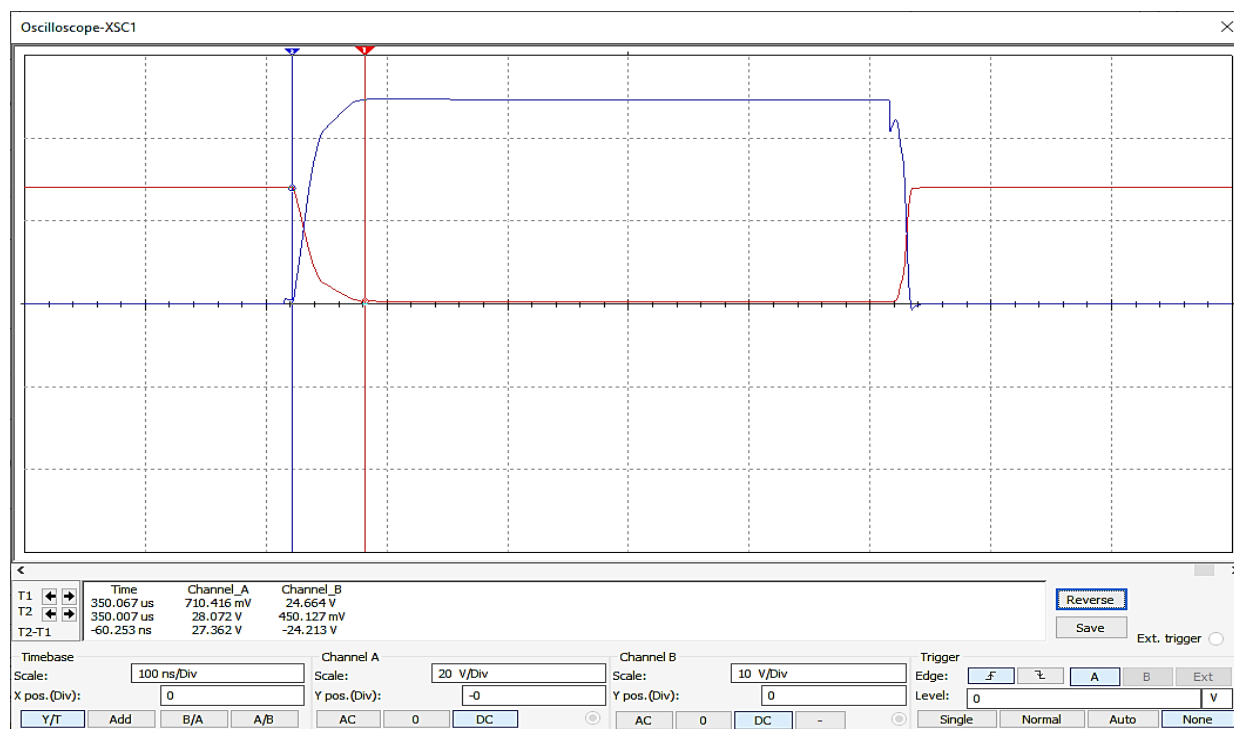


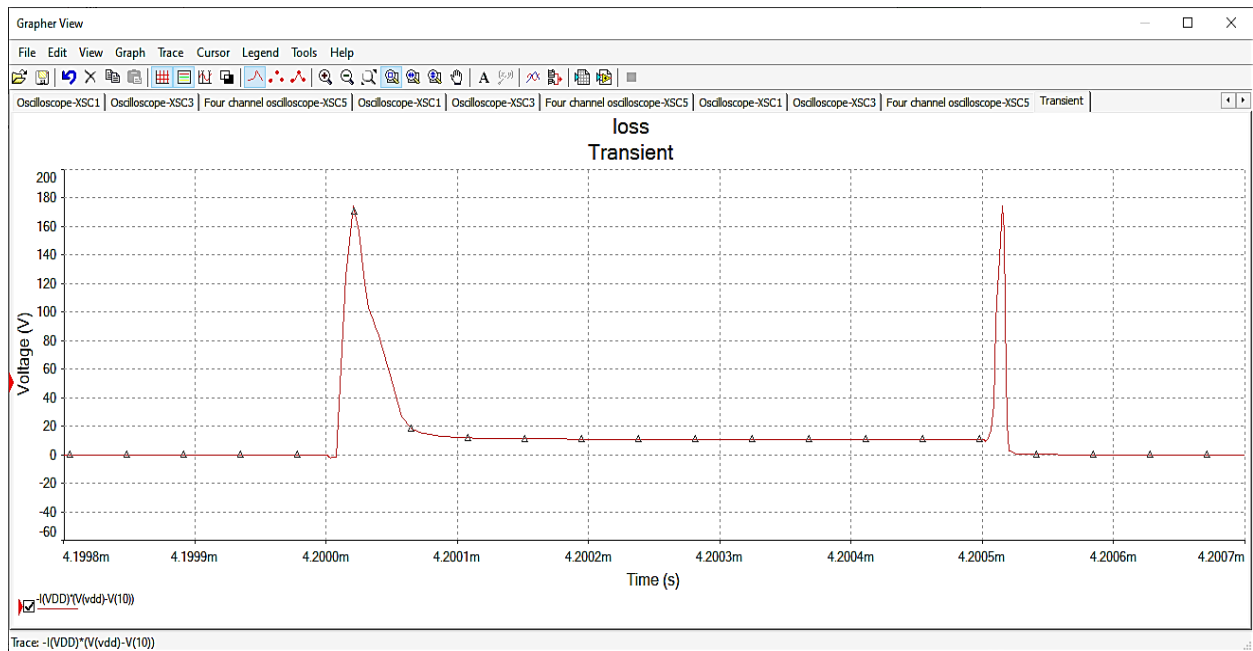
Рис. 9. Дослідна модель визначення параметрів MOSFET-транзистора IRFZ44N з драйвером IR2104

На моделі було визначено:

- перехідні процеси напруги і струму на силовому транзисторі;
- вплив RC-смапера на втрати потужності в силовому транзисторі.
- залежність втрат потужності від частоти комутації;
- Перехідний процес комутації струму та напруги в MOSFET-транзисторі IRFZ44N в NI Multisim наведено на рис. 10.



a



б

Рис. 10. Осцилограми комутації силового транзистора IRFZ44N при комутації струму 25A з резистивним навантаженням:

а – напруга і струм; б – миттєве значення потужності

Як видно з рис. 10, при резистивному навантаженні час ввімкнення MOSFET-транзистора складає 60,25 нс, а час вимикання - 20 нс, що відповідає величинах часів t_{on} і t_{off} , вказаним у документації на транзистор. Максимальне імпульсне значення миттєвої потужності на транзисторі складає 173 Вт.

Середні на періоді значення сумарних втрат потужності, що розсіюються в силовому транзисторі, визначаються як

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \Delta P \cdot dt, \quad (8)$$

де ΔP – миттєве значення втрат потужності на транзисторі.

Залежність сумарних втрат потужності в силовому MOSFET-транзисторі від частоти комутації при постійній скважності в ШІМ (без снаберної ланки) при номінальному навантаженні транзистора 25 А наведено на рис. 11.

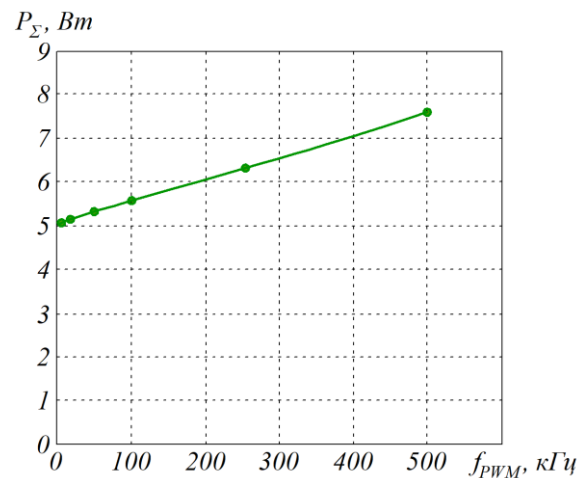
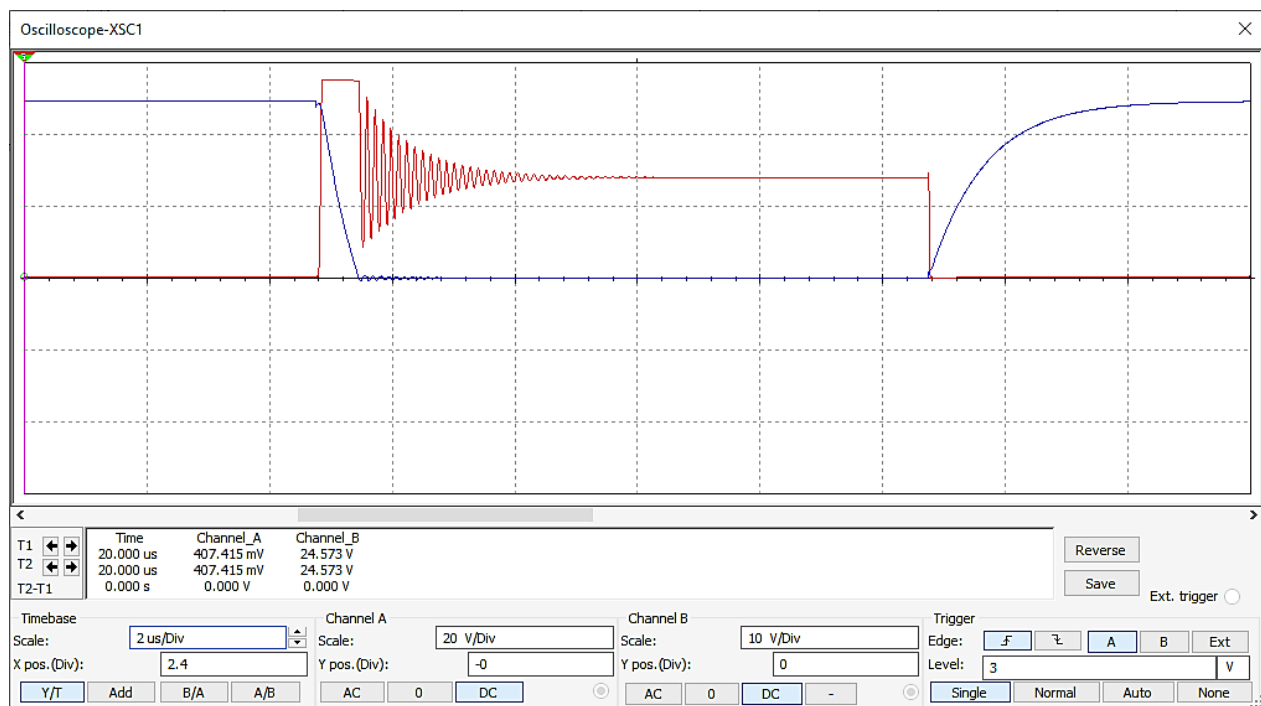
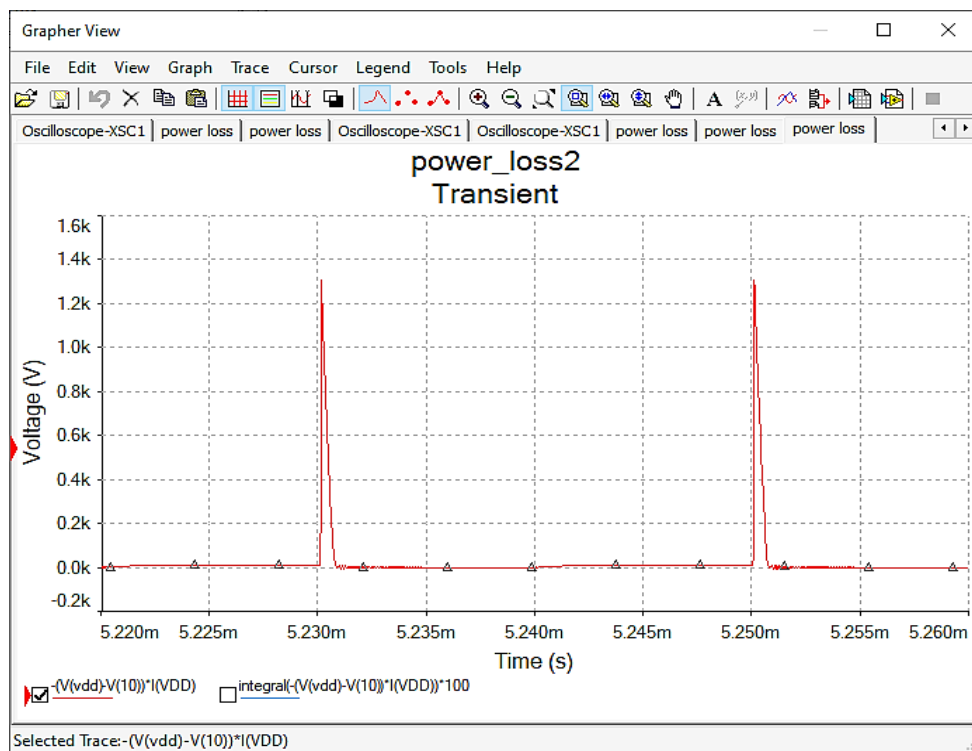


Рис. 11. Залежність сумарних втрат потужності від частоти комутації при резистивному навантаженні

За наявності в колі індуктивного навантаження перехідні процеси струму, напруги та потужності в силовому транзисторі значно змінюються (рис. 12).



а



б

Рис. 12. Осцилограми комутації силового транзистора IRFZ44N при комутації струму 25 А з резистивно-індуктивним навантаженням (1,12 Ом і 1 мкГн):
а – напруга і струм; б – миттєве значення потужності

Як видно з рис. 12, при резистивно-індуктивному навантаженні перехідні процеси в MOSFET-транзисторах суттєво змінюються і набувають коливального характеру напруги на транзисторі при вмиканні. При цьому час ввімкнення та вимкнення MOSFET-транзистора значно збільшується: $t_{on} = 0,750$ мкс, $t_{off} = 3,22$ мкс. Імпульсне значення потужності на транзисторі теж зростає та досягає 1,32 кВт, відповідно при цьому зростає і величина динамічних втрат потужності на транзисторі (рис. 13).

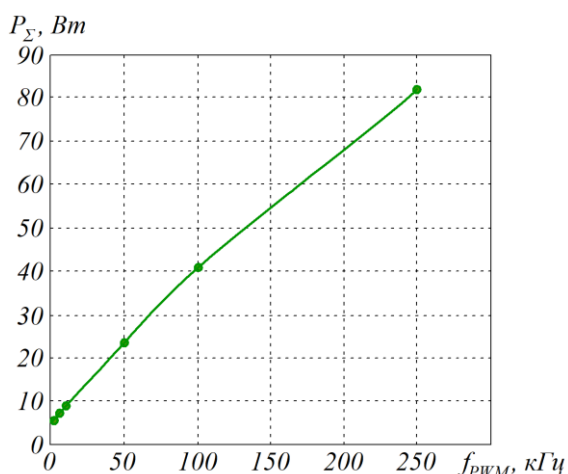


Рис. 13. Залежність сумарних втрат потужності від частоти комутації при резистивно-індуктивному навантаженні

Отже, моделювання в програмному середовищі NI Multisim дає змогу більш точно визначати вплив роботи драйвера, величини опору затвора, роботу снаберів, що впливає на час вмикання та вимкнення транзистора, визначати динамічні втрати, що дозволяє оптимізувати величину втрат потужності. Крім того, суттєвими перевагами NI Multisim є наявність бібліотеки SPICE-моделей досить великої кількості напівпровідникових елементів і мікросхем, таких як силові транзистори, драйвери, ШІМ-контролери та багато інших; можливість задавання температури, що впливає на вольт-амперні характеристики та паразитні параметри ключів.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання

На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- розглянуто перехідний процес у силовому транзисторі під час комутації, що складається з чотирьох інтервалів, кожен з яких визначає динамічні втрати потужності;

- визначено, що моделювання перехідних процесів у силових транзисторах і силових діодах у

програмному середовищі Matlab / Simulink зумовлює ряд недоліків, серед яких відсутність у моделі параметрів паразитних ємностей та індуктивностей, а також нелінійностей вольт-амперних характеристик, внаслідок чого перехідні процеси комутації силових транзисторів відображаються некоректно, а тому визначення динамічних втрат потужності в силових транзисторах є неможливим;

- показано, що в моделях силових транзисторів і діодів у програмному середовищі NI Multisim враховується значно більша кількість параметрів, коректно відображаються вольт-амперні характеристики, а також паразитні індуктивності та ємності, внаслідок чого можна визначати як статичні, так і динамічні втрати потужності в силових транзисторах, а також втрати енергії відновлення силових діодів;

- подано перехідні процеси комутації струму, напруги і потужності, залежність втрат потужності від частоти комутації MOSFET-транзистора IRFZ44N при резистивному, а також резистивно-індуктивному навантаженні, при цьому сигнал керування формується мікросхемою драйвера верхнього плеча IR2104.

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).

Список використаних джерел

1. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Sushko D., Syniavskiy A., Shelest D. Thermal-powerloss approximation method for determination of efficiency in semiconductor devices. 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2022. P. 456–461. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926756.
2. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Research of Operating Modes and Features of Integration of Renewable Energy Sources into the Electric Power System. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2022. P. 133–138. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969337.
3. Arhun S., Hnatov A., Dziubenko O., Ponikarovska S. A device for converting kinetic energy of press into electric power as a means of energy saving. Journal of the Korean Society for Precision Engineering. 2019. Vol. 36, No. 1. P. 105–110. DOI: 10.7736/KSPE.2019.36.1.105.
4. Bogajevskiy A., Arhun S., Hnatov A., Dvadnenko V., Kunicina N., Patlins A. Selection of Methods for Modernizing the Regulator of the Rotation Frequency of Locomotive Diesels. 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical

- Engineering of Riga Technical University (RTUCon)*. 2019. P. 1–6.
DOI: 10.1109/RTUCon48111.2019.8982347.
5. Talbi M., Mensia N., Ganouni R., Ezzaouia H. Modeling of Photovoltaic Panel using Matlab/Simulink and application of P & O Algorithm P & O Algorithm. *2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC)*. 2020. P. 1–6.
DOI: 10.1109/IREC48820.2020.9310396.
 6. Al-Azzawi F. F., Al-Azzawi Z. F., Shandal S. A., Abid F. A. Modulation and RS-CC rate specifications in WiMAX IEEE 802.16 Standard with MATLAB Simulink model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 881. P. 1–10.
DOI: 10.1088/1757-899X/881/1/012109.
 7. Sauvey C. Mathematical Modeling of Electrical Circuits and Practical Works of Increasing Difficulty with Classical Spreadsheet Software. *Modelling*. 2022. Vol. 3 (4). P. 445–463.
DOI: 10.3390/modelling3040029.
 8. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Podnebenna S. Synthesis of a regulator recuperation mode a DC electric drive by creating a process of finite duration. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2021. P. 272–277.
DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575792.
 9. Hussein A., Hawas M. Power quality analysis based on simulation and MATLAB/Simulink. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2019. Vol. 16. 1144.
DOI: 10.11591/ijeecs.v16.i3.pp1144-1153.
 10. Fernando A., GanLim L. Velocity analysis of a six wheel modular mobile robot using MATLAB-Simulink. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1109. 012037.
DOI: 10.1088/1757-899X/1109/1/012037.
 11. Tchorzewski J., Marlega R. The Day-Ahead Market System Simulation Model in the MATLAB and Simulink Environment. *2021 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*. 2021. P. 1–8.
DOI: 10.1109/PAEE53366.2021.9497390.
 12. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Adaptive Modulation Frequency Selection System in Power Active Filter. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 341–346.
DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969261.
 13. Bao H., Zhang W., Yang Y., Chen Y. Calculation and analysis of IGBT power loss in drive system for EV. *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*. 2015. P. 276–277.
DOI: 10.1109/asemd.2015.7453571.
 14. Chen H.-J., Kusic G. L., Reed G. F. Comparative PSCAD and Matlab/Simulink simulation models of power losses for SiC MOSFET and Si IGBT devices. *2012 IEEE Power and Energy Conference at Illinois*. 2012. P. 1–5. DOI: 10.1109/PECI.2012.6184589.
 15. Fediv Y., Sivakova O., Lysiak V., Korchak M. Switching overvoltages protection of power electronics converters with gate turn-off thyristors. *Energy Engineering and Control Systems*. 2021. Vol. 7, No. 2. P. 103–110. DOI: 10.23939/jeecs2021.02.103.
 16. Soskov A., Salabaeva N., Forkun Y., Glebova M. Methods of overvoltage limitation in modern dc semiconductor switching apparatus and their calculation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3/8 (81).
DOI: 10.15587/1729-4061.2016.72533.
 17. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575.
DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.
 18. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 422–427.
DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570071.
 19. Johannesson D., Nawaz M., Norrga S., Hallen A., Nee H.-P. Static and Dynamic Performance Prediction of Ultrahigh-Voltage Silicon Carbide Insulated-Gate Bipolar Transistors. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021. Vol. 36, No. 5. P. 5874–5891.
DOI: 10.1109/TPEL.2020.3027370.
 20. Kuamar H., Ramavenkateswaran N. Low Power High Speed 15-Transistor Static True Single Phase Flip Flop. *2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*. 2019. P. 440–444.
DOI: 10.1109/ICICT46008.2019.8993225.
 21. Gastli A., Kiranyaz S., Hamila R., Ellabban O. Matlab/Simulink Modeling and Simulation of Electric Appliances Based on their Actual Current Waveforms. *2019 2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*. 2019. P. 1–7.
DOI: 10.1109/SGRE46976.2019.9020901.
 22. Szemes P. T., Melhem M. Analyzing and modeling PV with «P&O» MPPT Algorithm by MATLAB/SIMULINK. *2020 3rd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS)*. 2020. P. 1–6.
DOI: 10.1109/SIMS49386.2020.9121579.
 23. Hardan S. S., Hairik H. A., Thejeel R. Matlab/Simulink-Based Modeling of Typical Inductive Power Transfer (IPT) System. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*. 2020. P. 86–92.
DOI: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236534.

24. Lee W.-C., Kuo S.-A. Simulation and Control of a Robotic Arm Using MATLAB, Simulink and TwinCAT. *2020 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS)*. 2020. P. 1–5.
DOI: 10.1109/ARIS50834.2020.9205777.
25. Adsul J., Nair J. M., Vaidya P. P. Design and Simulation of a New Reconfigurable Analog to Digital Converter based on Multisim. *2019 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*. 2019. P. 1–6.
DOI: 10.1109/ICNTE44896.2019.8946032.
26. Khvitia B., Gheonjian A., Kut Chadze Z., Jobava R. Advanced SPICE modeling of large power IGBT modules. *IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*. 2002. Vol. 4. P. 2433–2436·DOI: 10.1109/IAS.2002.1042786.
27. Mirzaee H., Bhattacharya S., Ryu S.-H., Agarwal A. Design comparison of 6.5 kV Si-IGBT, 6.5 kV SiC JBS diode, and 10 kV SiC MOSFETs in megawatt converters for shipboard power system. *2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. 2011. P. 248–253. DOI: 10.1109/ESTS.2011.5770876.
28. Sfakianakis G., Nawaz M., Chimento F. A temperature dependent simple spice based modeling platform for power IGBT modules. *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2014. P. 2873–2879. DOI: 10.1109/ECCE.2014.6953788.
29. Khvitia B., Gheonjian A., Kut Chadze Z., Jobava R. A SPICE Model for IGBTs and Power MOSFETs Focusing on EMI/EMC in High-Voltage Systems. *Electronics*. 2021. Vol. 10. 2822.
DOI: 10.3390/electronics10222822.
30. Azar R., Udrea F., DeSilva M., Amaratunga G., Ng W. T., Dawson F., Waind P. Advanced SPICE Modeling of Large Power IGBT Modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2004. Vol. 40 (3). P. 710–716.
DOI: 10.1109/tia.2004.827456.

Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Philipjeva M. V., Bagach R. V. Improving of simulation accuracy of transient processes and calculation of power losses of semiconductor converters in the NI Multisim program.

Abstract. The article presents a study of the adequacy of modeling transient processes, as well as static and dynamic power losses in power IGBT and MOSFET-transistors in Matlab / Simulink and NI Multisim programs. It is shown that when modeling transient switching processes in power transistors, the Matlab / Simulink does not allow to adequately determine the transient processes of turning on and off power transistors, which leads to the impossibility of determining the energy of turning on the transistor, the energy of turning off the transistor, as well as the recovery energy of power diodes. In addition, the simulation of

static power losses of power diodes and transistors in Matlab / Simulink is carried out with a significant error due to incorrect representation of the current-current characteristics of diodes and IGBT-transistors. It is shown that for more correct and accurate modeling of transient power transistors, including the determination of static and dynamic power losses, it is more expedient to conduct simulations in the Multisim program. Models of power transistors in Multisim take into account more than forty-seven parameters, including temperature characteristics, parasitic input and output capacitances and inductances, nonlinearity of current-voltage characteristics of transistors, and others. In the Multisim, the circuit of the IRFZ44n transistor MOSFET-switch, which is controlled by the IR2104PBF driver, is developed. Adequacy of power transistor turn-on and turn-off times to the data given in the documentation is determined, the nature of transient processes at resistive and resistive-inductive load is given, the dependence of total power losses on the switching frequency is presented. It is shown that the simulation in the Multisim program correctly reflects the transient processes of turning on and off power transistors and the reverse recovery of diodes, which allows determining the dynamic losses of power transistors and power diodes.

Keywords: Matlab, NI Multisim, volt-ampere characteristic, power losses, semiconductor converter, transition process, power transistor.

Надійшла 14.03.2023 р.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: NVP9@i.ua.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>.

Плахтій Олександр Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1535-8991>.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: D.Hordiienko@i.ua.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>.

Філін'єва Марина Віталіївна, аспірантка кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

E-mail: marifil2603@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6499-7493>.

Багач Руслан Володимирович, аспірант кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна. E-mail: bagach.ruslan@yandex.ua.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5319-3683>.

Nerubatskyi Volodymyr, PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: NVP9@i.ua.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>.

Plakhtii Olexandr, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1535-8991>.

Hordiienko Denys, postgraduate of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: D.Hordiienko@i.ua.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>.

Philipjeva Maryna, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: marifil2603@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6499-7493>.

Bagach Ruslan, postgraduate of Department of Vehicle Electronics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: bagach.ruslan@yandex.ua.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5319-3683>.

ПРИХОДЬКО С. І., д.т.н., професор,
ЄЛІЗАРЕНКО А. О., к.т.н., доцент
(Український державний університет залізничного транспорту)

Особливості спільної роботи радіостанцій з різним частотним рознесенням каналів

Ураховуючи систему організації радіозв'язку, що склалася на залізницях, і актуальність питань впровадження більш сучасних технічних засобів, у статті розглянуто основні аспекти спільної експлуатації радіозасобів з різним канальним рознесенням.

У перехідний період будуть одночасно функціонувати радіозасоби з різними смугами випромінювання і приймання. Розроблено рекомендації з упорядкування нумерації, присвоєння та вибору частот. Розглянуто особливості роботи радіостанцій з різним частотним рознесенням і усуненням недопустимих взаємних завад.

Ключові слова: залізничний технологічний радіозв'язок, частотне рознесення каналів, електричні характеристик радіозасобів, умови спільної роботи.

Вступ

На залізницях України склалася розгалужена система мереж радіозв'язку метрового діапазону радіохвиль з кроком канальної сітки 25 кГц. Розроблені нормативні документи з організації радіомереж, розподілу робочих частот між різними службами та розрахунку каналів [1, 2].

У роботі [3] розглянуто основні організаційно-технічні заходи, що безпосередньо впливають з прийнятого рішення про запровадження канальної сітки частот 12,5 кГц для радіозасобів УКХ діапазону, за роботою [4]. Розглянуто принципи визначення номіналів робочих частот, нумерації каналів і поетапність переходу.

Таке рішення відповідає світовому тренду розвитку рухомого радіозв'язку: зменшенню частотного рознесення між сусідніми каналами та поступовій заміні аналогових радіозасобів. При цьому електричні параметри радіостанцій мають задовольняти вимоги ДСТУ 4184:2003 [5], що одночасно нормує параметри радіозасобів з кроком сітки частот 25 і 12,5 кГц.

Зараз актуальні завдання модернізації існуючих мереж за рахунок впровадження сучасних цифрових технічних засобів [6, 7]. Зростання кількості каналів дає змогу запровадити використання цифрових стандартів, що працюють у дуплексному та двочастотному симплексному режимах.

Радіозасоби цифрового стандарту DMR працюють у смугах частот, відведених для залізниць з рознесенням каналів 12,5 кГц [8].

Вітчизняна промисловість вже освоїла випуск радіозасобів з рознесенням каналів 12,5 кГц, що мають

поліпшені техніко-експлуатаційні характеристики, насамперед зменшення маси габаритних показників, енергоспоживання та підвищення надійності [5, 9].

Отже, запровадження сучасних радіозасобів з канальною сіткою 12,5 кГц можна розглядати як перший етап модернізації радіозасобів.

Дозволи на експлуатацію радіозасобів подовжено до закінчення терміну їхньої дії, тому в перехідний період будуть спільно експлуатуватись радіозасоби з різним частотним рознесенням каналів, у яких відрізняються параметри випромінюваних сигналів і характеристики вибіркості, що створює певні проблеми.

Постановка проблеми

Аналіз різних аспектів сумісної роботи радіозасобів з різним частотним рознесенням канальної сітки частот у мережі залізничного технологічного радіозв'язку.

Основні результати

Існуючі мережі залізничного технологічного радіозв'язку метрового діапазону радіохвиль побудовані на основі радіозасобів з рознесенням сусідніх каналів 25 кГц. Були розроблені рекомендації з використання конкретних каналів між різними службами, підрозділами і видами радіозв'язку для організації радіомереж певного призначення [2, 6].

У перехідний період при запровадженні радіозасобів з кроком каналної сітки частот 12,5 кГц слід забезпечити спільну експлуатацію різних радіозасобів. Необхідне розроблення нового частотного плану, який би впорядкував спільну експлуатацію радіозасобів з кроком сітки частот 12,5 кГц і радіозасобів з рознесенням каналів 25 кГц з урахуванням системи нормативно-технічного забезпечення, що склалася.

В усіх нормативно-технічних документах використовують умовну нумерацію каналів, призначених для організації мереж від першого 1 (151,725 МГц) до 133 (156,000 МГц), а відповідні їм робочі частоти можна визначити за сіткою частот.

Для нової сітки частот, на відміну від чинної, пропонується вести нумерацію починаючи з 201 каналу для частоти 151,725 МГц. В обох системах нумерація частот непарних каналів збігаються.

У табл. 1 наведено фрагмент відповідності номерів каналів для сітки з кроком частот 25 і 12,5 кГц. При подальшому впровадженні нових радіозасобів буде розширюватись використання каналів відповідно до сітки частот 12,5 кГц.

У подальшому частотний план буде містити тільки частотні присвоєння з номерами каналів 201 – 464. На наш погляд, використовувати умовні номери каналів зручніше, ніж семизначну цифру несучої частоти.

Таблиця 1

Відповідність номіналів частот і номерів каналів для сітки з рознесенням частот каналів 25 і 12,5 кГц

Частота, МГц	Номер каналу, 25 кГц	Номер каналу, 12,5 кГц	Частота, МГц	Номер каналу, 25 кГц	Номер каналу	Частота, МГц	Номер каналу, 25 кГц	Номер каналу
151,7250	1	201	152,2750	23	245	152,8250	45	289
151,7375		202	152,2875		246	152,8375		290
151,7500	2	203	152,3000	24	247	152,8500	46	291
151,7625		204	152,3125		248	152,8625		292
151,7750	3	205	152,3250	25	249	152,8750	47	293

Окрему проблему при впровадженні нових радіозасобів створюють питання забезпечення електромагнітної сумісності. При розробленні частотно-територіального плану мереж вирішуються питання забезпечення необхідних зон обслуговування та електромагнітної сумісності. Умови уникнення взаємних завад вирішуються за рахунок частотного і територіального рознесення стаціонарних радіостанцій за умов виключення блокування та інтермодуляційних завад.

Найбільш ефективним методом виключення інтермодуляційних завад, особливо на станціях, є підбір інтермодуляційно сумісних частот. Тобто мають бути виключені набори частот, що викликають інтермодуляційні впливи вигляду $2f_1 - f_2 = f_{роб}$. Для кожної категорії абонентів сформовані таблиці рекомендованих частот. При розподілі каналних частот використано груповий підхід. До однієї групи включаються абоненти, пов'язані з територіальним розташуванням або технологічним процесом роботи. Для кожної з радіомереж необхідно використовувати

окрему робочу частоту. При цьому частоти мереж мають бути інтермодуляційно сумісними.

У табл. 2 наведено фрагмент комплексу інтермодуляційно сумісних частот для технологічних абонентів станцій. Показано категорії абонентів, частотні присвоєння та номери каналів у різних системах нумерації.

Це дозволяє використовувати всі чинні нормативні документи з розподілу каналів між різними службами, підбору інтермодуляційно сумісних частот для мереж різного призначення на основі таблиці відповідності каналів.

Для роботи діючих аналогових систем і мереж радіозв'язку в перехідний період може використовуватися крок сітки частот 25 кГц, а при модернізації та будівництві нових аналогових систем і мереж – 12,5 кГц. Аналогові радіозасоби систем і мереж радіозв'язку до модернізації мають працювати в симплексному режимі з використанням однієї і тієї самої частоти для приймання і передачі. Цифрові радіозасоби систем і мереж радіозв'язку мають працювати в режимі двочастотного симплексу або дуплексу.

Фрагмент комплексу інтермодуляційно сумісних частот для технологічних абонентів станцій

Призначення частот		Номер групи каналів					
		1 група			2 група		
		Частота, МГц	Номер каналу 25 кГц	Номер каналу 12,5 кГц	Частота, МГц	Номер каналу 25 кГц	Номер каналу 12,5 кГц
Мережі станційного радіозв'язку для технологічних абонентів	Пункт технічного огляду	151,950	10	219	152,375	27	253
	Станційний технологічний центр	152,025	13	225	152,400	28	255
	Охорона	152,125	17	233	152,800	44	287
	Пункт комерційного огляду	152,175	19	237	152,475	31	261
	Працівники ШЧ	152,500	32	263	152,675	39	277
	Вантажний двір	152,700	40	279	152,625	37	273

Відмінності в параметрах передачі радіостанцій з різним частотним рознесенням каналів призводять до погіршення якості приймання в спільному каналі. Неузгодженість амплітудно-частотної характеристики приймача радіостанцій з характеристиками випромінюваного сигналу призводить до порушення нормальних амплітудних і фазових співвідношень у спектрі сигналу, що приймають. У цьому випадку яка визначає ступінь асиметрії спектру на вході детектора.

Зменшення девіації частоти сигналів, що надходять від передавачів радіостанцій з рознесенням 12,5 кГц, знижує вихідну потужність сигналу приймача радіостанції з рознесенням 25 кГц.

Відповідно до ДСТУ 4184:2003 розрізняються характеристики випромінюваного сигналу. У табл. 3

приймання сигналів у приймачах з вузькою смугою пропускання може супроводжуватися появою нелінійних спотворень. А це викликає не тільки зниження розбірливості мови, але і при певних рівнях припинення приймання інформації через вимикання шумоподавлювачем тракту низької частоти, що реагує на зростання рівня шумів у каналі. Характер спотворень залежить від різниці між частотами f_0 і f_p , наведено основні характеристики випромінювання і вибіркості радіозасобів. Номінальне значення ширини смуги пропускання приймачів приймається на рівні мінус 6 дБ і має бути встановлено в ТУ на радіостанції конкретного типу в межах від 14,5 до 22 кГц, тобто не унормовано так жорстко, як характеристики випромінювання.

Основні характеристики випромінювання і вибіркової радіозасобів

Основні електричні параметри передавача			
Параметр	Значення параметра при номінальній частотній рознесеності між сусідніми каналами, кГц		
	12,5	20	25
1. Максимально допустима девіація частоти, кГц, у межах ¹⁾	±2,50	±4,00	±5,00
2. Відхилення частоти передавача від номінального значення, кГц, у межах, у смузі частот:			
до 47 МГц	±0,600	±0,600	±0,600
від 47 до 137 МГц	±1,00	±1,35	±1,35
від 137 до 300 МГц	±1,00 (Б) ±1,50	±2,00	±2,00
від 300 до 500 МГц	±1,00 (Б) ±2,00 (М)	±2,00	±2,00
від 500 до 1000 МГц	±2,5	±3,00 (М)	±3,00 (М)
3. Ширина смуги частот випромінювання передавача, кГц, не більше, для смуги модульованих частот від 300 до 3000 Гц (від 300 до 3400 Гц) на рівнях:			
мінус 30 дБ - контрольне	11,8 (12,2)	16,00 (16,80)	
мінус 40 дБ	12,1 (12,6)	21,90 (23,10)	
мінус 50 дБ	17,2 (18,1)	27,10 (28,80)	
мінус 60 дБ	22,6 (23,9)	32,90 (35,20)	
Основні електричні параметри приймача			
1. Вибірковість приймача за сусідніми каналами, дБ, не менше	50,00 (60,00) ¹⁾	60,00 (70,00) ¹⁾	60,00 (70,00) ¹⁾
2. Вибірковість приймача за побічними каналами, дБ, не менше	65,00(700,00) ¹⁾		
3. Максимальна чутливість приймача, мкВ, не більше:			
- для мови	4 (2) ¹⁾		
- даних	2,8 (1,4) ¹⁾		
4. Інтермодуляційна вибірковість приймача від завад, дБ, не менше:			
- для базових (Б) станцій	65,00 (70,00) ¹⁾		
- рухомих станцій (М)	60,00 (65,00) ¹⁾		
5. Погіршення чутливості в дуплексному режимі, дБ, не більше	3,0		
6. Коефіцієнт помилок за бітами	10 ⁻⁴		

Примітка. ¹⁾ При нормальних кліматичних умовах і номінальній напрузі живлення.

На графіках рисунка показано характеристики випромінювання сигналів з різними параметрами девіації частоти і каналного рознесення сигналів. Крива 1 відповідає характеристиці випромінювання при рознесенні каналів 12,5 кГц, а крива 2 – при

рознесенні каналів 25 кГц. Для порівняння показано характеристики випромінювання при рознесенні між робочими частотами 12,5 кГц.

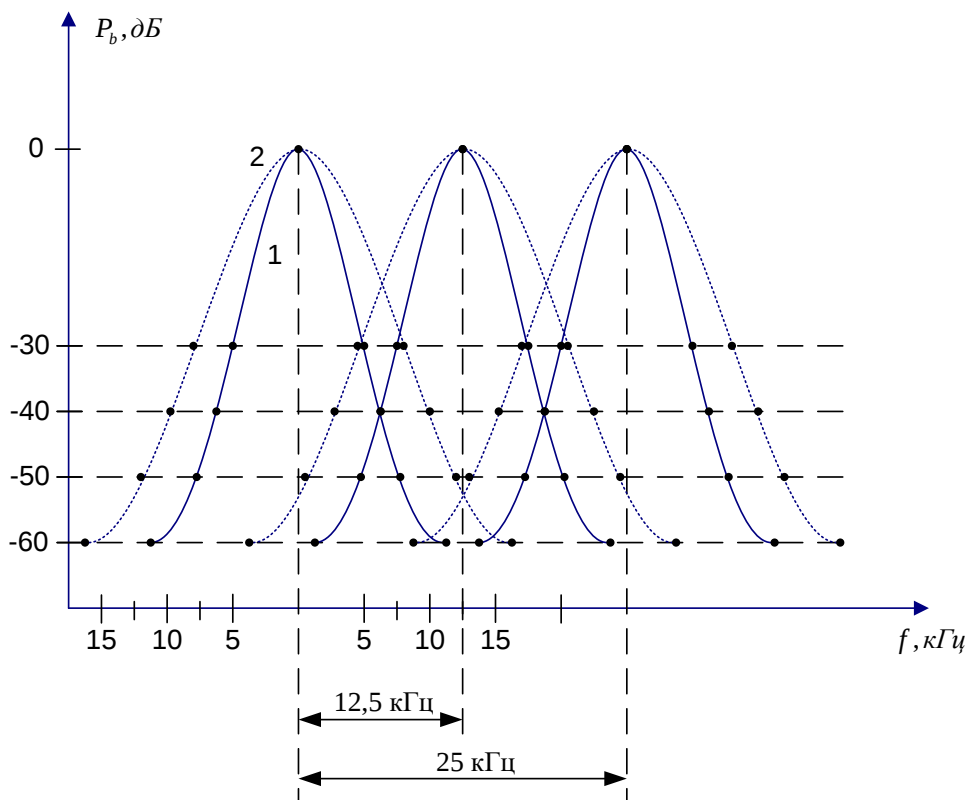


Рис. Характеристики випромінювання радіозасобів з різним частотним рознесенням каналів

Безпосередньо з аналізу випромінюваних сигналів на рисунку впливає можливість перекриття спектрів випромінюваних сигналів з кроком 25 і 12,5 кГц на сусідніх каналах. Для мінімізації взаємних впливів, що заважають між мережами різного призначення, не рекомендується використовувати номінали частот сусідніх радіочастотних каналів при кроці сітки частот 12,5.

Графіки дають уявлення про різницю характеристик випромінюваних сигналів при різній девіації частоти. При прийманні сигналів з більшою девіацією в приймачах з рознесенням 12,5 кГц нелінійні спотворення сильно залежать від відповідності частоти сигналу центральній частоті смуги пропускання тракту проміжної частоти. Ця обставина накладає більш жорсткі вимоги щодо точності установлення частот передавачів і приймачів і зобов'язує постійно контролювати їх у процесі сумісної експлуатації.

У цілому спостерігається високий рівень розбірливості мови при роботі радіозасобів з різним частотним рознесенням, що можна пояснити двома причинами. По-перше, реальні мовні сигнали створюють девіацію частоти в передавачі істотно менше допустимої, тому спотворення сигналу будуть незначні. По-друге, збільшення коефіцієнта гармонік у

певних межах не має значного впливу на розбірливість мови, лише дещо підвищує поріг чутності внаслідок маскування, створюваного гармоніками корисного коливання.

При прийманні сигналів від радіостанцій з меншою девіацією частоти зниження вихідної напруги в цілому незначне, і вихідна потужність приймача зменшується не більш ніж на 15 %.

Для забезпечення електромагнітної сумісності радіомереж необхідно, щоб на вході приймачів рівні сигналів від радіостанцій, що заважають, не перевищували допустимого значення для цього виду впливів

$$U_{2зав} \leq U_{2зав.дон} \quad (1)$$

Блокування нормується в параметрах вибірконості, хоча є динамічним діапазоном співвідношення заважаючого та корисного сигналів. При збільшенні корисного сигналу може зрости і заважаючий. Тому допустимий рівень заважаючого сигналу в цьому випадку визначають як

$$U_{2зав.дон.(Бт)} = S_{н2} + \Delta S_2(\Delta f) + U_{2мін} \quad (2)$$

де $U_{2зав.доп(Б)} -$ допустимий рівень заважаючого сигналу;

$S_{н2}$ – нормативне значення двосигнальної вибіркової по сусідньому каналу, дБ;

$\Delta S_2(\Delta f)$ – додаткове збільшення двосигнальної вибіркової при збільшенні частотного рознесення між каналами, дБ;

U_{2min} – мінімальний рівень корисного сигналу, прийнятий у радіомережі, дБ.

За нормативними показниками стандарту [5], дещо погіршується забезпечення умов ЕМС для радіозасобів з рознесенням 12,5 кГц. Вибірковість по сусідньому каналу при кроці сітки частот 12,5 кГц складає 50 дБ, а для кроку 25 кГц – 60 дБ. Зменшення вибіркової по сусідньому каналу потребує збільшення територіального та частотного рознесення між антенами радіостанцій. Збільшення показника двосигнальної вибіркової на 10 дБ досягається приблизно при збільшенні частотного рознесення каналів на 150 – 200 кГц.

Для ділянок змінного струму просторове рознесення антен стаціонарних радіостанцій при роботі на сусідніх каналах при $U_{2min}=14\text{дБмкВ}$ становить $r_{np}=570\text{м}$, а на ділянках з постійним струмом у результаті зменшення прийнятого рівня корисного сигналу $U_{2min}=8\text{дБмкВ}$ просторове рознесення зростає до $r_{np}=850\text{м}$.

При конкретному частотно-територіальному плануванні вирішення питань забезпечення електромагнітної сумісності між радіостанціями з різним частотним рознесенням каналів може бути здійснено на основі розрахунків умов ЕМС за методикою [1] при відповідних параметрах вибіркової.

Висновки

1. Запровадження каналної сітки частот з рознесенням 12,5 кГц створює низку організаційно-технічних питань розподілу, створення та спільної роботи радіозасобів.

2. Розроблено пропозиції з нумерації, розподілу та використання радіочастот у скорегованому частотному плані.

3. Запропоновано накладений метод присвоєння радіочастот, при якому всі значення номіналів непарних частот каналів збігаються, що дає змогу в перехідний період зберегти нормативні документи з призначення робочих частот каналів і спростити забезпечення електромагнітної сумісності. При цьому забезпечується збереження умов ЕМС при відповідному виборі робочих частот і дальності

радіозв'язку при частковому використанні існуючої інфраструктури.

4. Робота в спільному каналі радіостанцій з різною дев'ятию частоти може бути врегульована за рахунок корегування амплітудно-частотних характеристик тракту приймання.

Список використаних джерел

1. Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку ЦШ-0058. Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця. Київ, 2009. 123 с.
2. План використання радіочастотного ресурсу України: затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 09.06.2006 р. № 815. Бюлетень Національної комісії з питань регулювання зв'язку України. Київ, 2006. № 6. 174 с.
3. Приходько С. І., Єлізаренко А. О. Перехід залізничного технологічного радіозв'язку на каналну сітку частот з кроком 12,5 кГц. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: науково-технічний журнал*. Харків: УкрДУЗТ, 2021. № 3 (додаток). С. 2-3.
4. Про впровадження каналної сітки радіочастот 12,5 кГц для засобів зв'язку УКХ діапазону: рішення НКРЗІ № 411 від 19.10.2006 р. URL: <https://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=122&id=3876&language=uk>.
5. ДСТУ 4184:2003. Радіостанції з кутовою модуляцією суходільної рухомої служби. Класифікація. Загальні технічні вимоги. Методи вимірювання. Київ, 2003. 50 с.
6. Гончаренко В. І., Карлін В., Медведєв Я. Єдина платформа для організації цифрового технологічного радіозв'язку стандарту DMR. *Українська залізниця*. 2018. № 1-2. С. 20-26.
7. Ваванов К. Ю. Вибір перспективної технології для побудови мереж цифрового радіозв'язку. *Українська залізниця*. 2018. № 1-2. С. 16-19.
8. Standard ETSI 102361-1 v1.4.5. Elektromagnetik compatibility and Radio spectrum Matters. Digital Mobile Radio (DMR) Systems. Part 1. DMR AIR Interface hrotocol – France. ETSI, 2007. 172 с.
9. Технологічний процес обслуговування та ремонту радіостанцій «Оріон РВ-4», «Оріон РС-6». Київ, 2008. 207 с.

Prykhodko Sergii, Yelizarenko Andrii.
Peculiarities of joint operation of radio stations with different frequency diversity of the channel frequency grid.

Abstract. The existing networks of railway technological radio communication of the meter range of radio waves are built on the basis of radio equipment with a diversity of adjacent channels of 25 kHz. In the transition period, it is

necessary to ensure the joint operation of various radio equipment when introducing radio equipment with a frequency channel grid step of 12.5 kHz.

The paper proposes a unified numbering of channel assignments of radio networks based on the principle of superimposed frequency grid. This allows you to use all current regulatory documents on the distribution of channels between different services, the selection of intermodulation compatible frequencies for networks of various purposes based on the channel compatibility table. At the same time, the frequencies of all odd channel numbers in different numbering systems will match.

In radio communication channels, when transmitting signals with a maximum deviation of 5 kHz and in receivers with a frequency difference of 12.5 kHz, there is a discrepancy between the radiation parameters and the bandwidth of the receiver. When the nominal frequencies of transmission and reception differ, nonlinear distortions increase, which leads to a decrease in speech intelligibility. When transmitting signals in the reverse direction, the reception volume deteriorates in receivers with a channel separation of 25 kHz. Studies have shown that when radio stations with different frequency deviations work together, satisfactory conditions can be ensured by adjusting the amplitude-frequency characteristics of the transmission and reception paths.

When using radio stations with a channel spacing of 12.5 kHz, the conditions for ensuring electromagnetic compatibility deteriorate somewhat. But with the appropriate choice of operating frequencies, the preservation of the conditions of electromagnetic

compatibility and radio communication range is ensured, with partial use of the existing infrastructure.

Keywords: railway technological radio communication, frequency diversity of channels, electrical characteristics of radio equipment, conditions of joint work.

Надійшла 06.04.2023 р.

Приходько Сергій Іванович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: tz@kart.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6535-8351>.

Єлізаренко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: elizarenko1@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>.

Prykhodko Sergii, Doctor of sciences (engineering), Professor, chief of department of transport communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv. E-mail: tz@kart.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6535-8351>.

Yelizarenko Andriy, Associate Professor of transport communication department, Candidate of Techn. Sciences, PhD, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: elizarenko1@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>.

КРАШЕНІНІН О. С., д.т.н., професор (Український державний університет залізничного транспорту),

ЯКОВЛЕВ С. С., к.т.н. (Регіональна філія «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця»),

ЗАЛАТА А.С., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту),

ГОЛОВКО Я. О., магістр (Український державний університет залізничного транспорту)

Оцінювання факторів, що забезпечують надійність роботи системи локомотива

В умовах повільного оновлення тягового рухомого складу і дефіциту нового парку локомотивів для багатьох депо стає актуальним зосередження уваги на підвищенні надійності роботи основного обладнання і систем локомотивів.

У статті на підставі аналізу теоретичних підходів впливу складових елементів систем локомотива на загальну надійність системи виділено спеціальні критеріальні фактори, що виражають приріст кількісних і якісних показників надійності.

Оцінювання цих факторів дає змогу визначити системи локомотивів, що забезпечують максимальний приріст надійності, а при дублюванні елементів систем підвищувати кількісний приріст надійності. Крім того, показана можливість визначити пріоритети (чергу) відновлення елементів систем для забезпечення надійності системи.

Ключові слова: тяговий рухомий склад, елементи системи, якісні і кількісні фактори надійності, автономний рухомий склад, енергетичні характеристики, надійність, прогнозування ресурсу

Постановка проблеми

Залізничний транспорт з великою напругою і втратами продовжує забезпечувати країну послугами на перевезення вантажів і пасажирів. Загальний стан залізничного транспорту щороку погіршується з багатьох причин, у тому числі через повільний процес оновлення ремонтної інфраструктури і навіть її повну втрату. Але завдяки професіоналізму і задіяння всіх можливих резервів залізничний транспорт залишається основним постачальником послуг для перевезення. Проте ресурси залізниць не безмежні, особливо під час воєнних дій, що потребує впровадження нових інноваційних технологій відновлення і контролю технічного стану систем локомотивів.

Зміна дислокації ресурсів локомотивних депо в інші депо, що знаходяться поза зоною небезпеки, залучення до організації системи експлуатації і утримання локомотивного парку спеціалістів і вчених з інших галузей промисловості і науки дасть можливість відшукати нові підходи в цій справі.

Залишаються актуальними питання модернізації систем локомотивів на основі якісних і кількісних підходів з підвищення їхньої надійності. Опрацювання варіантів і поєднання варіантів цих підходів дасть можливість визначитися з пріоритетами при модернізації систем локомотивів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останній час багато досліджень було спрямовано на проблеми оптимізації витрат на систему утримання локомотивів як щодо періодичності проведення ТО, ПР, так і корегування обсягів робіт [1].

Так, у роботах [2, 3] розглянуто проблеми оцінювання витрат з метою їхньої мінімізації на утримання локомотивів за життєвий цикл.

А в роботах [4, 5] розглядалися прикладні аспекти запровадження нового ремонтного і діагностичного обладнання в локомотивних депо.

Значна увага приділялася питанням утримання закордонного рухомого складу, для якого за період експлуатації не проведено жодного капітального ремонту, а великі деповські ремонти не завжди відповідали вимогам постачальників [6].

Тому в роботах [7-9] значна увага приділена питанням запровадження змішаної системи утримання локомотивів, включаючи технології ТО, ПР за технічним станом.

Разом з тим опрацьовуються питання ефективності модернізації системи і локомотивів у цілому в рамках життєвого циклу [10, 11, 14-16]. Але слід опрацьовувати питання математичної оцінки рішень, пов'язаних з підвищенням надійності систем локомотивів.

Мета статті полягає в оцінюванні факторів, що забезпечують надійність роботи систем локомотивів за рахунок приросту складових надійності елементів систем (підсистем) у якісному і кількісному сенсі.

Відповідно з цим сформульовано такі завдання:

1. Обрати підсистеми, що мають критичний вплив на надійність системи для першочергового обслуговування.

2. Оцінити приріст надійності за рахунок дублювання підсистем.

3. Оцінити раціональний пріоритет (чергу) при відновленні надійності підсистем.

Виклад основного матеріалу

Одним з найважливіших етапів формування технічної системи є раціональна побудова її структури для можливості визначення недосконалостей і раціонального впливання на неї.

Для кількісного оцінювання надійності, що передбачає визначення надійності при дублюванні елементів системи і є безрозмірним (оскільки обумовлено множиною ймовірностей), а також можливості з'ясування ролі і впливу конкретних підсистем на загальну надійність, запропоновані спеціальні характеристики: ваги, значущості і внеску в забезпечення надійності системи.

Так, «вагу» функції в ортогональній диз'юнктивній нормальній формі (ОДНФ) можна подати як

$$G\{y(x_1, \dots, x_n)\} = \sum_j 2^{n-z_j} \sum_f 2^{n-z_f} \sum_g 2^{n-z_g}, \quad (1)$$

де $j = 1, \dots, i$; $f = 1, \dots, k$; $g = 1, \dots, p$; $i + k + p = m$;

z_j, z_f, z_g – ранги елементарних кон'юнкцій;

l, k, p – кількість кон'юнкцій, що містять x_i ;

x_i – i -й елемент системи не включає i -й аргумент;

m – загальна кількість кон'юнкцій у вихідній функції алгебри логіки;

n – кількість незалежних змінних вихідної функції.

Характеристику «значущості» функції в ОДНФ, за роботою [1], записують як

$$E_{x_i} = \frac{\partial P\{y(x_1, \dots, x_n) = 1\}}{\partial P\{x_i = 1\}} = \frac{\partial R_c}{\partial R_i}. \quad (2)$$

Тобто це є частинна похідна від імовірності безвідмовної роботи системи R_c за імовірністю безвідмовної роботи підсистеми R_i .

А для монотонних структур

$$E_{x_i} = \frac{\partial R_c}{\partial R_i} = R_{c_i}^{(i)} - R_{c_0}^{(i)}, \quad (3)$$

де $R_{c_i}^{(i)} = P\{y_1^{(i)}(x_1, \dots, x_n) = 1\}$ – імовірності безвідмовної роботи системи при абсолютній надійності і абсолютній відмові підсистеми x_i .

Монотонна структура відповідає таким умовам:

1. При втраті всіма елементами працездатності і система втрачає працездатність.

2. При відновленні всіх елементів і вся система відновлюється.

3. При відмові будь-якого елемента системи технічний стан системи тільки погіршується.

І саме до таких систем належать усі системи локомотива і локомотив у цілому.

Характеристика «внесків» підсистеми x_i у надійність системи $y(x_1, \dots, x_n)$ є величиною імовірності безвідмовної роботи підсистеми R_i на його «значущість» [13].

$$B_{x_i} = R_i \frac{\partial R_c}{\partial R_i} = R_i \frac{R_{c_i} - P_{c_0}^{(i)}}{R_i} = R_{c_i} - R_{c_0}^{(i)}. \quad (4)$$

Цей критерій характеризує приріст надійності системи після відновлення підсистеми x_i з непрацездатного стану в працездатний.

Характеристика «відносний внесок» підсистеми x_i у надійність системи $y(x_1, \dots, x_n)$ є нормованим «внеском» цієї підсистеми.

$$b_{x_i} = \frac{B_{x_i}}{\sum_{i=1}^n B_{x_i}}. \quad (5)$$

Усі наведені характеристики оцінювання відновлюваності підсистеми мають різний інформаційний сенс. Так, критерій «вага» підсистеми g_{x_i} характеризує тільки місце знаходження цієї підсистеми x_i в структурі системи $y(x_1, \dots, x_n)$.

Критерій «значущості» підсистеми ξ_i – ще і залежність від імовірності безвідмовної роботи всіх інших підсистем, систем, крім самої i -ї підсистеми.

А критерій «внесок» підсистеми B_{x_i} включає всі складові, у тому числі i -ту підсистему.

Оскільки функція надійності R_c залежить від P_i лінійно, то «значущість» підсистем X_i чисельно дорівнює приросту надійності системи при зміні R_i від нуля до одиниці.

У загальному випадку приріст надійності системи дорівнює

$$\Delta R_c = \frac{\partial R_c}{\partial R_i} \Delta R_i. \quad (6)$$

Існує два шляхи підвищення потрібної імовірності безвідмовної роботи системи виключаючи

відновлення:

- якісне підвищення надійності підсистем за рахунок кращих матеріалів, сучасних технологій, модернізації ΔR_c як;

- кількісне підвищення надійності підсистем за рахунок резервування окремих підсистем ΔR_c як.

Загалом приймають за нульовий рівень і початок підрахунку ΔR_c як структуру системи при рівнонадійних підсистемах з $R_i = Q_i = 0,5$. Для реальних підсистем, як правило, $R_i > 0,5$ і

$$\Delta R_{c, як} = \sum_{i \in M_1} 2^{-n+1} \Delta R_i + \sum_{i, j \in M_2} 2^{-n+2} \Delta R_i \Delta R_j + \sum_{i, j, \dots, k \in M_l} 2^{-n+l} \Delta R_i \Delta R_j \dots \Delta R_k + \Delta R_1 \Delta R_2 \dots \Delta R_n. \quad (7)$$

Якщо за нульовий рівень якісного приросту надійності системи взяти будь-який рівень, можна скористатися виразом [12, 13]

$$\Delta R_{c, як} = \sum_{i \in M_1} \frac{\partial R_c}{\partial R_i} \Delta R_i + \sum_{i, j \in M_2} \frac{\partial^2 R_c}{\partial R_i \partial R_j} \Delta R_i \Delta R_j + \sum_{i, j, \dots, n \in M_l} \frac{\partial^l R_c}{\partial R_i \partial R_j \dots \partial R_k} \Delta R_i \Delta R_j \dots \Delta R_k + \dots + \Delta R_1 \Delta R_2 \dots \Delta R_n \quad (8)$$

У загальному випадку при дублюванні декількох підсистем до максимальної можливої їхньої кількості n маємо [13]

$$\Delta R_{к, л} = \sum_{i \in M_1} R_i Q_i \frac{\partial R_c}{\partial R_i} + \sum_{i, j \in M_2} R_i R_j Q_i Q_j \frac{\partial^2 R_c}{\partial R_i \partial R_j} + \sum_{i, j, \dots, k \in M_2} R_i R_j \dots R_k Q_i Q_j \dots Q_k \frac{\partial^2 R_c}{\partial R_i \partial R_j \dots \partial R_k} + R_i R_j \dots R_n Q_i Q_j \dots Q_n. \quad (9)$$

Будемо вважати локомотив системою, що складається з послідовно з'єднаних підсистем, і визначимо якісний і кількісний приріст надійності як функцію працездатності системи

$$y_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_i, x_j, x_n,$$

де $x_i, \dots, x_n$ – відповідні характеристики працездатного стану i -підсистем.

Проілюструємо методику оцінювання зазначених критеріїв на прикладі визначення впливу якісних і кількісних приростів надійності для послідовної структури, якою подається паливна система тепловоза.

У цьому випадку приймаємо такі позначення:

x_1 – характеристика працездатного стану паливопідкачуючого насоса;

x_2 – характеристика працездатного стану фільтра грубого очищення палива;

x_3 – характеристика працездатного стану фільтра тонкого очищення палива;

x_4 – характеристика працездатного стану паливного насоса високого тиску;

x_5 – характеристика працездатного стану форсунок.

Інші елементи паливної системи не розглядаються, оскільки забезпечують функціонування обраних підсистем і фактично характеризують їхню загальну надійність.

Як характеристику працездатності стану цієї системи оберемо імовірність безвідмовної роботи P_i :

$$P_1 = 0,8; P_2 = 0,7; P_3 = 0,9; P_4 = 0,95; P_5 = 0,9.$$

Визначимо нульовий рівень надійності цієї системи $P_{c, поч.}$ при

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = 0,5,$$

$$P_{c, поч.} = 0,5^5 = 0,03125.$$

Відшукаємо якісне припущення надійності відповідно припущення ΔP_i :
паливної системи за формулою (7), приймаючи

$$\Delta P_1 = P_1 - 0,5 = 0,3; \Delta P_2 = P_2 - 0,5 = 0,2; \Delta P_3 = P_3 - 0,5 = 0,4; \Delta P_4 = P_4 - 0,5 = 0,45; \Delta P_5 = P_5 - 0,5 = 0,4.$$

Тоді

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{с, як.}} = & 2^{-5+1}(0,3+0,2+0,4+0,45+0,4) + \\ & + 2^{-5+2}(0,3*0,2+0,3*0,4+0,3*0,45+0,3*0,4 + \\ & + 0,2*0,4+0,2*0,45+0,2*0,4+0,4*0,45+0,4*0,4 + \\ & + 0,45*0,4) + 2^{-5+3}(0,3*0,2*0,4+0,3*0,2*0,45 + \\ & + 0,3*0,2*0,4+0,2*0,4*0,45+0,2*0,4*0,4 + \\ & + 0,2*0,45*0,4+0,4*0,45*0,4+0,3*0,4*0,45 + \\ & + 0,3*0,4*0,4) + 2^{-5+4}(0,3*0,2*0,4*0,45+0,3*0,2*0,4*0,4 + \\ & + 0,3*0,4*0,45*0,4+0,3*0,2*0,45*0,4+0,2*0,4*0,45*0,4) + \\ & + 0,3*0,2*0,4*0,45*0,4 = 0,3987 \end{aligned}$$

Тоді загальна надійність за рахунок підвищення
якісних показників складе

$$P_{\text{с}_1} = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (11)$$

$$P_{\text{с}_1} = P_{\text{с}_{\text{поч.}}} + \Delta P_{\text{с, як.}},$$

(10)

$$P_{\text{с}_1} = 0,8*0,7*0,9*0,95*0,9 = 0,43.4$$

$$P_{\text{с}_1} = 0,03125 + 0,3987 = 0,43.$$

Визначимо «вагу» і «значущість» окремих
підсистем при підвищенні надійності системи за
формулами (1) і (2):

Перевіримо правильність розрахунку іншим
способом за формулою

$$\text{«Вага»}: g_{x_1} = g_{x_2} = g_{x_3} = g_{x_4} = g_{x_5} = 2^{-n+1} = 2^{-4} = 0,063.$$

$$\text{«Значущість»}: E_{x_1} = P_2 * P_3 * P_4 * P_5 = 0,7*0,9*0,95*0,9 = 0,539.$$

$$E_{x_2} = P_1 * P_3 * P_4 * P_5 = 0,8*0,9*0,95*0,9 = 0,6156;$$

$$E_{x_3} = P_1 * P_2 * P_4 * P_5 = 0,8*0,7*0,95*0,9 = 0,479;$$

$$E_{x_4} = P_1 * P_2 * P_3 * P_5 = 0,8*0,7*0,9*0,9 = 0,454;$$

$$E_{x_5} = P_1 * P_2 * P_3 * P_4 = 0,8*0,7*0,9*0,95 = 0,479.$$

Кількісний приріст надійності при дублюванні, за
формулою (6),

$$\Delta P_{\text{с}_1 \text{ кил.}} = E_{x_1} * P_1 * Q_1 = E_{x_1} P_1 (1 - P_1) = 0,539 * 0,8 * 0,2 = 0,086,$$

$$\Delta P_{\text{с}_2 \text{ кил.}} = 0,616 * 0,7 * 0,3 = 0,129,$$

$$\Delta P_{\text{с}_3 \text{ кил.}} = 0,479 * 0,9 * 0,1 = 0,043,$$

$$\Delta P_{\text{с}_4 \text{ кил.}} = 0,454 * 0,95 * 0,05 = 0,022,$$

$$\Delta P_{\text{с}_5 \text{ кил.}} = 0,479 * 0,9 * 0,1 = 0,043.$$

Тобто якщо є можливість резервувати одну підсистему, то це має бути підсистема грубого очищення палива, оскільки значення $\Delta P_{c_2 \text{ кіл.}} = 0,129$ є максимальним.

Система з дубльованою підсистемою x_2 (x_6 – дублююча підсистема) має вигляд

$$y_2(x_1, x_2, \dots, x_6) = x_1 \left| \begin{smallmatrix} x_2 \\ x_6 \end{smallmatrix} \right| x_3 \cdot x_4 \cdot x_5.$$

Тоді

$$P_{c_2} = P_{c_{нач.}} + \Delta P_{c_2 \text{ як.}} + \Delta P_{c_{кіл.}}, \quad (12)$$

$$P_{c_2} = 0,0315 + 0,3987 + 0,129 = 0,56.$$

$$y_3(x_1, \dots, x_6, x_7) = \left| \begin{smallmatrix} x_1 \\ x_7 \end{smallmatrix} \right| \left| \begin{smallmatrix} x_2 \\ x_6 \end{smallmatrix} \right| x_3 \cdot x_4 \cdot x_5,$$

$$\Delta P_{c_3 \text{ кіл.}} = E_1 \cdot P_1 \cdot Q_1 + E_2 \cdot P_2 \cdot Q_2 + P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 \cdot Q_4 \cdot Q_5,$$

$$\Delta P_{c_3 \text{ кіл.}} = 0,086 + 0,129 + 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,9 \cdot 0,2 \cdot 0,3 = 0,24.$$

Звідси

$$P_{c_3} = P_{c_{нач.}} + \Delta P_{c_3 \text{ як.}} + \Delta P_{c_3 \text{ кіл.}} = 0,03185 + 0,3987 + 0,24 = 0,67.$$

Або іншим способом перевіримо можливість дублювання першої та другої підсистем:

$$P_{c_3} = (1 - (1 - P_1)^2)(1 - (1 - P_2)^2) \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5, \quad (15)$$

$$P_{c_3} = (1 - 0,2^2)(1 - 0,3^2) \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,9 = 0,67.$$

Як видно з розрахунків, при дублюванні підсистем паливоподачі і грубого очищення палива можна підвищити надійність відносно діючої системи і при дублюванні тільки другої підсистеми відповідно.

$$\Delta P_I = P_{c_3} - P_{c_1},$$

$$\Delta P_{II} = P_{c_3} - P_{c_2},$$

$$\Delta P_{III} = P_{c_2} - P_{c_1},$$

$$\Delta P_{III} = 0,56 - 0,43 = 0,13,$$

$$\Delta P_I = 0,67 - 0,43 = 0,24,$$

$$\Delta P_{II} = 0,67 - 0,56 = 0,11.$$

Висновки з дослідження і перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі

На підставі викладеного надійності системи можна подати як суму початкової надійності і складових їхнього якісного і кількісного приросту.

Або це значення отримуємо як

$$P_{c_2} = P_1(1 - (1 - P_2)(1 - P_6)) \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5. \quad (13)$$

При $P_2 = P_6 = 0,7$

$$P_{c_2} = P_1(1 - (1 - P_2)^2) \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5, \quad (14)$$

$$P_{c_2} = 0,8(1 - 0,3^2) \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,9 = 0,56.$$

Розглянемо можливість дублювання першої та другої підсистем за формулою (9):

1. Показано, що критерій «значущість» підсистеми дає змогу визначити підсилення, що забезпечує максимальний приріст надійності. А саме для підсистеми грубого очищення палива $E_{x_2} = 0,6156$.

2. При запровадженні дублювання підсистеми слід керуватися значеннями кількісного приросту надійності системи. Як видно з розрахунків, при дублюванні однієї підсистеми надійність зросла на 13 %, а при дублюванні двох підсистем – до 24 %.

3. Показано, що використання критерію «внеску» дає змогу раціонально визначити черговість відновлення підсистеми.

У цьому випадку найбільше підвищення надійності забезпечено при грубому очищенні палива, за порівнянням значення $\Delta P_{c \text{ кіл.}}$.

Список використаних джерел

- Капіца М. І., Коренюк Р. О. Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів. *Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпро, 2012. Вип. 40. С. 63–67.
- Калабухін Ю. Є. Теоретичні положення оцінки техніко-економічних показників функціонування тягового рухомого складу протягом життєвого циклу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Сєвєродонецьк, 2010. № 1. Ч. 2. С. 75–80.

3. Понтиселли К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава: от теории к практике. *Техника железных дорог*. 2009. № 4 (8). С. 19-24.
 4. Крашенінін О. С., Фалендиш А. П. Організація технологічних процесів ремонту ТРС із застосування засобів діагностування. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. Харків, 2004. Вип. 57. С. 31–34.
 5. Крашенінін О. С., Пузир В. Г., Крамчанін І. Г. Автоматизована розробка технологічних процесів обслуговування тепловозів за допомогою ПЕОМ. *Міжвузівський збірник наукових праць ХарДАЗТ*. Харків, 2000. Вип. 41. С. 42–47.
 6. Крашенінін О. С., Яковлев С. С., Шапатіна О. О. Обґрунтування стратегії організації технічного обслуговування, поточного ремонту швидкісного рухомого складу в умовах України. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2021. Т. 26. № 3. С. 7-11.
 7. Крашенінін О. С., Щипак Є. В., Шапатіна О. О. Обґрунтування обсягів ремонту для ТРС при подовженні терміну експлуатації. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. Донецьк, 2009. Вип. 19. С. 137 – 141.
 8. Крашенінін О. С., Шапатіна О. О., Обозний О. М. Моделювання технічного обслуговування та поточних ремонтів ТРС при подовженні терміну його експлуатації. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. Харків, 2010. Вип. 119. С. 172–177.
 9. Крашенінін О. С., Яковлев С. С., Задесенець В. І. Обґрунтування критерію ефективності експлуатації локомотивів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2020. Т. 25. № 4. С. 10-14.
 10. Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава сторонними компаниями. *Железные дороги мира*. 2005. № 10. С. 47 – 51.
 11. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог: монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин и др. Луганск: «Ноулидж», 2011. 174 с.
 12. Рябинин И. А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Изд. 2-е. Ленинград: Судостроение, 1971. 456 с.
 13. Москатов Г. К. Надежность адаптивных систем. Москва, 1973. 104 с.
 14. Дацун Ю. М. Визначення ступеня впливу технологічних процесів ремонту на справність вузлів тягового рухомого складу. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2016. № 1/7 (79). С. 56-61.
 15. Tartakovsky E., Ustenko O., Puzyr V., Datsun Y. System approach to the organization of locomotive maintenance on Ukraine railways. *Studies in Systems Decision and Control. Ukrainian state university of railway transport*. 2017. № 87.
 16. Lomotko D., Alyoshinsky E., Zambrybor G. Methodological Aspect of the Logistics Technologies Formation in Reforming Processes on the Railways. *Transportation Research Procedia*. 2016. 131 p.
- Krashenin O., Yakovlev S., Holovko Y. Assessment of factors that ensure the reliability of the locomotive system.**
- Abstract.** In conditions of slow renewal of traction rolling stock and a shortage of new locomotive fleets, it is becoming urgent for many depots to focus attention on increasing the reliability of the main equipment and locomotive systems. In the article, based on the analysis of theoretical approaches to the influence of constituent elements of locomotive systems on the overall reliability of the system, special criterion factors expressing the increase in quantitative and qualitative indicators of reliability are selected. The assessment of these factors makes it possible to determine the locomotive systems that provide the maximum increase in reliability, and to increase the quantitative increase in reliability when elements of the systems are duplicated. In addition, it is shown the possibility to determine the priorities (queue) of restoration of system elements to ensure system reliability.
- Keywords:** traction rolling stock, system elements, qualitative and quantitative factors of reliability.
- Надійшла 12.04.2023 р.
- Крашенінін Олександр Семенович**, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. Тел.: 057-730-19-99. E-mail: errs1@mail.ua. ORCID 0000-0001-7462-3372.
- Яковлев Сергій Сергійович**, кандидат технічних наук, виробничий підрозділ Електровозне депо «Харків-Головне» Регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця», Харків, Україна. Тел.: 057-730-19-99. E-mail: yakovlevss1984@gmail.com. ORCID 0000-0002-8578-4566.
- Залата Андрій Сергійович**, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Тел.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com
- Головко Ярослав Олександрович**, магістр кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. Тел.: 057-730-10-85. E-mail: uvkr@kart.edu.ua.

Krashenin Alexander, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel.: 057-730-19-99. E-mail: errs1@mail.ua. ORCID 0000-0001-7462-3372.

Yakovlev Sergey, candidate of technical sciences, production division of the Electric Locomotive Depot «Kharkiv-Holovne» of the Regional Branch «Pivdenna Zaliznytsia» JSC «Ukrzaliznytsia», Kharkiv, Ukraine. Tel.: 057-730-19-99. E-mail: yakovlevss1984@gmail.com. ORCID 0000-0002-8578-4566.

Zalata Andrii, postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X.

Tel.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com

Holovko Yaroslav, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

Tel.: 057-730-10-85. E-mail: uvkr@kart.edu.ua.

ФІЛЬ Н. Ю., к.т.н., доцент,
(Харківський національний автомобільно-дорожній університет),
ДЕЙНЕКО Ж. В., к.т.н., доцент,
(Харківський національний університет радіоелектроніки)

Вибір програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислових об'єктів

У теперішні важкі часи для української економіки актуальним є впровадження технології реверсного інжинірингу. За допомогою 3D-сканування створюється цифрова модель різних об'єктів. Реверс-інжиніринг використовується в різних галузях промисловості. Автоматизація процесу впровадження технології реверсного інжинірингу промислового об'єкта потребує наукового вирішення низки завдань: обґрунтування вибору ефективного методу реверсного інжинірингу; вибору ефективного 3D-сканера з урахуванням особливостей промислового об'єкта; вибору ефективного програмного забезпечення та апаратного забезпечення. Метою роботи є розроблення математичної моделі вибору програмного забезпечення для реверсного інжинірингу залежно від багатьох технічних характеристик і витратних показників, що дає змогу скоротити терміни впровадження реверсного інжинірингу та знизити фінансові ризики. Розроблено модель вибору програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта, яка стосується моделей багатокритеріального дискретного програмування. Використання запропонованої моделі вибору програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта дасть змогу скоротити час проєктування технології реверсного інжинірингу, знизити ризики незапланованих витрат на додаткове програмне забезпечення для вирішення всіх завдань реверсного інжинірингу промислового об'єкта.

Ключові слова: реверс-інжиніринг, модель, критерій, програмний засіб, вартість, функціональна повнота, дискретне програмування.

Вступ

Перед підприємствами України стоїть завдання швидкого відновлення виробництва, що неможливо без забезпечення запасними частинами для зруйнованого обладнання. Виробництво запасних частин для зруйнованого обладнання доцільно виконувати в Україні. Таке виробництво дасть змогу не лише створити нові робочі місця, а й скоротити час для відновлення підприємств. Але для виробництва запасних частин для зруйнованого обладнання потрібна технічна документація не тільки на все устаткування, але на кожну деталь окремо. Отже, у нинішніх важких для української економіки умовах актуальним є впровадження технології реверсного інжинірингу для виробництва промислових об'єктів.

Реверс-інжиніринг – процес розроблення конструкторської документації на основі вихідних даних, отриманих у вигляді готового зразка необхідної деталі. Використання реверс-інжинірингу дає змогу створити за допомогою 3D-сканування цифрову модель CAD деталі обладнання. Цей метод використовується в багатьох галузях промисловості, включаючи виробництво військової техніки [1].

Фахівці створюють цифрові моделі запасних частин для обладнання за допомогою 3D-сканування. Створення якісної цифрової моделі можливо лише за умови використання ефективного програмного забезпечення, що дає змогу проєктувати геометрично ідентичний об'єкт.

Аналіз публікацій

Проблемам використання реверс-інжинірингу різних об'єктів присвячено багато праць вітчизняних і зарубіжних авторів. У роботі [1] розглядаються типи реверсного інжинірингу, використовуваного при відтворенні різних деталей і вузлів, технічних характеристик і технічної документації за наявними зразками виробів. Встановлено, що сумарна вартість проєкту зворотного інжинірингу має бути меншою, ніж залишкова вартість і вартість можливого ремонту.

У роботі [2] визначено, що використання реверсного інжинірингу дає змогу знизити витрати ресурсів для виробництва різних деталей. Зниження собівартості виробництва є актуальним питанням для машинобудівних підприємств України.

У роботах [1, 3, 4] авторами визначена послідовність виконання завдань реверсного інжинірингу промислових об'єктів. На першому етапі проводиться вимірювання реального об'єкта і визначаються параметри об'єкта. Далі використовується спеціальне устаткування – 3D-сканер для сканування об'єкта. За допомогою програмного забезпечення створюється його цифрова модель, що може бути використана не тільки для відтворення об'єкта, а і його дослідження з метою покращення його технічних характеристик.

Українське підприємство Bibus спеціалізується на відновленні конструкторської документації для різних об'єктів на основі 3D-сканування. Для цього використовується спеціальне програмне забезпечення для формування 3D-поверхонь. Отримана конструкторська документація і CAD модель об'єкта дає змогу фахівцю отримати всю необхідну інформацію [5].

Для стандартизованих деталей розроблено алгоритм для реверс-інжинірингу [6]. Автори визначають, що відсутність теоретичних розробок щодо послідовності дій відповідної множини процедур для реверсного інжинірингу призводить до втрат часу та фінансів.

При реверс-інжинірингу існує інваріантна до об'єкта множина процедур, виконувана завжди [7, 8].

Реверс-інжиніринг – технологія, що сьогодні інтенсивно розвивається та широко використовується у всьому світі. Для автоматизації процесу впровадження технології реверс-інжинірингу промислового об'єкта необхідно вирішити такі завдання:

- вибір ефективного 3D-сканера з урахуванням особливостей промислових об'єктів;
- вибір ефективного програмного забезпечення;
- вибір ефективного апаратного забезпечення.

Завдання вибору програмного забезпечення (ПЗ) для вирішення завдань реверсного інжинірингу промислових об'єктів є актуальним науково-прикладним завданням.

Мета та постановка задачі

Метою є розроблення моделей вибору ПЗ для реверсного інжинірингу промислових об'єктів залежно від багатьох функціональних і вартісних критеріїв, що дасть змогу скоротити час і фінансові втрати під час впровадження проєкту реверс-інжинірингу промислових об'єктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути характеристики ПЗ, використовуваного для завдань реверсного інжинірингу промислових об'єктів; вибрати і провести аналіз критеріїв, які впливають на вибір програмного забезпечення.

При розробленні цифрової моделі промислового

об'єкта можливе використання різного програмного забезпечення, ефективно застосовуваного для вирішення різних завдань.

Наприклад, програмні системи ICEM surf, Imageware UG, ProEngineer, Solidworks використовуються для отримання CAD-моделей і тріангуляційних моделей на основі системи точок, отриманих при скануванні об'єкта [5].

ПЗ Magics RP, DeskArtes, Catia Shape Sculptor та Viscam RP використовуються для редагування, модифікації та оптимізації 3D тріангуляційної моделі [5].

Повний набір інструментів обробки даних для реверс-інжинірингу забезпечує таке ПЗ: GSI Studio, CopyCAD, Rapidform, Gcomagics, Polyworks (Modeler) і Paraform [5].

Для поверхневого моделювання та редагування CAD-моделей або елементів при виконанні реверсного інжинірингу можна використовувати таке ПЗ: PowerSHAPE, ProEngineer, UG, Solidworks, Catia та Rhino [5].

Для виконання 3D-контролю, створення та аналізу карти похибок і ведення документації для реверсного інжинірингу використовується ПЗ COMETinspct, Metris Focus Inspection, PowerINSPECT, PolyWorks Inspector та Geomagic Qualify [5].

Сьогодні на ринку ПЗ існує багато різних систем, які можуть використовуватися для вирішення завдань реверсного інжинірингу промислових об'єктів. Відсутність чітких рекомендацій щодо вибору ПЗ не дає змогу зробити цей вибір науково обґрунтованим з урахуванням особливостей конкретних промислових об'єктів.

Модель вибору програмного забезпечення

Розглянемо модель вибору ПЗ для реверсного інжинірингу промислового об'єкта.

При виконанні реверсного інжинірингу промислового об'єкта необхідно виконати множину операцій $R = \{R_j\}$. ($j = \overline{1, j'}$), де j' – кількість операцій, які необхідно виконати для реверсного інжинірингу промислового об'єкта.

Кожна операція реверсного інжинірингу може бути виконана множиною різних ПЗ $Z_j = \{Z_j^\gamma\}$, ($j = \overline{1, j'}$; $\gamma = \overline{1, \gamma^j}$), де γ^j – кількість ПЗ, які можуть бути використані для виконання j -ї операції реверсного інжинірингу.

Введемо змінну $X_j^\gamma = \{0; 1\}$, де $X_j^\gamma = 1$, якщо обраний $\gamma \in \text{ПЗ}$ для реалізації j -ї множини операцій реверсного інжинірингу промислового об'єкта, у протилежному випадку $X_j^\gamma = 0$, ($j = \overline{1, j'}$; $\gamma = \overline{1, \gamma^j}$).

Введемо коефіцієнт $Y_j^\gamma = \{0; 1\}$, де $Y_j^\gamma = 1$, якщо

γ -м ПЗ забезпечено j -ту множину операцій реверсного інжинірингу промислового об'єкта, у протилежному випадку $Y_j^\gamma = 0, (j = \overline{1, j'}; \gamma = \overline{1, \gamma^j})$.

ПЗ має функціональні, технічні, інтеграційні та вартісні характеристики.

Функціональними характеристиками γ -го ПЗ є його функціональна повнота ПЗ P_γ і наявність інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу ПЗ $F_\gamma (\gamma = \overline{1, \gamma^j})$.

Технічними характеристиками γ -го ПЗ є необхідний об'єм оперативного запам'ятовуючого пристрою (ОЗП) $V_\gamma^{\text{ОЗП}}$ і необхідний об'єм постійного запам'ятовуючого пристрою (ПЗП) $V_\gamma^{\text{ПЗП}} (\gamma = \overline{1, \gamma^j})$.

Інтеграційною характеристикою γ -го ПЗ є показник, що визначає сумісність k -го ПЗ із γ -м ПЗ у вигляді коефіцієнта $S_{\gamma k} = \{0, 1\}$, де $S_{\gamma k} = 1$, якщо γ -й ПЗ сумісно з k -м ПЗ, у протилежному випадку $S_{\gamma k} = 0, (k, \gamma = \overline{1, \gamma^j})$.

Також інтеграційною характеристикою γ -го ПЗ є показник, що визначає взаємозамінність γ -го ПЗ на k -й ПЗ у вигляді коефіцієнта $B_{\gamma k} = \{0, 1\}$, де $B_{\gamma k} = 1$, якщо γ -й ПЗ можна замінити k -м ПЗ, у протилежному випадку $B_{\gamma k} = 0, (k, \gamma = \overline{1, \gamma^j})$.

Вартісними характеристиками γ -го ПЗ є його вартість C_γ і вартість технічного супроводження та обслуговування $C_\gamma^{\text{TC}}, (\gamma = \overline{1, \gamma^j})$.

Модель вибору програмного забезпечення має такий вигляд.

Часткові критерії оптимізації:

– максимальна функціональна повнота

$$P = \sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma^j} P_\gamma X_j^\gamma \rightarrow \max; \quad (1)$$

– мінімальна вартість технічного супроводження та обслуговування на γ -му ПЗ

$$C^{\text{TC}} = \sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma^j} C_\gamma^{\text{TC}} X_j^\gamma \rightarrow \min; \quad (2)$$

– мінімальна вартість γ -го ПЗ

$$C = \sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma^j} C_\gamma X_j^\gamma \rightarrow \min; \quad (3)$$

– мінімальний об'єм ОЗП

$$V^{\text{ОЗП}} = \sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma^j} V_\gamma^{\text{ОЗП}} X_j^\gamma \rightarrow \min; \quad (4)$$

– мінімальний об'єм ПЗП

$$V^{\text{ПЗП}} = \sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma^j} V_\gamma^{\text{ПЗП}} X_j^\gamma \rightarrow \min. \quad (5)$$

Область допустимих рішень визначається обмеженнями:

– усі операції мають бути забезпечені обраним ПЗ

$$\sum_{\gamma=1}^{\gamma^j} Y_j^\gamma X_j^\gamma \geq 1, \quad \exists j = \overline{1, j'}; \quad (6)$$

– вартість технічного супроводження та обслуговування ПЗ не має перевищувати заданих $C_{\text{зад}}^{\text{TC}}$

$$\sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma^j} C_\gamma^{\text{TC}} X_j^\gamma \leq C_{\text{зад}}^{\text{TC}}; \quad (7)$$

– з підмножини M_B взаємозамінних ПЗ має бути обрано лише один ПЗ

$$\sum_{\gamma \in M_B} B_{\gamma \tilde{\gamma}} X_j^\gamma = 1, \gamma = \overline{1, \gamma^j}; \forall B_{\gamma \tilde{\gamma}} = 1; j = \overline{1, j'}; \exists \gamma = \overline{1, \gamma^j} \quad (8)$$

– усі обрані ПЗ мають бути сумісними

$$B_{\gamma \tilde{\gamma}} X_j^\gamma X_j^{\tilde{\gamma}} = 1; \tilde{\gamma} = \overline{1, \gamma - 1}; \tilde{\gamma} = \overline{\tilde{\gamma} + 1, \gamma^j}; \forall B_{\gamma \tilde{\gamma}} = 1; \quad (9)$$

– необхідний об'єм ПЗП не має бути більше заданого $V_{\text{зад}}^{\text{ПЗП}}$

$$\sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma^j} V_\gamma^{\text{ПЗП}} X_j^\gamma \leq V_{\text{зад}}^{\text{ПЗП}}; \quad (10)$$

– необхідний об'єм ОЗП не має бути більше заданого $V_{\text{зад}}^{\text{ОЗП}}$

$$\sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma^j} V_\gamma^{\text{ОЗП}} X_j^\gamma \leq V_{\text{зад}}^{\text{ОЗП}}, \quad (11)$$

де $V_{\text{зад}}^{\text{ОЗП}}$ – об'єм ОЗП, необхідний для забезпечення надійної роботи найбільш вимогливого ПЗ.

Наведена математична модель (1)-(11) належить до задач багатокритеріального дискретного програмування та, на відміну від відомих, ураховує системні вимоги до програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта в цілому.

Результати вирішення завдання вибору ПЗ є вихідними даними для завдання вибору апаратного забезпечення реверсного інжинірингу промислового об'єкта.

Висновки

У роботі розглянуто основні завдання реверсного інжинірингу промислового об'єкта. Визначено, що автоматизація процесу впровадження технології реверс-інжинірингу промислового об'єкта потребує наукового підходу.

Розроблено модель вибору програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта, що належить до класу моделей багатокритеріального дискретного програмування та, на відміну від відомих, ураховує системні вимоги до програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта в цілому.

У подальшому планується розробити систему підтримки прийняття рішення щодо вибору програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта.

Список використаних джерел

1. Іванов В. В. Моделі проекту зворотного інжинірингу. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 2 (1224). С. 52–57.
2. Зворотній інжиніринг і створення 3D-моделі / І. В. Пихтєєва, О. В. Івженко, Г. В. Антонова, С. І. Малюта. *Науковий вісник ТДАТУ*. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12, Т. 2. № 35.
3. Білінський Й. Й., Животівський С. М. Огляд методів 3d-контролю геометричних розмірів деталей. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2022. Вип. 2. С. 114–22. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-114-122>.
4. Современное оборудование и программное обеспечение обратного инжиниринга промышленных изделий / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, С. И. Чернышов, Я. Н. Гаращенко. *Збірник наукових праць НТУ «ХПІ»: Сучасні технології в машинобудуванні*. 2010. № 5, С. 138–152.
5. ТОВ з П «БІБУС Україна». URL: <http://bibus.com.ua>. (дата звернення: 24.04.2023).
6. Іванов В. В., Чумак Н. В. Метрологічні аспекти зворотного інжинірингу стандартизованих виробів.

Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2017. № 7 (1229). С. 137–141. doi:10.20998/2413-4295.2017.07.19.

7. Brandyberry A. Determinants of adoption for organizational innovations approaching saturation. *European journal of innovation management*. 2003. Vol. 6, Is. 3. P. 150–158. doi: 10.1108/14601060310486226.
8. Lopez-Herrejon R. E., Linsbauer L., Galindo J. A., Parejo J. A., Benavides D., Segura S., Egyed A. An assessment of search-based techniques for reverse engineering feature models. *Journal of systems and software*. 2015. № 103. P. 353–369. doi: 10.1016/j.jss.2014.10.037.

Fil N. Yu., Deineko Z.V. The challenge of choosing a software tool for reverse engineering of industrial products.

Abstract. In the current difficult times for the Ukrainian economy, the introduction of reverse engineering technology is relevant. 3D scanning is used to create a digital model of various objects. Reverse engineering is used in various industries. Automation of the process of introducing reverse engineering technology of an industrial object requires a scientific solution to a number of problems: justification for choosing an effective reverse engineering method, the choice of effective 3D scanner, taking into account the characteristics of the industrial object, the choice of effective software and hardware. The aim is to develop a mathematical model for selecting software for reverse engineering, depending on a variety of technical characteristics and costs, which can reduce the time of implementation of reverse engineering and reduce financial risks. A software selection model for reverse engineering of an industrial facility, which refers to multi-criteria discrete programming models, is developed. The use of the proposed software selection model for reverse engineering of an industrial facility will reduce the design time of reverse engineering technology, reduce the risks of unplanned costs of additional software for all reverse engineering tasks of an industrial facility.

Keywords: reverse engineering, model, criterion, software tool, cost, functional completeness, discrete programming.

Надійшла 01.05.2023 р.

Філь Наталія Юрївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, fnu@khadi.kharkov.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2081-7176>.

Дейнеко Жанна Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри медіасистем та

технологій, Харківський національний університет
радіоелектроніки, Харків, Україна,
zhanna.deineko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0175-4181>.

Fil Nataliia Yuriivna, candidate of technical sciences,
Associate professor of the Department of Automation and
Computer-Integrated Technologies, Kharkiv National
Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine,
fnu@khadi.kharkov.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2081-7176>.

Deineko Zhanna Valentynivna, candidate of technical
sciences, Head of the Department of Media Systems and
Technologies, Kharkiv National University of Radio
Electronics, Kharkiv, Ukraine, zhanna.deineko@nure.ua,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0175-4181>.

ПАНЧЕНКО С. В., д.т.н., професор (Український державний університет залізничного транспорту),

БУНЧУКОВ О. А. (Департамент автоматики та телекомунікацій Укрзалізниці),

КУСТОВ В. Ф., к.т.н., доцент,

СОТНИК В. О., к.т.н., доцент

(Український державний університет залізничного транспорту)

Удосконалення якості оцінювання функційної безпечності систем залізничної автоматики за наявності кратних небезпечних відмов у каналах резервування

У статті розглянуто питання удосконалення покращення якості оцінювання функційної безпечності систем залізничної автоматики, у яких внаслідок відмов і збоїв обладнання можуть виникати небезпечні стани і пов'язані з ними аварії та катастрофи поїздів, недопустимі збитки щодо здоров'я і життя людей, пошкодження майна та негативний вплив на довкілля. Наведено практичне і теоретичне обґрунтування можливості появи одночасних кратних небезпечних відмов у каналах резервування. Розроблено математичні моделі для розрахування показників функційної безпечності з урахуванням одночасного впливу дестабілізуючих чинників на всі канали резервування відповідальних пристроїв і систем. Сформульовано висновки про розроблення та експлуатацію пристроїв захисту від ударних впливів на всі канали резервування і кратних небезпечних відмов. Результати досліджень можуть бути корисними для електричних/електронних/програмованих електронних систем керування з підвищеними вимогами до функційної безпечності, у тому числі на атомних станціях, в авіації, космічній техніці, хімічній промисловості, медицині, системах воєнного призначення.

Ключові слова: аварії, електричні/електронні/програмовані електронні системи керування, катастрофи, надійність, небезпечні відмови, небезпечні стани, системи залізничної автоматики, функційна безпечність.

Вступ

Сучасні і перспективні системи залізничної автоматики (СЗА) будуються на основі використання електронних та електронних/програмованих пристроїв, у тому числі на базі мікропроцесорних контролерів та ЕОМ. У цих пристроях виникають не тільки захисні збої та відмови, що призводять до затримок поїздів, але й внаслідок симетричних відмов електронних елементів можуть формуватися небезпечні стани, які можуть призводити до несанкціонованих керуючих впливів (переведення стрілок під поїздом, відкриття дозвільних показань світлофорів на зайняті колійні ділянки, встановлення лобових маршрутів на станціях тощо). Тому головною умовою введення в експлуатацію електронних систем залізничної автоматики є забезпечення їхньої функційної безпечності (ФБ).

Постановка проблеми

Основні вимоги щодо ФБ і надійності СЗА наведено в національних стандартах [1-3] і нормативних документах АТ «Укрзалізниця» [4, 5]. Основою для впровадження та введення в експлуатацію СЗА є «Доказ функційної безпечності», розроблюваний виробником продукції, і «Висновок щодо функційної безпечності», що надається фаховою організацією галузі. Необхідним першочерговим етапом доведення ФБ є розрахування її показників. Очевидно, що якісне оцінювання і правильне розрахування ФБ є одним із чинників визначення на ранніх етапах розроблення СЗА можливості виникнення при експлуатації небезпечних станів і пов'язаних з ними недопустимих збитків, виникнення аварій і катастроф, а також проведення доопрацювання СЗА до вимог стандартів з ФБ.

При проведенні розрахунків показників ФБ СЗА згідно з затвердженою методикою в залізничній галузі [4] використовують математичні моделі, де враховують тільки незалежні відмови. Дійсно, у багатьох випадках відмови настають послідовно в часі і мають найпростіший потік відмов, у тому числі небезпечних. Але в реальних умовах експлуатації можуть бути і кратні відмови, тому необхідно визначити ймовірність появи таких відмов, що можуть призвести до небезпечних станів СЗА, дослідити можливість урахування їх у математичних моделях і розробити рекомендації щодо найкращого захисту від них.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для забезпечення ФБ необхідно насамперед визначити нормативи та методи оцінювання ФБ. Основні методи обґрунтування кількісних вимог з допустимої інтенсивності небезпечних відмов функцій безпечності як для СЗА в цілому, так і окремих каналів резервування наведено в роботі [6], у якій також обґрунтовані допустимі наробітки щодо небезпечної відмови окремих каналів резервування. Особливості стратегій нормування ФБ та розроблення вимог з ФБ для систем залізничної автоматики наведено в роботах [7, 8]. Математичні моделі для основних способів резервування досліджено в наукових працях [9, 10]. Особливості розрахування і формули функційної безпечності та безвідмовності відновлюваних технічних засобів при використанні мажоритарного резервування «2» із «3» наведено в роботі [11]. Розглянуто також особливості забезпечення функціональної безпеки мікропроцесорних систем керування та контролю на залізничному транспорті [12]. Слід зазначити, що недостатньо уваги приділяється врахуванню кратних небезпечних відмов як у наукових дослідженнях, так і нормативних документах галузі.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми та формулювання цілей

Для вирішення загальної проблеми якісного доведення ФБ проведемо аналіз можливості виникнення одночасних дестабілізуючих впливів на СЗА, а також шляхи визначення показників ФБ з урахуванням можливості появи в них кратних залежних небезпечних збоїв і відмов і рекомендації щодо використання пристроїв захисту від їх виникнення.

Виклад основного матеріалу дослідження

Порушення функційної безпечності в першу чергу відбувається при виникненні однократних і незалежних відмов комплектувальних елементів і каналів резервування.

Теоретично небезпечний стан систем залізничної автоматики може виникати також і внаслідок відмов найбільш чутливих до теплового пробію елементів у різних каналах резервування, наприклад під час негативної дії потужних електромагнітних завад (грозових перенапружень, тягового струму тощо) одночасно на два фототранзистори дубльованих оптронів контролерів виведення дискретної інформації, що вмикають відповідальні виконавчі реле в каналах резервування за варіантом «І», що може призводити до несанкціонованого вмикання двигунів стрілок чи відкриття дозвільних сигналів на залізничних світлофорах замість заборонних.

Теоретичне обґрунтування одночасного впливу дестабілізуючих чинників на всі канали загального навантажувального резервування чи будь-які два канали резервування мажоритарних систем «2» з «3» можна підтвердити практичними прикладами, що виявлено при впровадженні мікропроцесорних систем, у тому числі за участі авторів. Так, у СЗА можуть виникати кратні небезпечні відмови, наприклад при одночасних впливах дестабілізуючих чинників на всі канали резервування:

- від потужних електромагнітних завад внаслідок дії грозових перенапружень чи комутаційних процесів в електротяговій мережі. Так, грозові перенапруження призвели до однієї з найбільших резонансних залізничних катастроф у світі на високошвидкісних ділянках – у китайській провінції Венчжоу внаслідок дії блискавки та відсутності необхідної апаратури захисту сигнальної апаратури від грозових впливів була сформована небезпечна відмова у вигляді хибної вільності колії, на якій стояв високошвидкісний поїзд, що відкрило дозвільний сигнал на вхідному світлофорі для беззупинного пропускання іншого високошвидкісного поїзда по цій зайнятій колії і призвело до зіткнення поїздів з жахливими наслідками, при цьому чотири вагони першого поїзда ще й впали з віадука з висоти від 20 до 30 м;

- підвищення температури внаслідок відмови пристроїв вентиляції чи кондиціонування повітря в шафах, де розміщуються всі канали резервування на базі ЕОМ чи мікропроцесорних контролерів керування та контролю (реальні приклади: недопустиме підвищення температури при вимкненні вентиляторів у шафі ЕОМ залежностей мікропроцесорної системи електричної централізації стрілок і сигналів поста «Південний» Алчевського металургійного комбінату під час пусконаладжувальних робіт призвело до збоїв у роботі ЕОМ залежностей, увімкнених за варіантом мажоритарного навантажувального резервування «2» з «3»; підвищення температури в шафах об'єктних контролерів внаслідок несвоєчасного встановлення кондиціонерів в апаратному приміщенні мікропроцесорної централізації стрілок і сигналів

станції «Передача-Донецьк» ЗАО «Донецьк-сталь» призводило до одночасних збоїв у роботі мікропроцесорних контролерів світлофорів, увімкнених за варіантом навантажувального резервування «2» з «2» з розв'язувальним елементом «I»);

- суттєвого підвищення вологості й температури внаслідок порушення цілісності трубопроводів з гарячою чи холодною водою (потрапляння гарячої води з дуже високою температурою на промислові ЕОМ та мікропроцесорні контролери релейно-мікропроцесорної централізації залізничної станції «Вапняна» металургійного комбінату ім. Ілліча (м. Маріуполь)).

З урахуванням можливості виникнення кратних небезпечних відмов такі впливи пропонується називати ударними впливами і використовувати для них пристрої захисту від ударних впливів (ПЗУВ). Для забезпечення необхідної функційної безпечності при навіть дуже малих значеннях імовірностей відмов таких пристроїв і негативних наслідків від ударних впливів необхідно використовувати додаткові резервні ПЗУВ.

Використання для цього навантажувального резервування для ПЗУВ не потребує «ідеальних» перемикачів, але одночасний вплив на них, наприклад грозових перенапружень, може призвести до одночасної їхньої відмови і появи кратних відмов у системах автоматизації.

Тому розглянемо можливість і особливості використання в ПЗУВ у першу чергу ненавантажувального резервування та його мінімального варіанта – дублювання.

Очевидно, що ймовірність небезпечної відмови систем автоматизації не має бути більшою за ймовірність виникнення такої кратної відмови, спричиненої ударними впливами. Тобто інтенсивність відмов таких ПЗУВ має бути менше допустимих стандартизованих рівнів SIL з функційної безпечності [1, 3]. Аналіз цих норм показує, що дуже складно забезпечити захист від ударних впливів з інтенсивністю відмов нижче допустимих норм за найбільш жорстким четвертим рівнем SIL. При цьому треба враховувати, що на надійність роботи, наприклад обмежувачів напруги для захисту від грозових перенапружень, впливають не тільки надійність їхніх комплектувальних елементів (розрядників, варисторів, супресорів тощо), але й параметри контуру заземлення (активна та індуктивна складові його опору, що залежать від матеріалу, довжини та форми перерізу шин заземлення), а також зміна опору землі в місцях розташування контуру заземлення за рахунок промерзання ґрунту, зменшення його вологості тощо).

У більшості випадків відмови ПЗУВ є неконтрольованими, тому при дії таких чинників

можуть бути кратні одночасні відмови в різних каналах резервування, у тому числі й небезпечні відмови.

Так, у найбільш розповсюджених способах резервування – загальному навантажувальному дублюванні «2» з «2» і мажоритарному резервуванні «2» з «3» небезпечний стан може виникнути в разі двох однакових небезпечних відмов у різних каналах резервування, особливо при використанні в них однакового апаратного та програмного забезпечення, а також за наявності в каналах резервування однакових найбільш слабких до таких ударних впливів елементів.

1. Оцінювання функційної безпечності СЗА при використанні для них ПЗУВ з ненавантажувальним дублюванням

Загальну ймовірність небезпечної відмови пристроїв захисту від ударних впливів (ПЗУВ) при використанні для них ненавантажувального дублювання можна визначити за аналогією з формулами для розрахування функційної безпечності в такий спосіб [9]:

$$Q_n(t) = 1 - e^{-\lambda_n t} (1 + \lambda_n t), \quad (1)$$

де λ_n – інтенсивність відмов ПЗУВ, що призводять до кратних небезпечних відмов виконання функцій безпечності.

Оцінювання функційної безпечності за наступною формулою і далі у статті проводиться для моделей найбільш поширеного для розрахунків надійності і ФБ експоненціального закону розподілу відмов як для комплектувальних елементів, так і каналів резервування.

Доцільно розглянути два варіанти такого резервування:

- 1) $\lambda_n t$ набагато менше 0,01;
- 2) $\lambda_n t$ дорівнює 0,1, набагато більше 0,01.

Варіант 1

Значення $\lambda_n t$ менше 0,01.

Імовірність небезпечної відмови пристроїв захисту від ударних впливів ПЗУВ (коли $\lambda_n t$ менше 0,01) за рахунок розкладання в ряд Фур'є експоненціальної функції у формулі (1) буде дорівнювати

$$Q_n(t) = 1 - (1 - \lambda_n t)(1 + \lambda_n t). \quad (2)$$

Таке спрощення є допустимим, тому що при ньому в більшості випадків похибка має дуже мале значення і

навіть не погіршує показники безпечності. Після нескладних перетворень виразу (1) отримаємо

$$Q_n(t) = (\lambda_n t)^2. \quad (3)$$

Нормативним показником функційної безпечності, за стандартом [1], є ймовірність небезпечної відмови за кожну годину експлуатації в розрахунку на одну відповідальну функцію. Якщо позначити його як A_{sil} для різних рівнів жорсткості (SIL1-SIL4)), тоді з урахуванням формули (3) отримаємо

$$A_{sil} = \frac{Q_n(t)}{t} = \lambda_n^2 t. \quad (4)$$

Аналіз наведених формул показує, що функційна безпечність ПЗУВ суттєво підвищується за рахунок ненавантажувального резервування тільки тоді, коли значення $\lambda_n t$ менше 10^{-6} , але такі значення досягти на практиці дуже важко.

З цієї формули можна знайти максимально допустиму інтенсивність відмов ПЗУВ:

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{\lambda_{n, \text{дон}}}{t}}. \quad (5)$$

Допустиму тривалість експлуатації ПЗУВ можна також визначити з формули (2):

$$t_{\text{дон}} = \frac{\lambda_{n, \text{дон}}}{\lambda_n^2}. \quad (6)$$

Аналіз формули (4) показує, що при реальних термінах експлуатації (10-20 років експлуатації) забезпечити експлуатаційну інтенсивність відмов ПЗУВ дуже складно, частіше реально неможливо.

Щоб забезпечити практично допустиму тривалість експлуатації ПЗУВ, треба, щоб квадрат інтенсивності небезпечних відмов ПЗУВ був набагато менше допустимої інтенсивності небезпечних відмов (SIL). Це також у більшості випадків реально неможливо.

Варіант 2

Значення $\lambda_n t$ більше 0,01.

$$Q_n(t) = 1 - e^{-\lambda_n t} (1 + \lambda_n t). \quad (7)$$

У цьому випадку ймовірність небезпечної відмови при дублюванні можна визначити за формулою [9]

Ефективність такого варіанта резервування при великих значеннях $\lambda_n t$ є дуже незначною (дані розрахунків наведено в таблиці).

2. Оцінювання показників функційної безпечності ПЗУВ при використанні для них навантажувального дублювання

У деяких випадках можна використовувати ПЗУВ з загальним навантажувальним резервуванням (ЗНР) з кратністю $m=2$ (при дублюванні), коли одночасна відмова основного та резервного ПЗУВ має дуже малу ймовірність (наприклад для пристроїв вентиляції).

Якщо значення $\lambda_n t$ будуть набагато менше значень 0,01, тоді відповідні формули для розрахування виграшу від навантажувального дублювання для більшості практичних випадків (з прийнятими припущеннями за малими значеннями $\lambda_n t$) будуть аналогічні формулам (3)-(6), тобто однаковими з ненавантажувальним резервуванням. Якщо значення $\lambda_n t$ будуть більше 0,01, тоді розрахункові значення, за навчальним посібником [1], будуть відрізнятися. Для різних значень $\lambda_n t$ і способів резервування розрахунки ймовірностей небезпечних відмов ПЗУВ наведено в таблиці

Таблиця

Значення ймовірності небезпечних відмов ПЗУВ залежно від способів резервування (ЗНР – загальне навантажувальне резервування, ЗННР – загальне ненавантажувальне резервування), інтенсивності небезпечних відмов і часу експлуатації ($\lambda_n t$)

	Імовірності небезпечних відмов ПЗУВ залежно від значення $\lambda_n t$ і способу резервування (без періодичного контролю та відновлення)									
$\lambda_n t$	10^{-5}	10^{-3}	0,01	0,05	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0
Без резервування	10^{-5}	10^{-3}	0,01	0,049	0,095	0,221	0,39	0,63	0,86	0,95
ЗННР (m=2)	10^{-10}	10^{-6}	0,0001	0,0015	0,0045	0,026	0,0895	0,264	0,592	0,8
Виграш від ЗННР (m=2)	10^5	1000	100	32,7	17,14	8,5	4,36	2,42	1,45	1,19
ЗНР (m=2)	10^{-10}	10^{-6}	0,0001	0,002	0,009	0,049	0,152	0,4	0,74	0,9
Виграш від ЗНР (m=2)	10^5	1000	100	24,5	10,43	4,5	2,57	1,56	1,16	1,06
Виграш ЗННР порівняно з ЗНР	1	1	1	1,33	2,0	1,88	1,7	1,54	1,24	1,13

Аналіз таблиці показує, що використання ненавантажувального та навантажувального дублювання для ПЗУВ дає суттєвий виграш тільки при дуже малих значеннях $\lambda_n t$, але в більшості практичних випадків не може забезпечити жорсткі вимоги з функційної безпечності СЗА та інших відповідальних систем автоматизації.

3. Оцінювання показників функційної безпечності ПЗУВ при використанні для них ненавантажувального дублювання з періодичним контролем і своєчасним відновленням

Імовірність безпечної роботи ПЗУВ при використанні ненавантажувального дублювання з періодичним контролем і своєчасним відновленням можна визначити за аналогією з навчальним посібником [9]:

$$P_o(t) = e^{-\frac{\lambda_n}{N_{\text{вб}}+2}t}. \quad (8)$$

З цієї формули можна визначити імовірність безпечної роботи ПЗУВ:

$$Q_n(t) = 1 - e^{-\frac{\lambda_n}{N_{\text{вб}}+2}t}. \quad (9)$$

У більшості випадків ступінь набагато менше 0,1, тому що індекс відновлення $N_{\text{вб}} = \mu/\lambda_n$ переважно має значення більше 100, а інтенсивність небезпечних відмов також набагато менше 0,1. Тому при розкладанні в ряд Фур'є експоненти отримаємо

$$Q_n(t) = \frac{\lambda_n}{N_{\text{вб}}+2} t. \quad (10)$$

Нормативний показник функційної безпечності буде дорівнювати

$$Asil = Q_n(t) / t = \frac{\lambda_n}{N_{\text{вб}}+2}. \quad (11)$$

Після заміни $N_{\text{вб}} = \mu/\lambda_n$ та перетворень отримаємо

$$Asil = Q_n(t) / t = \frac{\lambda_n^2 T_o}{2\lambda_n T_o + 1}. \quad (12)$$

У більшості випадків значення $2\lambda_n T_o$ набагато менше 0,01, тому вираз (12) значно спрощується і дорівнює

$$Asil = Q_n(t) / t = \lambda_n^2 T_g. \quad (13) \quad Q_n(t) = \frac{2\lambda_n}{N_{\text{вб}} + 3} t. \quad (20)$$

За цією формулою можна розрахувати максимально допустиму інтенсивність відмов ПЗУВ і максимально допустиму тривалість відновлення залежно від допустимих рівнів функційної безпеності SIL:

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{Asil}{T_g}}; \quad (14)$$

$$T_g = \frac{Asil}{\lambda_n^2}. \quad (15)$$

З урахуванням того, що ймовірність небезпечної відмови за кожен годину експлуатації дорівнює в більшості практичних випадків допустимій інтенсивності небезпечних відмов ПЗУВ, допустиму інтенсивність відмов і максимальну тривалість експлуатації ПЗУВ можна також визначити з формул (11)-(13):

$$T_g = \frac{\lambda_{n, \text{доп}}}{\lambda_n^2}. \quad (16)$$

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{\lambda_{n, \text{доп}}}{T_g}}. \quad (17)$$

4. Оцінювання показників функційної безпеності ПЗУВ при використанні для них навантажувального дублювання з періодичним контролем і своєчасним відновленням

Для більшості практичних випадків (при $N_{\text{вб}} > 100$), за аналогією з роботою [9], ймовірність безпечної роботи ПЗУВ буде дорівнювати

$$P_n(t) = e^{-\frac{2\lambda_n}{N_{\text{вб}} + 3} t} \quad (18)$$

З цієї формули можна також визначити ймовірність небезпечної відмови ПЗУВ:

$$Q_n(t) = 1 - e^{-\frac{2\lambda_n}{N_{\text{вб}} + 3} t}. \quad (19)$$

У більшості випадків ступінь у формулі (19) набагато менше 0,01 (як і при ненавантажувальному резервуванні), тому аналогічно до формули (10) отримаємо

Нормативний показник функційної безпеності буде дорівнювати

$$Asil = Q_n(t) / t = \frac{2\lambda_n}{N_{\text{вб}} + 3}. \quad (21)$$

Після заміни $N_{\text{вб}} = \frac{\mu}{\lambda_n}$, з урахуванням $\mu = \frac{1}{T_g}$ (для експоненціального розподілу тривалості відновлення), отримаємо

$$Asil = Q_n(t) / t = \frac{2\lambda_n^2 T_g}{3\lambda_n T_g + 1}. \quad (22)$$

У більшості випадків значення $3\lambda_n T_g$ набагато менше 0,01, тому вираз (22) значно спрощується і дорівнює

$$Asil = Q_n(t) / t = 2\lambda_n^2 T_g. \quad (23)$$

За цією формулою можна розрахувати максимально допустиму інтенсивність відмов ПЗУВ і максимально допустиму тривалість відновлення залежно від допустимих рівнів функційної безпеності SIL:

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{Asil}{2T_g}}; \quad (24)$$

$$T_g = \frac{Asil}{2\lambda_n^2}. \quad (25)$$

З урахуванням того, що ймовірність небезпечної відмови за кожен годину експлуатації дорівнює в більшості практичних випадків допустимій інтенсивності небезпечних відмов, допустиму інтенсивність відмов і максимальну тривалість експлуатації ПЗУВ для навантажувального резервування можна також визначити з формул (24), (25):

$$T_g = \frac{\lambda_{n, \text{доп}}}{2\lambda_n^2}; \quad (26)$$

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{ндоп}}}{2T_e}}. \quad (27)$$

Аналіз формул (23), (25) показує, що ненавантажувальне резервування в більшості розглянутих випадків дає вигоду з нормативного показника функційної безпечності у два рази, для нього час періодичного контролю та відновлення можна скоротити вдвічі порівняно з навантажувальним резервуванням.

Висновки за результатами дослідження

1. Використання нерезервованих ПЗУВ може призводити до кратних небезпечних відмов електронних СЗА.

2. Використання ненавантажувального та навантажувального резервування з кратністю 2 (дублювання) для ПЗУВ дає вигоду порівняно з нерезервованим варіантом, але в більшості випадків не може забезпечити жорсткі вимоги з функційної безпечності СЗА.

3. Використання ненавантажувального дублювання з періодичним контролем і своєчасним відновленням ПЗУВ дає суттєвий вигоду, при цьому в більшості випадків такий варіант може забезпечити дуже жорсткі вимоги з функційної безпечності СЗА та інших відповідальних пристроїв автоматизації.

4. Для своєчасного відновлення треба мати гарантований контроль справності ПЗУВ і забезпечення допустимої тривалості його відновлення.

5. Для контролю справності ПЗУВ необхідно використовувати спеціальні надійні автоматичні пристрої контролю або періодичний контроль обслуговуючим персоналом згідно з графіком технологічного процесу.

6. При використанні ненавантажувального резервування дуже важливо забезпечити гарантовано (з необхідним рівнем достовірності) такі умови:

- визначення небезпечної відмови основного ПЗУВ одразу після її виникнення;
- перемикання ПЗУВ на резерв;
- перемикання ПЗУВ на резерв за максимально допустимою тривалістю відновлення з урахуванням запропонованих у статті формул.

7. Отримані результати можуть використовуватися не тільки для систем залізничної автоматики, але й оцінювання функційної безпечності електричних/електронних/програмованих електронних систем керування (Е/Е/ПЕС = Е/Е/ПЕС, electrical/electronic/programmable electronic control system), у яких внаслідок відмов і збоїв обладнання можуть виникати недопустимі збитки щодо здоров'я та життя людей, пошкодження майна та негативного впливу на довкілля.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 4178-2003. Комплекси технічних засобів систем керування та регулювання руху поїздів. Функційна безпечність і надійність. Вимоги та методи випробовування. Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 32 с.
2. ДСТУ EN 50126-1:2015 uk. Залізничний транспорт. Специфікація та демонстрація надійності, доступності, безпеки і ремонтпридатності (РАМН). Частина 1. Основні вимоги та загальний процес (EN 50126-1:1999, IDT). Чинний від 2016–01–01. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80636
3. ДСТУ EN 50129:2015 uk. Залізничний транспорт. Системи зв'язку сигналізації та оброблення даних. Електронні сигналізаційні системи безпеки (EN 50129:2003, IDT). Чинний від 2016–01–01. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80636
4. Методика доказу функціональної безпеки мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання рухом поїздів: затв. та введ. в дію наказом «Укрзалізниці» № 452-Ц від 17.08.2001 р. Київ: Вид. ПП «Алькор», 2002. 106 с.
5. ЦШ 0026. Інструкція про порядок проведення експлуатаційних і приймальних випробувань дослідних зразків пристроїв сигналізації, централізації та блокування: затв. та введ. в дію наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 17.08.2001 р. № 453-Ц. Київ, 2003. 14 с.
6. Panchenko Sergii, Bojnik Anatolij, Kustov Viktor, Sotnyk Vasyl. Ensuring railroad's digital automation systems resistance to dangerous states/ICTE. *Transportation and Logistics*. 2019. IC Tol 2019, LNITI. P. 120-128. 2020.
7. Кустов В. Ф. Анализ стратегий нормирования функциональной безопасности в стандартах железнодорожной автоматики. *Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 25-26 ноября 2021 г.)*. Ч. 1. Гомель : БелГУТ, 2021. С. 196-198.
8. Кустов В. Ф. Разработка требований функциональной безопасности для устройств железнодорожной автоматики. *Вестник БелГУТ «Наука и транспорт»*. 2020. № 2 (41). С. 28-30.
9. Кустов В. Ф. Основы теории надёжности та функційної безпечності систем залізничної автоматики: навч. посіб. для ВНЗ. Харків: УкрДАЗТ, 2008. 218 с.
10. Кустов В. Ф. Математические модели функциональной безопасности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики. *Зб. наук. праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2010. Вип. 116. С. 65-71.

11. Кустов В. Ф. Математичні моделі функційної безпеки та безвідмовності відновлюваних технічних засобів у разі використання мажоритарного резервування «2» із «3». *Зб. наук. праць*. Донецьк: ДонІЗТ, 2010. Вип. № 23. С. 5-14.
12. Кустов В. Ф. Особенности обеспечения функциональной безопасности микропроцессорных систем управления и контроля на железнодорожном транспорте. *Залізничний транспорт України*. 2015. № 1. С. 22-30.

Panchenko S. V., Bunchukov O. A., Kustov V. F., Sotnyk V. O. Improving the quality of assessment of the functional safety of railway automation systems in the presence of multiple dangerous failures in reservation channels

Abstract. The article deals with the issues of improving the quality of the assessment of the functional safety of railway automation systems, in which, due to equipment failures and malfunctions, dangerous conditions and related train accidents and disasters, unacceptable damages to human health and life, damage to property and negative impact on the environment. Practical and theoretical substantiation of the possibility of the appearance of simultaneous multiple dangerous failures in the redundancy channels is given. Mathematical models have been developed for calculating functional safety indicators, taking into account the simultaneous influence of destabilizing factors on all backup channels of responsible devices and systems. Formulated conclusions regarding the development and operation of shock protection devices for all backup channels and multiple dangerous failures. Research results can be useful for electric/electronic/programmable electronic control systems with increased requirements for functional safety, including at nuclear power plants, aviation, space engineering, chemical industry, medicine, and military systems.

The results of the study can be useful for the research and development of high-risk applications.

Keywords: accidents, electrical/electronic/programmable electronic control systems, disasters, reliability, dangerous

failures, dangerous states, railway automation systems, functional safety.

Надійшла 15.05.2023 р.

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, ректор Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: info@kart.edu.ua

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7626-9933>

Бунчук Олег Анатолійович, департамент автоматики та телекомунікацій Укрзалізниці, м. Київ, Україна. E-mail: obunchukov@gmail.com

Кустов Віктор Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри АТ, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: kustov.viktor55/@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9773-5470>

Сотник Василь Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри АТ, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: sotnyk.va@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8039-1392>

Panchenko S. V., doctor of technical sciences, professor, rector of the Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: info@kart.edu.ua

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7626-9933>

Bunchukov O. A., Department of Automation and Telecommunications of Ukrzaliznytsia, Kyiv, Ukraine. E-mail: obunchukov@gmail.com

Kustov V. F., Ph.D., Associate Professor, Department of JSC, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kustov.viktor55/@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9773-5470>

Sotnyk V. O., Ph.D. Associate Professor, Department of JSC, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: sotnyk.va@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8039-1392>

LIASHENKO VADYM, Process engineer (Communal Enterprise «Kharkiv Metro», Kharkiv, Ukraine),

SERHII YATSKO, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics,

VASCHENKO YAROSLAV, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics

(Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine),

KHVOROST MYKOLA, Doctor of engineering, Professor of the Electric Transport Department (O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine)

Simulation of The System of Provision of Target Braking of Rolling Stock

This research presents a framework simulation model that can be used to simulate target braking of rail rolling stock, with a particular focus on target braking in metro systems. The model takes into account various factors that might affect stopping accuracy, including errors in speed measurement and track sensors' positioning. The research considered the possibility to minimize the required equipment for the target braking system, with its conclusions providing insights for possible solutions that would require minimal additional equipment or infrastructure modifications. Through simulation in MATLAB®/Simulink® environment, this study investigates the individual impact of these factors on the target braking precision of rail rolling stock. By identifying these critical factors that affect braking accuracy and quantifying their impact, this research provides valuable insights into strategies for optimizing braking performance and enhancing passenger safety and comfort.

Keywords: railway operation; urban rail transport; automatic train operation; mathematical model; uncertainty impact; time saving; traffic optimization.

The aim of the article is to develop a technology for the selection of means of ensuring target braking of rolling stock by modelling using automated and automatic train control systems. One of the key aspects of developing such a technology is, on the one hand, the creation of reliable equipment that ensures the transmission, processing and storage of a large amount of data and knowledge, and, on the other hand, minimising resource consumption.

This area of research opens up great opportunities for improvement of train control systems, ensuring their safety and optimising their performance. The research results can be of great importance for the development of both railway and urban transport, in particular for improving the processes of target braking of rolling stock, ensuring traffic safety and reducing the risk of accidents.

Ultimately, the results of this study are intended to improve future practices in the design, maintenance and operation of automated rolling stock control systems, as well as to contribute to the safety of passengers and improve the quality of service of their demand for transportation.

Problem statement

The relevance of the study of precision braking systems is closely related to the importance of improving rail transport systems in general. The introduction of automatic train operation systems and, in particular, automatic target braking systems is possible and appropriate both on mainline railway transport and urban rail transport, in particular, on subways. The tasks that can be solved with the help of precision braking systems and the priorities for their implementation depend on many factors and the specifics of the transport system in which they are intended to be implemented. The list of tasks can include both reducing energy consumption for traction and optimising traffic schedules or increasing the system's capacity [1]. This study will focus on off-street urban railways - metros. The peculiarity of subways is their high route capacity, which reaches and exceeds the figure of 50 thousand passengers per hour per direction [2]. This high figure is achieved due to the specific nature of the metro as an urban railway.

Subway systems are separated from any street traffic and use their own right of way [2], which determines their location underground or on elevated tracks. This allows metro systems to provide high route speeds with a significant passenger capacity per unit (train) compared to other forms of urban transport.

The development and expansion of cities and the growth of their population are inevitably associated with an increase in demand for passenger transport in the city and an increase in the average distance travelled by transport. The growth of both of these values entails increased requirements for the capacity of the urban transport systems. At the same time, the reserves of the metro systems themselves for increased traffic are limited by their technical capabilities. This makes it necessary to implement such measures as increasing average operating speeds, acceleration and braking rates, etc. The introduction of targeted braking systems is the most effective measure to achieve the maximum possible deceleration rate during braking while maintaining a high level of comfort for passengers.

Analysis of recent research and publications

A number of studies have been devoted to the problems, theoretical foundations and economic basis for the introduction of automatic train operation systems, particularly in the context of integration them with rail traffic control [1, 3-6]. Much attention is paid to the problems of modelling of rolling stock dynamics [7-11].

Recognizing the high scientific and practical value of the above works, it should be noted that at the moment the problem of creating systems for automatic train operation and automatic targeted braking has not been given enough attention. It is important to use a comprehensive systematic approach to the problem, which simultaneously takes into account both the advances in the field of rolling stock dynamics and automatic operation systems and the economics of railway enterprises. The topic of automatic train operation and targeted braking requires further research and development.

Statement of the problem

The main issue that will be considered in this article is the creation of a mathematical model to evaluate the technology for implementing the targeted braking system under conditions of external perturbations and imprecisions. Thus, the purpose of this work is to create a framework model that would allow testing the train precision braking system with the ability to adapt it to the specifics of any rail rolling stock, as well as with the possibility of including certain solutions for implementing the algorithm. In particular, this paper will consider the study of the accuracy of the implementation of the targeted braking algorithm under conditions of uncertainty and incomplete input information. A mathematical model created in MATLAB®/Simulink® will be used to

investigate the separate influence of such factors as deviations in the location of track sensors, changes in the diameter of the wheel set with wear, and errors in speed measurement.

The main part of the material

Automatic targeted braking of rolling stock is the process of controlling the speed of trains in deceleration mode, which ensures its reduction to the required value or stopping at a given point on the track. For suburban and metro electric trains, the typical operating modes are acceleration, coasting, and braking [12]. The introduction of intense targeted braking has a significant and comprehensive effect on the performance of rolling stock. When braking manually, the electric train driver chooses the moment of braking start with a margin for his own mistake or incorrect choice of braking mode. This limits the average deceleration of the train, even if it is technically possible to apply more rapid deceleration. As optimization of driving method is one of possible ways to achieve energy savings [14], targeted braking is an effective way not only to improve the quality of passenger service and reduce the workload of the train driver, but also to increase the carrying capacity of the metro and reduce electricity consumption for rolling stock traction.

Different deceleration levels are set to regulate the braking force during targeted braking, and if only one level can be set, gradual stepped braking is used. The braking mode is selected depending on the deviation between the train's programmed speed and the actual speed, and in some systems, the derivative of this deviation. In some systems, the speed is set by a software device located along the track. In this case, the value of the set speed is determined by the distances between the elements of the ground applications or the frequency of the electrical signal. In other systems, the speed is set as a function of the measured path or is calculated based on the leading solution of the equation of train motion [5].

The calculated trajectory of the targeted braking as a function of the path is based on the value of the average deceleration rate of the train. However, the actual braking trajectory will certainly differ from the calculated one, since the train speed during braking is influenced by many factors, and they cannot always be accurately taken into account. For example, to ensure the comfort of passengers, a rapid change in braking modes is unacceptable, as it leads to unpleasant jolts during movement. Therefore, in general, it can be assumed that the train speed when braking when approaching a station is a function $V = f(V', a, j, \dots)$, where V' is the initial speed when approaching the station, km/h; a is the deceleration value when braking, m/s^2 ; j is the jolt, m/s^3 , etc. In turn, a train is also a complex dynamic system with a large number of nonlinear connections between structural elements [10, 15]. It should be emphasized that traction rolling stock is a very complex engineering structure and, as a result, is a complex object

of simulation [16]. Therefore, in general, it is possible to raise the question of the "level of detail" of modelling of train dynamics, which will be defined as the number of factors and dependencies taken into account in the modelling of movement. In this paper, a train is considered as a material point whose movement is affected by acceleration and deceleration from the operation of traction motors and brake systems, as well as by the main resistance to movement. To determine the main resistance to movement, studies conducted on the Kharkiv metro were used [7].

The main characteristic of automatic targeted braking is the accuracy of stopping. The smallest permissible error (within $\pm 0.3...0.45$ m) is required for closed-type stations. At open-type stations, where the length of the boarding platform slightly exceeds the length of the train, the acceptable accuracy of stopping is ± 1.5 m [5].

The introduction of an automatic targeted braking system requires significant capital investment, since not only the rolling stock but also the track sections are

changed. The issue of reducing such capital investments is quite evident and requires a more in-depth consideration. Given the need to reduce costs, the targeted braking system proposed in the model consists of the following main elements:

- 1) a braking microcontroller based on fuzzy logic that makes decisions on the application of different braking modes in accordance with the deviation of the actual train trajectory from the calculated one;
- 2) a trajectory calculation system;
- 3) three track sensors that indicate the current coordinate of the train;
- 4) speed measurement system;
- 5) a system for calculating the current coordinate of the train based on the readings of the speed measurement system.

The arrangement of the track sensors (D_1 , D_2 and D_3) used in the model is shown in Figure 1. Point D_4 indicates the target stopping point of the train.

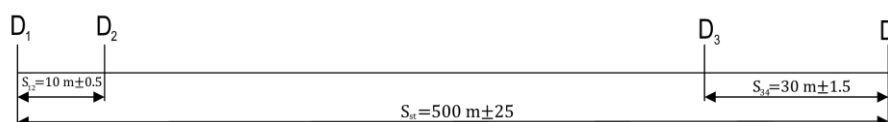


Fig. 1. Layout of track sensors

Since such a system does not use a large number of track sensors to continuously monitor and correct the current coordinate of the train's location, it is beneficial in terms of capital investments, as it minimizes the amount of equipment required. At the same time, such a system relies on the measured (using analogue axial sensors) speed of the rolling stock to calculate the current position of the train. It is sensitive both to its own internal measurement errors and to changes in the diameter of wheel sets as they wear out. In combination with the possibility of improper positioning of the track sensor that signals the current coordinate to the rolling stock, the resulting deviation of the actual stopping point from the target point can be unacceptably large.

Therefore, when calculating the distance travelled by a train, a certain measurement calibration is required. To do this, at a predetermined distance (the model assumes 10 m, which corresponds to approximately four revolutions of a normal-diameter metro car wheel set), a second track sensor D_2 is installed after the first track sensor D_1 , which transmits a second, corrective coordinate to the train. The measured distance between these sensors is compared with

the nominal distance between them, and then a corrective coefficient is calculated.

The third track sensor is located 30 meters from the stopping point. After this sensor is passed, the current coordinate of the train calculated by the braking system is reset to 470 meters ($S_{ST} - S_{34}$), while the previously calculated corrective coefficient is still used to further calculate the braking trajectory.

The flowchart of the developed simulation model is shown in Figure 2. A general view of the brake controller of the model developed in MATLAB®/Simulink® is shown in Figure 3. The brake controller used in the model is built with fuzzy logic [17] using the Fuzzy Logic Toolbox™ package of MATLAB® and uses two input parameters for control: ΔV (the difference between the set speed V' and the current measured speed V_M), and j (jolt, rate of change of acceleration). The membership functions of the linguistic terms used in the fuzzy controller for targeted braking are shown in Figure 4. The ruleset used by the controller is shown in Figure 5. The output surface of the controller is shown in Figure 6.

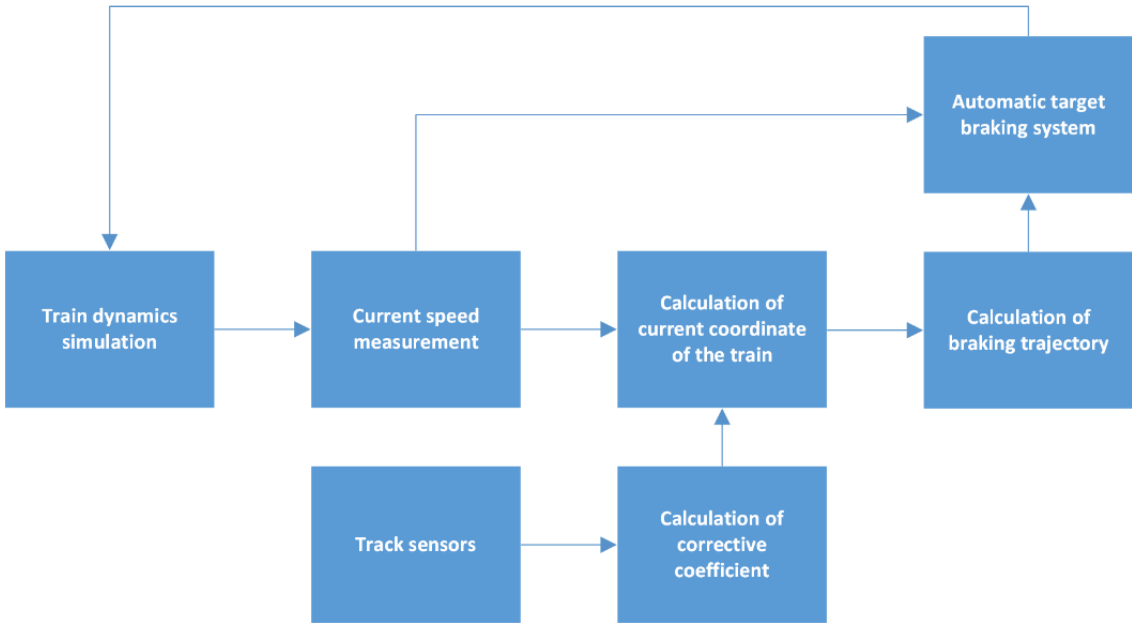


Fig. 2. Flowchart of the framework model for simulation of automatic target braking system.

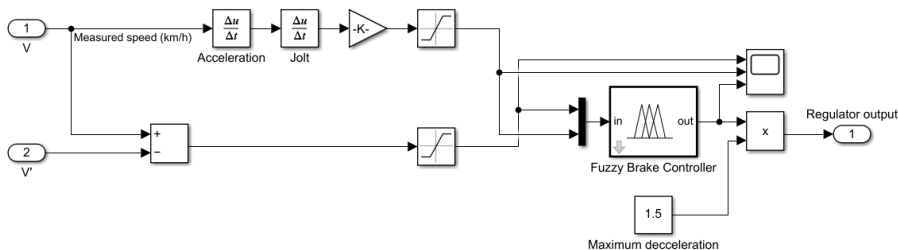


Fig. 3. Simulation of the brake controller of automatic target braking system

The stopping error is defined as:

$$\Delta S = S_{act} - S_{st} \quad (1)$$

Here S_{act} is the actual value of the distance travelled by the train after passing the first track sensor (point D_1 in Fig. 1) in metres, and S_{st} is the distance between the first track sensor D_1 and the calculated stopping point in metres (normally equal to 500 m).

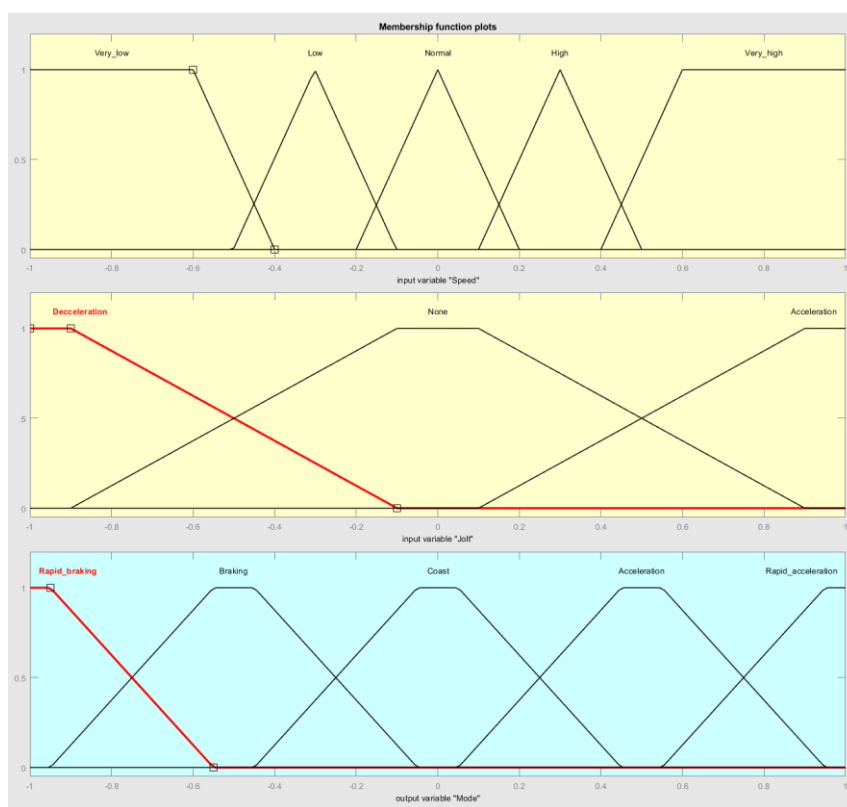


Fig. 4. Membership functions for input variables “Speed”, “Jolt” and output variable “Mode”

1. If (Speed is Very_low) and (Jolt is Deceleration) then (Mode is Coast) (1)
2. If (Speed is Very_low) and (Jolt is None) then (Mode is Coast) (1)
3. If (Speed is Very_low) and (Jolt is Acceleration) then (Mode is Coast) (1)
4. If (Speed is Low) and (Jolt is Deceleration) then (Mode is Coast) (1)
5. If (Speed is Low) and (Jolt is None) then (Mode is Coast) (1)
6. If (Speed is Low) and (Jolt is Acceleration) then (Mode is Braking) (1)
7. If (Speed is Normal) and (Jolt is Deceleration) then (Mode is Coast) (1)
8. If (Speed is Normal) and (Jolt is None) then (Mode is Braking) (1)
9. If (Speed is Normal) and (Jolt is Acceleration) then (Mode is Rapid_braking) (1)
10. If (Speed is High) and (Jolt is Deceleration) then (Mode is Braking) (1)
11. If (Speed is High) and (Jolt is None) then (Mode is Rapid_braking) (1)
12. If (Speed is High) and (Jolt is Acceleration) then (Mode is Rapid_braking) (1)
13. If (Speed is Very_high) and (Jolt is Deceleration) then (Mode is Rapid_braking) (1)
14. If (Speed is Very_high) and (Jolt is None) then (Mode is Rapid_braking) (1)
15. If (Speed is Very_high) and (Jolt is Acceleration) then (Mode is Rapid_braking) (1)

Fig. 5. Ruleset of the fuzzy controller of automatic target braking system

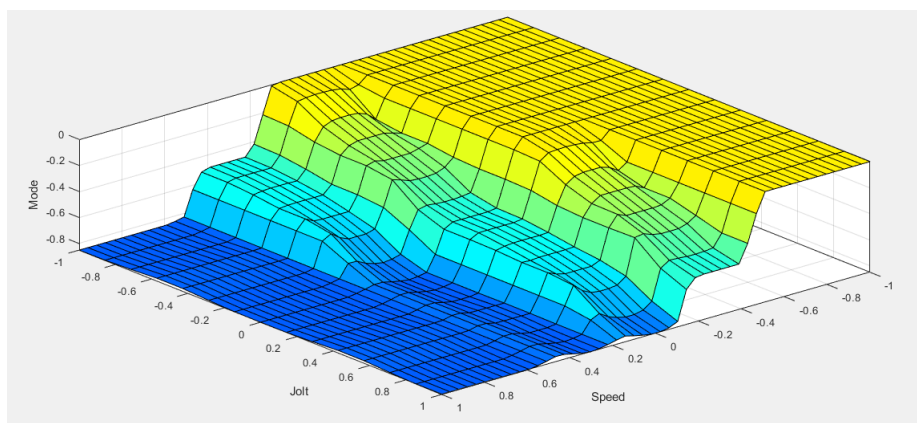


Fig. 6. Output surface of the fuzzy controller of automatic target braking system

The simulation considered the following principal factors that could affect the accuracy of the calculation of the current coordinate by the rolling stock, and as a result, the stopping error:

- variation of the wheel set diameter in the range between 790 and 725 mm (respectively for a new and a fully worn bandage);
- measurement error of the current speed value by axial sensors in the range of ± 2.5 km/h;
- error of the positioning of the first (D1) and second (D2) track sensors between each other (distance S12 in Fig. 1) in the range of ± 0.5 m
- error of the positioning of the third track sensor (D3) relative to the stopping point (D4) in the range of ± 1.5 m;
- positioning errors of the first group of track sensors (D1 and D2) relative to the stopping point (D4) in the range of ± 25 m.

By gradually changing each of these factors within the specified limits, their individual impact on the accuracy of targeted braking is determined. Thus, in the course of the research, it was found that the diameter of the wheel set (Fig. 7) and the error of the speed measurement system (Fig. 8) do not have a significant effect on the stopping error. Variation of the wheelset diameter in the entire possible range of its values did not lead to a significant deviation of the actual stopping point of the train from the

calculated one as it remained within ± 0.1 m. Similar error margins were observed when changing the error of speed measurement.

Regarding the change of the relative position of the track sensors among themselves, it was found that the stopping error is directly proportional to the error of their positioning. This is true both for the relative position of sensors D1 and D2 (Fig. 9) and for the positioning error of sensor D3 relative to the stopping point (Fig. 10), with the positioning accuracy of sensor D3 having a slightly greater impact on the accuracy of targeted braking. At the same time, due to the use of the third sensor D3, which updates the coordinate of the train while it is moving within the station, even very significant disturbances in the location of the first group of track sensors (D1 and D2) relative to the station are compensated. Thus, a variation of their placement within ± 15 meters (3%) did not lead to unacceptable deviations from the stopping point (Fig. 10); it should also be noted that a deviation of the location of the first group of sensors towards the station leads to a more rapid increase in the stopping error than a deviation in the other direction.

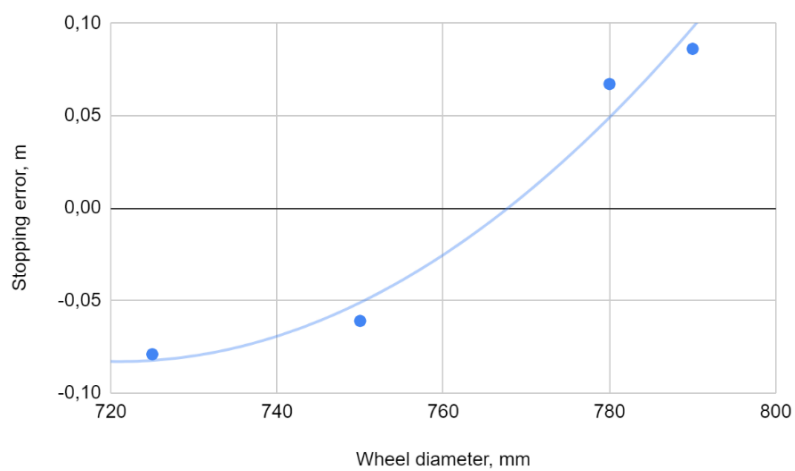


Fig. 7. Impact of the wheelset diameter on the precision of automatic target braking

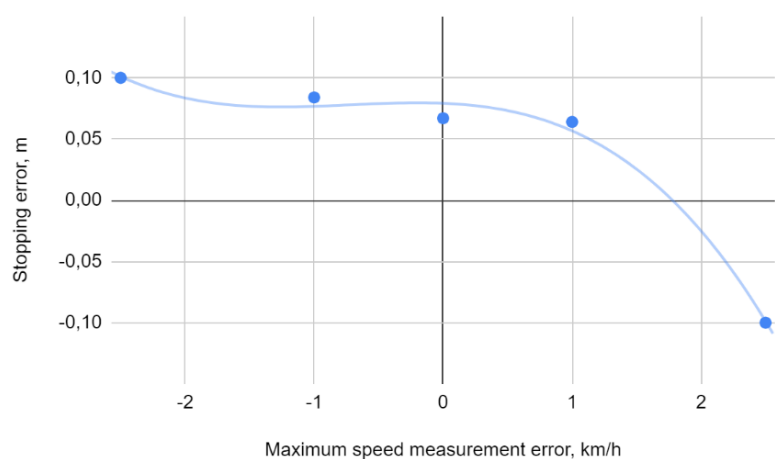


Fig. 8. Impact of the speed measurement error on the precision of automatic target braking

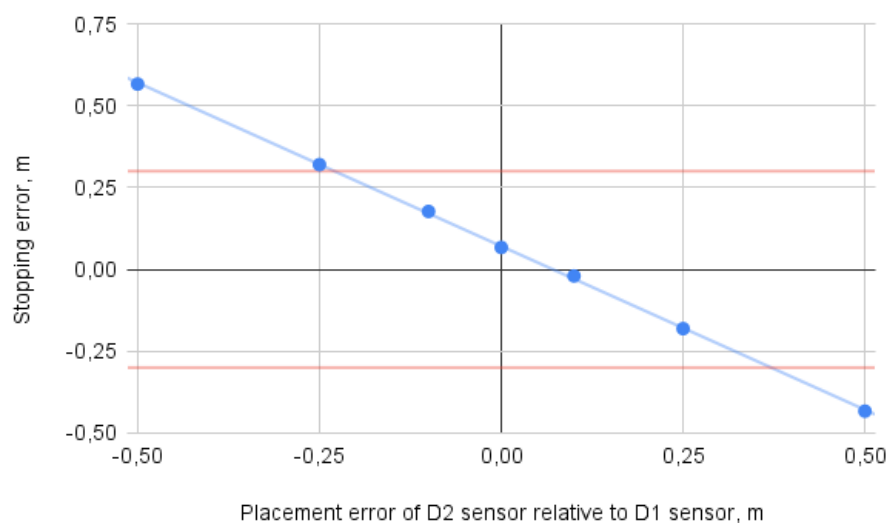


Fig. 9. Impact of error of positioning of corrective sensor D_2 relative to initial sensor D_1 on the precision of automatic target braking

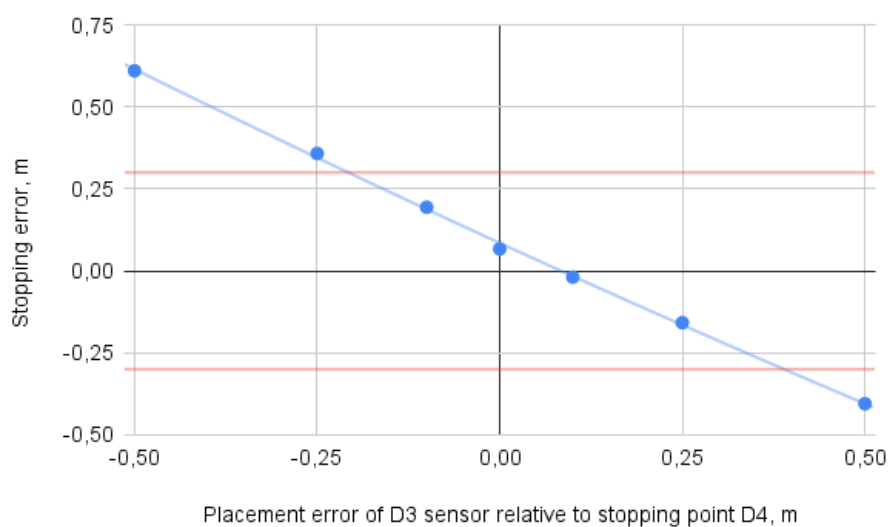


Fig. 10. Impact of error of positioning of corrective sensor D_3 relative to the stopping point D_4 on the precision of automatic target braking

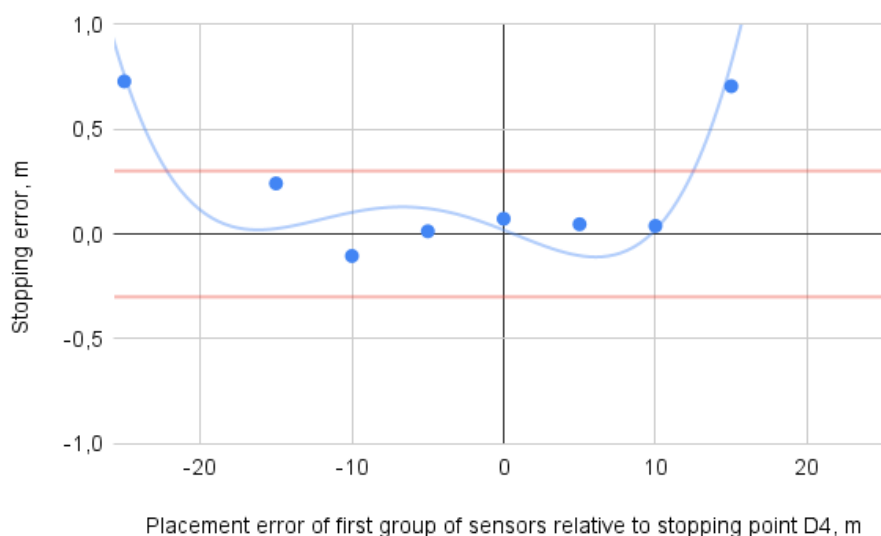


Fig. 11. Impact of error of positioning of the first group of track sensors (D_1 and D_2 combined) relative to the stopping point D_4 on the precision of automatic target braking

Conclusions

As part of the study, a mathematical framework model was created for the development and testing of an automatic targeted braking systems. As an example, this paper considered a system based on a fuzzy controller with the Mamdani algorithm. Modelling with the consecutive addition of input deviations that may occur during the use of the system made it possible to track the influence of each individual factor on the resulting braking precision. The modelling showed the following:

- rolling stock elements, such as wheel set diameter or speed measurement system error, can be accounted for by using a corrective coefficient and do not have a significant impact on braking accuracy. This means that the rolling stock itself does not necessarily need to implement new speed measurement systems and can use existing devices;
- even with significant deviations (up to 3-5%) in the installation of track sensors, the train stopping position remains within acceptable limits. This makes it possible to use a lower accuracy rating when placing track sensors.

The conclusions from the modelling are particularly relevant in the context of reducing capital investment in the implementation of train control systems in general and automatic targeted braking in particular.

References

1. Palant O. Y., Stamatina V. V. Ohliad naiavnykh i perspektyvnykh system avtovedennia poizdiv metropolitenu. [Overview of the Existing and Promising Automatic Train Operation Systems for Underground]. The Problems of Economy №2 (40), 2019, pp. 119–125 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2019-2-119-125>
2. D. Johnson Victor (late), S. Ponnuswamy. «Urban Transportation. Planning, Operation and Management». Tata McGraw Hill Education Private Limited, New Delhi, 2012.
3. Palant O. Y., Stamatina V. V. Aktual'ni problemy zabezpechennya enerhozberezhennya v protsesi vprovadzhennya innovatsiynoyi systemy avtovedennya poizdiv metropolitenu [Actual problems of ensuring energy saving in the process of implementation of the innovative system of subway trains]. Proceedings of the Economic and legal problems of development and promotion of economic activity in modern conditions: a collection of sciences. Works on the materials of the II Round Table, Kharkiv, 2019, pp. 197-202 [in Ukrainian].
4. Palant O. Y., Stamatina V. V., Tararuyev O. Y. Economic impact of the implementation of the automatic train guidance system on the labor resources of the metro enterprise (on the example of the Municipal Enterprise Kharkiv Metro). Ekonomichnyi Prostir [Economic Space] №161, 2020, pp. 82-88 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/2224-6282/161-15>
5. Edited by Baranov L. A. Mikroprotsessornyye systemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava [Microprocessor-based automatic train operation systems for electric rolling stock]. Transport, Moscow, 1990.
6. Marushevsky S. O, Kapustin, D. O., Dmytryenko D. S., Kushenko O. V. Supervisory control on railways of

- Ukraine. Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University №3 (210), 2014, pp. 160-165 [in Ukrainian].
7. Khvorost M. V., Kalkamanov S. A., Griaznova S. A. Modeli vzaiemodii rukhomoho skladu metropolitenu z povitriannym seredovyschem ta bezpeka na transporti [Models of interaction of metro rolling stock with the air environment and transport safety]. O. M. Beketov National University of Urban Economy, Kharkiv, 2017 [in Ukrainian].
 8. Miamlin S. V. Modelirovaniye dinamiki relsovykh ekipazhey [Modelling of rail vehicle dynamics]. New Ideology, Dnipro, 2002 [in Russian].
 9. Tkachenko V., Sapronova S., Braikovska N., Tverdomed V. Dynamic interaction of rolling stock and track on lines of speed motion combined with freight. «European scientific platform», Vinnytsia, 2021 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36074/dvtrsklshsv-monograph.2021>
 10. Diomin J., Zakhovaiko O., Chernyak G., Shevchuk P. Computer simulation of railway vehicles dynamics. Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Mechanical engineering series. №1 (70), 2014, pp. 94-98 [in Ukrainian].
 11. Yatsko S., Sytnik B., Vaschenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, №1/9 (97), 2019, pp. 48-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520>
 12. Basov H. H., Yatsko S. I. Rozvytok elektrychnoho motorvahonnoho skladu [Development of electric multiple unit rolling stock]. «Apeks+», Kharkiv, 2005 [in Ukrainian].
 13. Yatsko S., Sidorenko A., Vaschenko Ya., Lyubarskiy B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with onboard energy storage. International journal of renewable energy research, №9 (2), 2019, pp. 848-858.
 14. Qing Gu, Tao Tang, Yong-duan Song. A survey on Energy-saving Operation of Railway Transportation Systems. Measurement and Control, №43 (7), 2010, pp. 209-211. <https://doi.org/10.1177/002029401004300704>
 15. Shpachuk V. P. Effect of mutually amplifying action of two coordinate shock loading in problems of dynamics of knots of machines. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. №6, 2016, pp. 89-94.
 16. Maksym Spiriyagin, Colin Cole, Yan Quan Sun, Mitchell McClanachan, Valentyn Spiriyagin, Tim McSweeney. Design and Simulation of Rail Vehicles. CRC Press, Boca Raton, 2014.
 17. Kyryk V. V. Matematychnyi aparat shtuchnoho intelektu v elektroenerhetychnykh systemakh: pidruchnyk [Mathematical apparatus of artificial intelligence in electric power systems: a handbook]. «Politekhnik» Publishing, Kyiv, 2019 [in Ukrainian].
- Ляшенко В. М., Яцько С. І., Ващенко Я. В., Хворост М. В. Моделювання системи забезпечення прицільного гальмування рухомого складу.**
Анотація. У даному дослідженні представлено структурну імітаційну модель, яка може бути використана для моделювання прицільного гальмування залізничного рухомого складу, зокрема, прицільного гальмування в системах метрополітену. Модель враховує різні фактори, які можуть вплинути на точність зупинки, включаючи похибки вимірювання швидкості та позиціонування колійних датчиків. У дослідженні розглянуто можливість мінімізації необхідного обладнання для системи прицільного гальмування, а його висновки дають уявлення про можливі рішення, які потребують найменшого додаткового обладнання або модифікацій інфраструктури. За допомогою моделювання в середовищі MATLAB®/Simulink® в цьому дослідженні вивчається індивідуальний вплив цих факторів на точність цільового гальмування залізничного рухомого складу. Визначивши ці критичні фактори, що впливають на точність гальмування, і кількісно оцінивши їх вплив, це дослідження дає уявлення про стратегії оптимізації гальмівних характеристик і підвищення безпеки та комфорту пасажирів.
Ключові слова: експлуатація залізниць; міський залізничний транспорт; автоматичне керування рухом поїздів; математична модель; вплив невизначеності; економія часу; оптимізація руху.

Надійшла 09.06.2023 р.

Ляшенко Вадим Михайлович, інженер-технолог, Комунальне підприємство «Харківський метрополітен», Харків, Україна. E-mail: lyashenkovm99@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1139-3537>

Яцько Сергій Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: ua.yatsko@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>

Ващенко Ярослав Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: yaroslav.vashchenko@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5030-4107>

Хворост Микола Васильович, доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна. E-mail: mykola.khvorost@kname.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2606-8228>

Liashenko Vadym, Process engineer, Communal Enterprise «Kharkiv Metro», Kharkiv, Ukraine. E-mail: lyashenkovm99@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1139-3537>

Yatsko Serhii, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ua.yatsko@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>

Vaschenko Yaroslav, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: yaroslav.vashchenko@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5030-4107>

Khvorost Mykola, Doctor of engineering, Professor of the Electric Transport Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine. E-mail: mykola.khvorost@kname.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2606-8228>

DENIS LOMOTKO, Doctor of engineering, professor,
DENIS KOVALOV, graduate student
(Ukrainian State University of Railway Transport)

Improvement of the logistics of container transportation at border stations and terminals

Abstract. Improving the quality of transportation services requires carriers to find better methods of optimizing routes and work with containers when traveling from Ukraine to EU countries. It has been established that container transportation already occupies a significant share of the market and the tendency to use it is only increasing. Ukraine, as a transit state, has great potential for the development of its own railway transportation system. This article studies the optimization of border crossings passage to implement and expand transport capabilities of Ukrainian railways.

Keywords: Ukrainian railways, container, transportation, Ukraine, rail transport.

1. Introduction

Currently, due to political situation in Ukraine, there is an increasing interest in the cooperation with the EU countries. This creates the need to improve terminals or railway stations of Ukraine, since it is our country that is primarily interested in integration into the EU logistics system. Ukraine's favorable geographical position allows this idea to be implemented. There are 4 out of 10 existing pan-European transport corridors pass through the territory of Ukraine. Due to its location, Ukraine has the highest transport transit rating in Europe - 3.11 points. For instance, Poland has much smaller territory and a transport transit rating of only 2.72 points [3], earns almost 4 billion dollars profit from transportation every year. Ukraine has much better potential. The article primarily considers the involvement of rail transport, which occupies 18% of all container transportation in Ukraine and has a number of advantages that rail transport can provide [10].

Recently, container transportation occupies an increasingly important share in all freight traffic. On practice container transportation allows to reduce the cost of packing operations by more than 2 times, increase labor productivity by 4-5 times, and provide conditions for complex mechanization and automation of transshipment operations [13], [14].

Transport and logistics system of Ukraine is at a rather low level compared to other countries of the world. Transport corridors' development and arrangement level does not meet the growing needs of trans-European communication. Only 70% of the transit potential is used.

International transport corridors passing through the territory of Ukraine do not meet international requirements and the market itself is not well-structured. Most of the problems in this area are related to the disproportionate development of transport and logistics services. As a result, according to the logistics efficiency index Ukraine ranks 102nd among 155 countries. Based on this, it is proposed to modernize and expand border terminals and stations, with further integration into the European transport system.

2. Relevance

Despite of the great potential, Ukrainian railways have currently stuck at a rather low level of providing the transporting service. It is clear that this problem has to be resolved in order to have a chance for integration in European rail system and have access to EU market. Thus, we have a challenge of modernizing the border container terminals in Ukraine. The method we propose would help our rail system to resolve a number of issues concerning with delays and safety of cargo during its transportation through the border terminals. It would greatly benefit the country in general and will boost the development of our rail infrastructure.

3. Literature Review

Prominent scientists of different countries and cultures made a significant contribution to the study of the problems of the development of container transportation [14, 15, 16]. A thorough technical analysis of foreign experience in the organization of trailer transportation and features of the technical support of the relevant transportation is carried out in the article[9]. The need to ensure the development of container terminals is a priority task for the modernization of the transport industry in general. At the same time, today the issue of the development of Ukrainian terminals has not been fully investigated. There is no plan for the development of engineering and technical support for container

transportation, no technical solutions have been invented that could offer a solution to certain problems and contradictions that cause delays at border terminals.

4. Research Methodology

The railway transport network of Ukraine allows efficient transportation of containers to EU countries with further integration into the European logistics and transport system. The border with Poland has 2 railway crossings that can handle container trains. According to its structure, this is a two-stage transport task, when the transportation of products is carried out in two stages: first from the shipper to the border crossing, then from this border crossing to the receiver (Fig. 2)

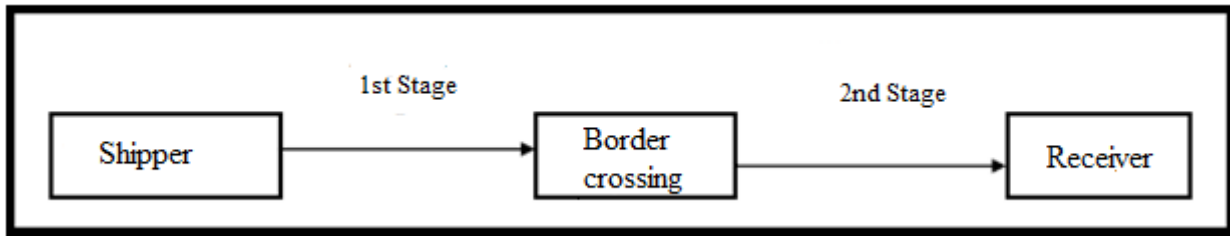


Fig. 1. - Visualization of the two-stage transport problem

Setting up an economic-mathematical model. Transportation from the starting point to the final point takes place in 2 stages. First from the shipper to the border crossing point, and then from the intermediate point to the receiver. We denote the number of shippers by m , and the amount of products available to each of them by $a_i (i = \overline{1, m})$. We denote the number of receivers by n , the demand of each recipient by $b_j (j = \overline{1, n})$. The number of border crossings is denoted by p , and the capacity of each k -border crossings point is denoted by $c_k (k = \overline{1, p})$. The costs of transportation of a unit of production from the i -shipper to the k -border crossing point are denoted by $s_{ik} (i = \overline{1, m}; k = \overline{1, p})$, and the costs of transportation for

a unit of production from the k -border crossing point to the j -receiver - through $t_{kj} (k = \overline{1, p}; j = \overline{1, n})$. We need to find volumes x_{ik} transportation of products from shipper to border crossing points $(i = \overline{1, m}; k = \overline{1, p})$ and volumes y_{kj} transportation of products from border crossings point to receivers $(k = \overline{1, p}; j = \overline{1, n})$, so that the total costs z for all routes would be minimal.

Under the given conditions and designations, the economic-mathematical model of the two-stage transport problem can be expressed as:

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p s_{ik} x_{ik} + \sum_{k=1}^p a_k * (v_k + f_k) + \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^n t_{kj} y_{kj} \rightarrow \min \quad (1.1)$$

$$\sum_{k=1}^p x_{ik} \leq a_i, \quad i = \overline{1, m}; \quad (1.2)$$

$$\sum_{k=1}^p y_{kj} = b_j, \quad j = \overline{1, n}; \quad (1.3)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} = \sum_{j=1}^n y_{kj} \leq c_k, \quad k = \overline{1, p}; \quad (1.4)$$

$$x_{ik} \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, p}; \quad (1.5)$$

$$y_{kj} \geq 0, \quad k = \overline{1, p}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.6)$$

The cost function (1.1) of the problem (1.1) – (1.6) reflects the requirement to find the most economical (currency) plan for product transportation.

a_k – volume of transportation for k terminal,

f_k – waiting costs for k terminal;

v_k – tariff cost of transshipment for k terminal, USD/t.

Other conditions of the problem mean, that:

(1.2) – the volume of products to be exported from each sender must not exceed the available stock;

(1.3) – the volume of products imported to each receiver must correspond to its demand;

(1.4) – all freight brought to each border crossing point from the shipper must then be sent to the receiver, and the bandwidth capacity of each border crossing point should be taken into account;

(1.5), (1.6) – volumes of transportation for each of the routes must be integral.

Mathematically, problem (1.1) – (1.6) is a linear programming problem with continuous non-negative variables. It can be solved using the simplex method, or it can be reduced to a classic one-stage transport problem and solved using the potential method.

The conditions for the existence of a solution to the problem are as follows:

1) the total stock of products of all shippers allows to satisfy the aggregate demand of all receivers:

$$\sum_{i=1}^m a_i \geq \sum_{j=1}^n b_j \quad (1.7)$$

2) the bandwidth capacity of all border crossing points is sufficient to process the total flow of products in the transport network:

$$\sum_{j=1}^n b_j \geq \sum_{k=1}^p c_k \quad (1.8)$$

If the specified condition is not fulfilled, the waiting costs for k -border crossing point are entered:

$$f_k = CH_k * \frac{Q_k}{S_k}; \quad (1.9)$$

CH_k – the cost of waiting time at the terminal, cont/h;

Q_k – the total number of containers for processing at k transition, cont;

S_k – processing capacity of transition k per day, cont.

5. Results and Discussion

Most of the freight that run through the territory of Ukraine is transported by rail or road transport, which creates fierce competition within the country's freight transportation market. However, considering the focus on the European freight transport market, there are some factors that will proof rail transport benefit [12]. For example, EU countries pay considerable attention to reducing carbon dioxide emissions. The EU has set itself the goal of reducing greenhouse gas emissions by 55% by 2030. According to preliminary data, net EU emissions in 2020 were 34% below 1990 levels. This means that the majority of road freight transportation at a distance of more than 300 km is planned to be transferred to other modes of transport, for example, railway or sea transport [1]. Transport accounts for 27% of Europe's total CO2 emissions. Rail is the most energy efficient mode of passenger transport. If more people were to travel by train and more freight transported by rail (rather than more polluting modes) then the CO2 emissions from the transport sector would be greatly reduced [8], [11].

Ukraine has a great transit potential; it is one of the most powerful railway countries in Europe. Ukraine's rail network is managed by the state and is one of the most extensive in Europe, with over 20,000 km of track (not including the occupied territories, the network of which is not operating today), of which 45% is electrified [7]. In terms of freight transportation, Ukrainian railways rank fourth on the Eurasian continent, losing to the railways of

China, Russia and India. The load capacity of Ukrainian railways (annual volume of transportation per 1 km) is 3-5 times higher than the corresponding indicator of developed European countries.

There are 3 railway transport corridors pass through the territory of Ukraine - No. 3, 5, 9. Through the Ukrainian ports of Ismail and Reni, there is interaction with the pan-European corridor No. 7, which passes through the Danube River. The current length of the national network of railway transit corridors in Ukraine is 3162 km. These are mainly two-track electrified highways equipped with self-locking, characterized by a high level of use of technical means. In addition, transportation along the TRACECA international transport corridor (Europe – Caucasus – Asia) is getting developed.

Ukraine pursues an active policy of supporting European initiatives on the ITC, offers its options for corridors to the European Community.

According to the results of English Rendell Institute research regarding the transit ratio (the ratio of the number of physical tons transshipped by the direct option to the total number of transshipped physical tons) [4]. Ukraine ranks first in Europe, but the utilization of Ukraine's transport infrastructure is still quite low. The creation of transport corridors and their entry into the international transport system is recognized as a national priority for the development of the transport and road infrastructure of Ukraine.

As of November 16, 2022, 5,045 wagons with products were sent abroad and 1,310 wagons with products were imported through the Izov - Hrubieszów crossing, of which 1,851 - with grain, 1,352 - with containers, 820 - with metal products, 141 - with ore. The average daily processing decreased by 36 cars compared to October - to 398 (315 in export, 82 - in import), in particular due to a significant decrease in the transportation of raw ore materials. Currently, the share of such products among the entire cargo flow is 10%, while ore used to occupy up to 60% of the volume.

Therefore, the crossing Izov – Hrubieszów is underloaded by 50% of its capacity (six trains are served daily instead of 12).

1,361 wagons with goods were exported through the Yagodyn station, and 933 were imported. The Polish side reported that the crossing is underloaded with bulk products, as a result of which it loses one train per day in processing. This month, the average daily rate of

processing of the fleet is 143 cars (85 - abroad and 58 - to Ukraine).

At the crossing Mostyska 2 - Medyka this month, the daily transfer of rolling stock increased by 33 cars to 209. In total, 2,008 cars were transferred from Ukraine. There are 712 wagons in the queue (-147 compared to the beginning of the month).

The representative of PKP Cargo reported that the operator is ready to provide locomotives for receiving cargo at night. However, in light of recent events, the company has yet to develop a clear regulation of the actions of co-workers during air-raid alert.

Ukrainian shippers initiated the process of approving the passage of rolling stock with an axle load of 25 tons through this transition. During the meeting, it was concluded that the Ukrainian rail near the border is not adapted to such process of. Meanwhile, the rails in Poland are designed for the movement of such transport, with the exception of non-general use rails of some terminals.

Only 92 wagons were processed at the Rava-Rusk - Verkhvat crossing in 16 days of November, the daily transfer was reduced from 12 to 6 wagons in October. The receiving stations (Verhrata, Szczecin) are clogged with wagons with clay. The representative of the Polish operator assumes that the acceptance of clay will resume under the conditions of reducing the accumulation of such rolling stock to 200 units. However, other products can be accepted without delay.

Based on the purpose of this article, the ability of Ukrzaliznytsia stations to process container trains bound for EU countries is considered. Currently, Ukraine has at its disposal 5 container terminals at the border stations of Ukraine. That is why it is advisable to highlight the terminals at the border crossing segment:

1. Mostyska-Medyka (Poland)
2. Jagodin-Dorohusk (Poland)
3. Vadul Siret - Dornesti (Romania)
4. Chop — Chierna nad Tisou (Slovakia) / Zahon (Hungary) [9]

All processing capacity data are listed in the table below.

Table 1. Transshipment terminals at border stations of Ukraine

Terminal No	Name of the transition	Station/ Terminal (Ukraine)	Processing capacity wagons/day
1	Mostyska-Medyka	Mostyska-2/MC Lviv	180
2	Yagodin-Dorogusk	Yagodin/Avtokom	25
3	Vadul Siret - Dornesti	Vadul-Siret/MC Lviv	70
4	Chop — Chierna nad Tisou	Chop/MC Lviv	25
		Chop/Lesky	50
		Chop/Exporttransbud	25
		Batiove/Terminal Karpaty	25

Based on the above-mentioned data, the Mostyska-Medyka and Chop — Chierna nad Tysou crossings are the most in demand, demonstrating the processing capacity of 180 and 125 wagons per day, respectively.

Taking into account the queue of wagons for foreign operators in the UZ (Ukrzaliznytsia) network, as of

January 4, 18,800 wagons addressed to foreign operators are waiting in the UZ network, in particular, 32 were loaded before November 1, 3,119 - in November, 12,900 – in December, etc.

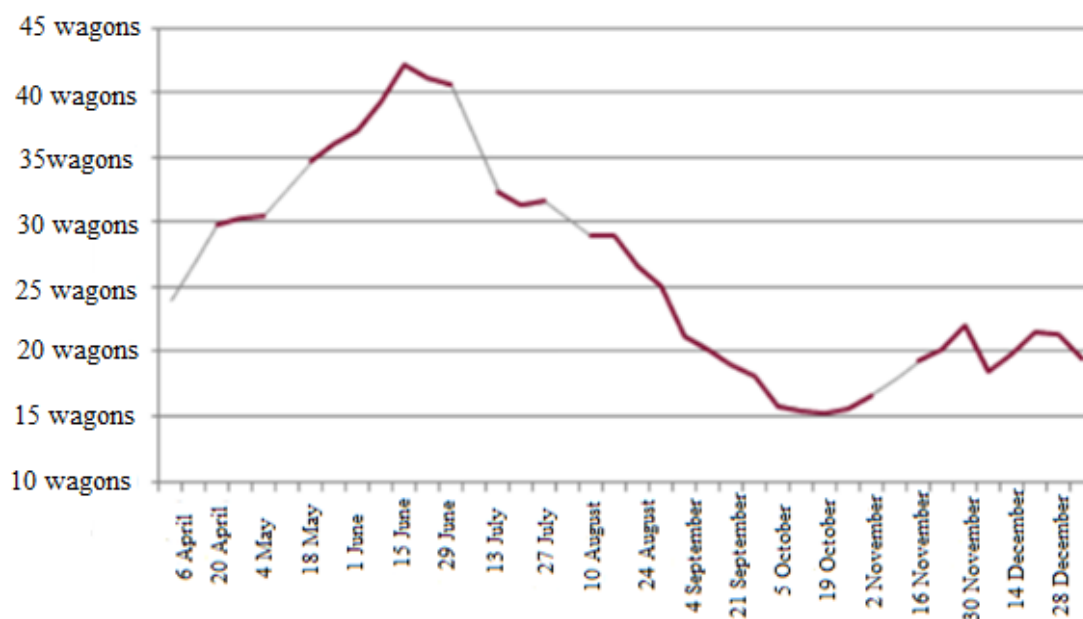


Fig. 2. Dynamics of changes of wagons awaiting transfer through land border crossings, thousands of units

The method proposed above will significantly improve the process of identifying problems at transport border crossings. This will make it possible to develop a plan for the modernization of terminals depending on the number of incoming containers. Moreover, the method allows you to choose the most optimal way of distributing containers in order to reduce the business of terminals. The method

will find application based on Ukraine's interest in integration into the European transport market.

6. Conclusion

The introduction of this method allows us to highlight certain advantages:

- investing in the development of logistics border centers that increase the efficiency of logistics operations and the indicators of container processing;
- development of the transport system, optimization of container transportation routes;
- increasing the competitiveness of railways compared to other modes of transport;
- creation of a favorable climate for Ukraine's integration into the EU transport system;
- the cargo owner receives a better delivery time to the reduction of wagon waiting hours, and the carrier improves the quality of service provided, expanding the number of customers;
- opens the prospect of modernization and expansion of border crossings, due to the identification of shortcomings and problems.

In 12 months of 2022, 150.6 million tons of freight were transported, which is 52.1% less comparatively to the previous year. According to the results of December, Ukrzaliznytsia transported 10.2 million tons of cargo, which was the worst indicator since July. The best figures in 2022 were pre-war January and February - 26.2 million and 22.3 million tons, respectively. March was the worst month - 8.3 million tons. From then until the end of the year, volumes increased by 23%.

More than half of the freight had to be transported within Ukraine, 39.4% for export, 8.2% for import, and 1.8% for transit. 76.1 million tons were inside the country, 59.4 million tons were exported. The largest amount of grain was transported for export - 22.5 million tons, in the total amount of export, grain makes up 38%. Cargo transportation in containers was 257.2 thousand TEU [6].

To draw the conclusion, it would be fair to mention that rail container transportation is quite sought-after in Ukraine and has a positive tendency to use in the future. Therefore, based on the above-mentioned statistics and method we consider it one of the most efficient way of modernizing the Ukrainian border terminals.

References

1. Internet resource. Is Europe reducing its greenhouse gas emissions? Resource URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/eu-greenhouse-gas-inventory>
2. Kyi Avia Cargo. Ukrzaliznytsia plans to increase rail container transportation in 2022. Resource URL: <https://www.cargo-ukraine.com/ukrzaliznicya-zaliznichni-kontejnerni-perevezennya-2>
3. "Osvita.ua", thematic resource. The role and place of Ukraine in the implementation of the transport policy of the European Union. Abstract. Resource URL: <http://osvita.ua/vnz/reports/international-relations/19426/>
4. Zhitskaya M.S., Ocheretnaya L.I. Odessa National Maritime University. Calculation-graphic task: "Determining the specialization of berths and warehouses". Resource URL: <https://studfile.net/preview/5176508/page:2/>
5. Center for Transport Strategies. "Ukrzaliznytsia" has published the volume of freight transportation for 2022. January 26, 2023 Resource URL: https://cfts.org.ua/news/2023/01/26/ukrzaliznitsya_opri_lyudnila_obsyagi_vantazhnikh_perevezhen_za_2022_ri_k_73519
6. UkraineInvestYour Investment Matters. Railways. Resource URL: <https://ukraineinvest.gov.ua/industries/infrastructure/railways/>
7. Transport & Environment's (T&E). Rail. Resource URL: <https://www.transportenvironment.org/challenges/rail/>
8. Latifundist. 12 export terminals run at Ukraine-EU border, 31 March 2022. Resource URL: <https://latifundist.com/en/novosti/58647-na-kordoni-ukrayini-pratsyuyut-12-zernovih-terminaliv>
9. Lomotko, D., Krasnoshtan O.: Innovative methods to increase the productivity and speed of container transport systems. Scientific Bulletin of the National Transport University. Technical Sciences Series. 1 (48). p. 188-202. (2021). doi: 10.33744/2308-6645-2021-1-48-188-202 Resource URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/48/188-202.pdf>
10. Francisco D.B. Albuquerque, Munjed A. Maraqa, Rezaul Chowdhury, Timur Mauga, Mohammed Alzard, Greenhouse gas emissions associated with road transport projects: current status, benchmarking, and assessment tools. Transportation Research Procedia, Volume 48, 2020, Pages 2018-2030, ISSN 2352-1465. Resource URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.261>
11. Ioana C. Bilegan, Luce Brotcorne, Dominique Feillet, Yezekael Hayel. Revenue management for rail container transportation, EURO Journal on Transportation and Logistics, Volume 4, 2015, Pages 261-283. ISSN 2192-4376. Resource URL: <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0051-7>
12. Xinchang Wang. Stochastic resource allocation for containerized cargo transportation networks when capacities are uncertain, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 93, 2016, Pages 334-357, ISSN 1366-5545. Resource URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.06.004>
13. Dong-Ping Song, Jing-Xin Dong. Cargo routing and empty container repositioning in multiple shipping service routes, Transportation Research Part B: Methodological, Volume 46, 2012, Pages 1556-1575,

- ISSN 0191-2615. Resource URL: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.08.003>
14. Jacek Żak, Barbara Galińska, Design and Evaluation of Global Freight Transportation Solutions (Corridors). Analysis of a Real World Case Study, Transportation Research Procedia, Volume 30, 2018, Pages 350-362, Resource URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.038>.
15. Petr Kolar, Hans-Joachim Schramm, Günter Prockl, Intermodal transport and repositioning of empty containers in Central and Eastern Europe hinterland, Journal of Transport Geography, Volume 69, 2018, Pages 73-82, Resource URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.04.014>.
16. Preeti Rathi, Amit Upadhyay, Container retrieval and wagon assignment planning at container rail terminals, Computers & Industrial Engineering, Volume 172, Part B, 2022, Resource URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108626>.
17. Zinko R.V._ Makoveichuk O.M._ Ulyaschenko V.G. Grafova interpretaciya zadachi kontreilernih perevezen // NAUKOVII VISNIK NLTU Ukraïni _ Zbirnik naukovo_tehnichnih prac.–Lviv _ NLTU Ukraïni. – 2007. – Vip. 17.4. – 300 s.
- Д. В. Ломотько, Д. Д. Ковальов. Удосконалення логістики контейнерних перевезень на прикордонних станціях і терміналах**
Анотація. Підвищення якості транспортних послуг вимагає від перевізників пошуку кращих методів оптимізації маршрутів та роботи з контейнерами під час перевезень з України до країн ЄС. Встановлено, що контейнерні перевезення вже займають значну частку ринку і тенденція до їх використання тільки зростає. Україна, як транзитна держава, має великий потенціал для розвитку власної системи залізничного транспорту. У статті досліджено питання оптимізації пропуску через державний кордон для реалізації та розширення транспортних можливостей залізниць України.
Ключові слова: Українські залізниці, контейнер, перевезення, Україна, залізничний транспорт.
- Надійшла 09.06.2023 р.
- Ломотько Денис Вікторович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем і логістики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925>, E-mail: den@kart.edu.ua,
Ковальов Денис, аспірант кафедри транспортних систем і логістики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID 0009-0003-3417-4113, E-mail: dkovalov123@gmail.com
- Lomotko Denis**, Doctor of engineering, professor department of Transport system and Logistic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: den@kart.edu.ua
 ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925> Scopus ID 57190438925
Kovalov Denis, graduate student department of Transport system and Logistic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.
 ID ORCID <http://orcid.org/0009-0003-3417-4113>,
 E-mail: dkovalov123@gmail.com

БЕРЕСТОВ І. В., к.т.н., доцент,
КОЛІСНИК А. В., к.т.н., доцент,
ПЕСТРЕМЕНКО-СКРИПКА О. С., к.т.н., старший викладач,
БОГАЧУК Д. П., студент
(Український державний університет залізничного транспорту)

Обґрунтування доцільності транспортування соняшникової олії з використанням флексітанків у системі інтермодальних перевезень

У роботі досліджуються технології транспортування наливних вантажів різними способами за участю залізничного транспорту. Виявлено, що за останні роки відбувається експорт олії соняшникової з України значними обсягами в різні країни. Найбільші обсяги українських олійних культур та олії у 2021 р. закупили країни Азії та Європи. Німеччина, яка закупила майже чверть — 23,9 % — українського експорту цього виду агропродукції, є лідером уже четвертий рік поспіль. У статті обґрунтована економічна доцільність використання флексітанків порівняно з іншими способами транспортування олії соняшникової.

Ключові слова: інтермодальні перевезення, флексітанки, контейнери, залізничний транспорт.

Вступ

На сьогодні транспортна галузь є однією з базових галузей економіки. У 2020-2021 рр. на транспорт, складське господарство, поштову та кур'єрську діяльність припадало близько 6,4 % ВВП і 6 % загальної кількості зайнятого населення. Транспортні послуги можуть задовольнити потреби населення та економіки в перевезеннях за обсягом, але не якістю. Той стан, у якому зараз знаходиться транспортна галузь, не відповідає повною мірою вимогам ефективної реалізації євроінтеграційного курсу України та інтеграції національної транспортної мережі в Транс'європейську транспортну мережу.

Одним з пріоритетних напрямів, що потребує удосконалення та покращення якості послуг щодо цього, є перевезення вантажів залізницею, а саме наливних вантажів.

У світі існує багато технологій, що дають змогу перевозити наливні вантажі залізницею різними способами. Рідкі вантажі, перевезені в цистернах і бункерних піввагонах, займають у вантажообігу залізниць більше 15 %. Наливом у цистернах і бункерних піввагонах можуть перевозитись більше 300 найменувань різних вантажів. Найбільш розповсюджені нафта і продукти її переробки (бензин, газ, дизельне паливо, мазут, олії, нафтобітуми та ін.); продукти харчової промисловості (рослинні олії, спирт етиловий, тваринний жир, патока та ін.).

Набуває популярності використання перевезення наливних вантажів у танк-контейнерах і флексітанках. Такий вид транспортування має безліч переваг, основна з яких можливість перевозити більші об'єми вантажу, ніж у будь-якій іншій тарі, тому є вигіднішим і може скоротити час доставки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням удосконалення транспортування наливних вантажів за участю залізниць в системі інтермодальних перевезень займалися як закордонні, так і вітчизняні вчені: Ломотко Д. В., Котенко А. М., Ковальов А. О., Запара В. М., Стройко Т. В. та ін.

У роботі [2] зазначено про необхідність удосконалення існуючих і пошук нових теоретико-методологічних і практичних аспектів форм і методів державної підтримки розвитку експортної інфраструктури олійно-жирової галузі з урахуванням передового світового й вітчизняного досвіду. У роботі [3] розглянуто сучасну технологію транспортування олії — перевезення у флексітанках. Такі способи перевезення пропонує компанія «ЛУКРО» для своїх клієнтів у 2022 р., у той час, коли порти України опинилися в недієздатному стані через військовий стан, що призвело до того, що складські потужності клієнтів були переповнені. У статті [4] окреслено роль

вантажного транспорту в умовах транспортування вантажів, визначено логістичну послідовність транспортування вантажів і всіх учасників логістичного процесу. Проведено аналіз стану речей і визначено основні тенденції сучасного ринку перевезень соняшникової олії, особливості організації логістичного ланцюга та їхні характеристики.

Визначення мети та завдання дослідження

Виходячи з аналізу вищенаведених наукових праць постає питання розгляду відомих технологій транспортування наливних вантажів залізницею в Україні та за кордоном і визначення найбільш вигідного способу перевезення наливних вантажів, таких як олія соняшникова, з мінімальними витратами та максимально швидко для залучення нових клієнтів і підвищення ефективності надання транспортних послуг.

Виклад основного матеріалу

Аналіз статистичних даних про вартість і попит на експорт насіння та плодів олійних культур з України збільшується з кожним роком. Так, за 2021 р. вартість експорту олійних культур у різні країни склала 2,4 млрд дол., що на 33 % перевищує показники 2020 р.. Найбільші обсяги українських олійних культур та олії у 2021 р. було експортовано в країни Азії та Європи.

Соняшникова олія українського виробництва серед величезної номенклатури наливних вантажів є основним товаром, що експортується великими обсягами в різні країни світу. Незважаючи на зменшення обсягів експорту цього продукту в останні роки, а саме порівняно з 2021 р., експорт у 2022 р. зменшився на 16 %, проте все одно лідирує, доходи від продажу соняшникової олії склали 5,5 млрд дол. США.

Статистичні показники, що демонструють розподіл експорту олії соняшникової серед країн-покупців цього виду товару українського виробництва, наведено на рис. 1.

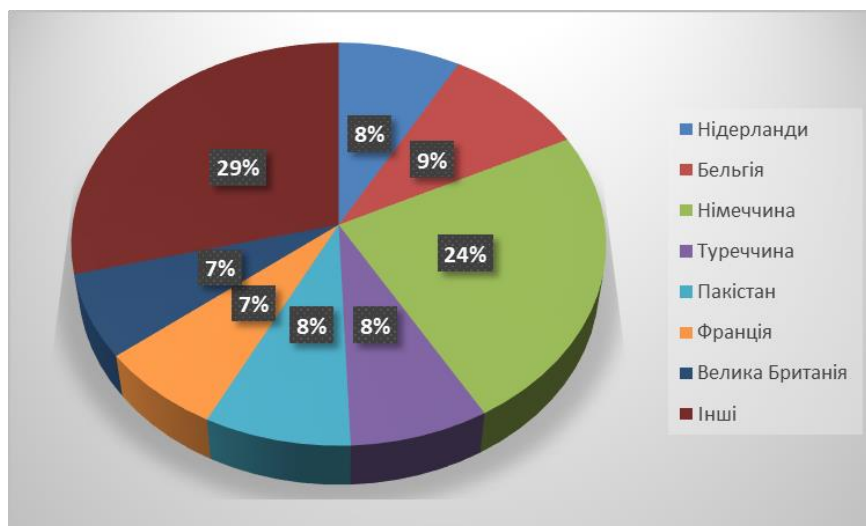


Рис. 1. Розподіл основних країн-покупців олії соняшникової українського виробництва за 2022 р.

Лідером серед покупців олії соняшникової четвертий рік залишається Німеччина, частка закупівлі складає 23,9 %. На другому місці Бельгія, частка експорту олії соняшникової в цю країну склала 9,5 %. Туреччина поступилася, займає п'яте місце – 7,7 %. Нідерланди збільшили свої обсяги закупівлі олії соняшникової до 8,1 % і розділяють однакову позицію з Пакистаном – 8,1 %. Частка експорту олії соняшникової у Францію складає 6,9 %, частка закупівлі Великої Британії – 6,7 %, Білорусі – 6,2 % [5].

Обсяги експорту соєвої олії склали 241 тис. т, ріпакової олії – 166 тис. т.

Дані Державної митної служби України свідчать про підвищення вартості експорту насіння та плодів олійних культур у 2022 р., що склала майже 3,8 млрд дол. США, що демонструє тенденцію збільшення вартості на 54 %, ніж у 2021 р. Це свідчить не тільки про підвищення цін, але і збільшення попиту на експорт насіння та плодів олійних культур.

Аналізуючи статистичні дані за останні роки, можна зробити висновки, що кількісні обсяги поставок основних товарних позицій продукції цієї групи на зовнішні ринки сумарно зросли приблизно вдвічі. Спостерігаємо тенденцію збільшення обсягів експорту: ріпаку – на 0,4 млн т порівняно з 2021 р., соєвих бобів – на 0,9 млн т [11].

На рис. 2 наведена динаміка обсягів експорту соняшникової олії за 2021-2023 рр., з чого можна зробити висновки, що, незважаючи на воєнний стан, попит на закупівлю української соняшникової олії не зменшується, а в деякі періоди має тенденцію зростання: за березень 2023 р. порівняно з 2021-2022 рр. спостерігаємо тенденцію збільшення експорту олії на 23 %.

Виходячи з вищевикладеного актуальним питанням є визначення оптимального способу транспортування олії соняшникової, що дасть змогу пришвидшити час доставлення вантажу, зменшити вартість транспортування та мінімізувати кількість навантажувально-розвантажувальних операцій при використанні різних видів транспорту в системі інтермодальних перевезень.

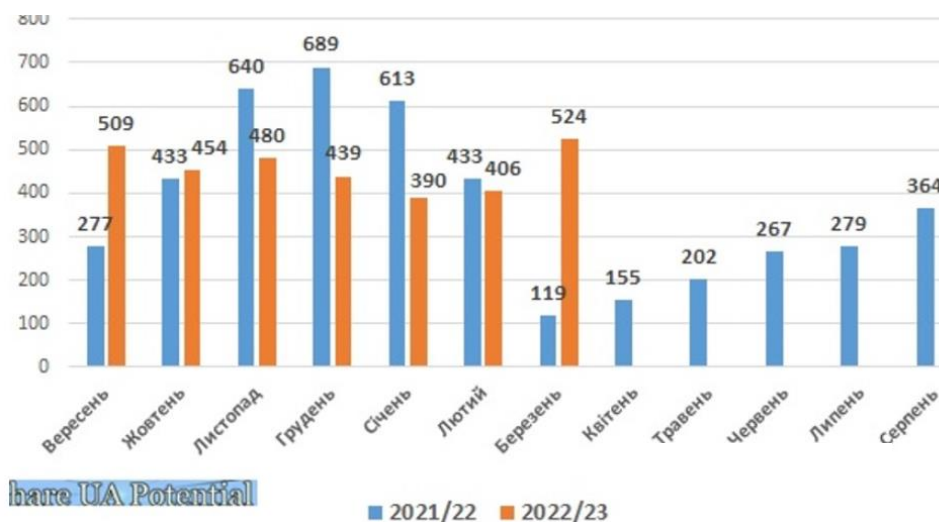


Рис. 2. Динаміка розподілу обсягів експорту соняшникової олії за 2021-2023 рр., тис. т

Одним із відомих способів, використовуваних як в Україні, так і за кордоном, на сьогодні є перевезення наливних вантажів, а саме олії у флексітанках.

Флексітанки являють собою м'яку, легку, герметичну ємність (також званий флексібаг), зазвичай виготовлену з поліетилену, доступні об'ємом до

24000 л, розміщуються в стандартному 20-футовому контейнері.

Технологія завантаження флексітанка відбувається в декілька етапів. Спочатку необхідно підготувати контейнер до завантаження, адже флексітанк – це така ємність, що укладається в контейнер для перевезення наливних вантажів (рис. 3).



Рис. 3. Підготовка контейнера та укладання флексітанка в контейнер

Наступний етап – флексітанк укладається в контейнер, де його положення потрібно вирівняти. Далі необхідно встановити щит, через який згодом підключається заливний шланг до флексітанка (рис. 4).



Рис. 4. Вирівнювання положення флексітанка в контейнері та підготовка флексітанка для встановлення щита

Потім через заливний шланг завантажуються флексітанк, наприклад заливається олія соняшникова (рис. 5).

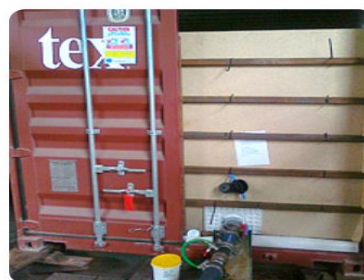


Рис. 5. Встановлення щита та завантаження флексітанка через заливний шланг

Закривається горловина, завантажений контейнер пломбується і готовий до відправлення з заводу (рис. 6).



Рис. 6. Пломбування контейнера та підготовка до відправлення

Відомо, що харчові наливні вантажі можна перевозити в контейнерах автомобільним або залізничним транспортом. В обох випадках можливе використання флексітанків.

Для визначення економічної ефективності транспортування наливного вантажу різними видами транспорту необхідно визначити вартість транспортування.

Вартість транспортування розрахуємо на реальному прикладі перевезення олії за допомогою декількох видів транспорту, а саме залізнично-морського або автомобільно-морського.

Для обґрунтування доцільності транспортування олії соняшникової у флексітанках залізницею розрахуємо вартість чотирьох 20-футових контейнерів (4x20) із соняшниковою олією: пункт відправлення – завод у м. Дніпро (Україна), пункт призначення – порт Х'юстон (США). У цьому випадку найкращим варіантом буде використання сервісу block train датської лінії Maersk, що пропонує доставку вантажу від залізничної станції Нижньодніпровськ до порту Гданськ. Наведені приблизні складові вартості транспортування цього вантажу були використані на основі даних однієї з логістичних компаній України.

Вартість перевезення способом залізниця-море складається з таких складових, як вартість доставки

«останньої милі», витрати на транспортування вантажу залізницею, оренду транспортних засобів, тари для вантажу, перевантажувальні роботи в порту і фрахт судна:

$$C_{\text{вит}}^3 = C_{\text{милі}} + C_{\text{зал}} + C_{\text{т}} + C_{\text{п.о.}} + C_{\text{мф}}, \quad (1)$$

де $C_{\text{милі}}$ – доставка власним автотранспортом або з використанням сервісу last mile лінії до заводу-відправника (у цьому випадку це одержувач порожньої тари під заливання олією), приймаємо 4104 грн;

$C_{\text{зал}}$ – витрати на транспортування олії в контейнерах залізницею, залізничний тариф Новомосковськ – Гданськ, приймаємо 125400 грн;

$C_{\text{т}}$ – витрати на використання тари, у цьому випадку встановлення флексітанка в контейнер, приймаємо 20140 грн;

$C_{\text{п.о.}}$ – витрати на портове оформлення, приймаємо 1900 грн;

$C_{\text{мф}}$ – витрати на морський фрахт, приймаємо 177004 грн.

Витрати на транспортування олії у флексітанках за заданим маршрутом за участю залізничного транспорту складуть

$$C_{\text{вит}}^3 = 4104 + 125400 + 20140 + 1900 + 177004 = 168 \text{ тис. } 248 \text{ грн.}$$

При розрахуванні вартості транспортування олії тим самим маршрутом, але з використанням автомобільного і морського транспорту, витрати будуть складатись з використання флексітанка для перевезення олії в контейнері, автодоставки вантажу до порту Гданськ, портового оформлення та морського фрахту:

$$C_{\text{вит}}^3 = C_{\text{авт}} + C_{\text{т}} + C_{\text{п.о.}} + C_{\text{мф}}, \quad (2)$$

де $C_{\text{авт}}$ – витрати на транспортування олії в контейнерах автомобільним транспортом, приймаємо 216 600 грн;

$C_{\text{т}}$ – витрати на використання тари, у цьому випадку встановлення флексітанка в контейнер для автомобільного транспорту, приймаємо 42750 грн;

$C_{\text{п.о.}}$ – витрати на портове оформлення, приймаємо 1900 грн;

$C_{\text{мф}}$ – витрати на морський фрахт, приймаємо 177004 грн.

Витрати на транспортування олії у флексітанках за заданим маршрутом за участю автомобільного транспорту складуть

$$C_{\text{вит}}^3 = 216600 + 42750 + 1900 + 177004 = 438 \text{ тис. } 254 \text{ грн.}$$

Виходячи з вищенаведених розрахунків, порівнюючи використання залізничного або автомобільного видів транспорту в системі інтермодальних перевезень для транспортування олії соняшникової, можна зробити висновки, що вартість при перевезенні вантажу за участі залізничного транспорту менше.

Також була розрахована вартість транспортування олії соняшникової залізницею з використанням різних способів, а саме в цистернах, танк-контейнерах, з

використанням бочок (0,25 т) у контейнерах, а також флексітанків у контейнерах. Результати розрахування вартості доставки олії з використанням залізниці з заводу до порту Одеса різними способами наведено на рис. 7.

При транспортуванні олії в контейнерах у бочках, як свідчать дані роботи [10], обсяг вантажу менше, ніж при використанні флексітанків: чотири контейнери, наповнені харчовою олією, дорівнюють трьом

контейнерам флексітанків, наповнених харчовою олією.

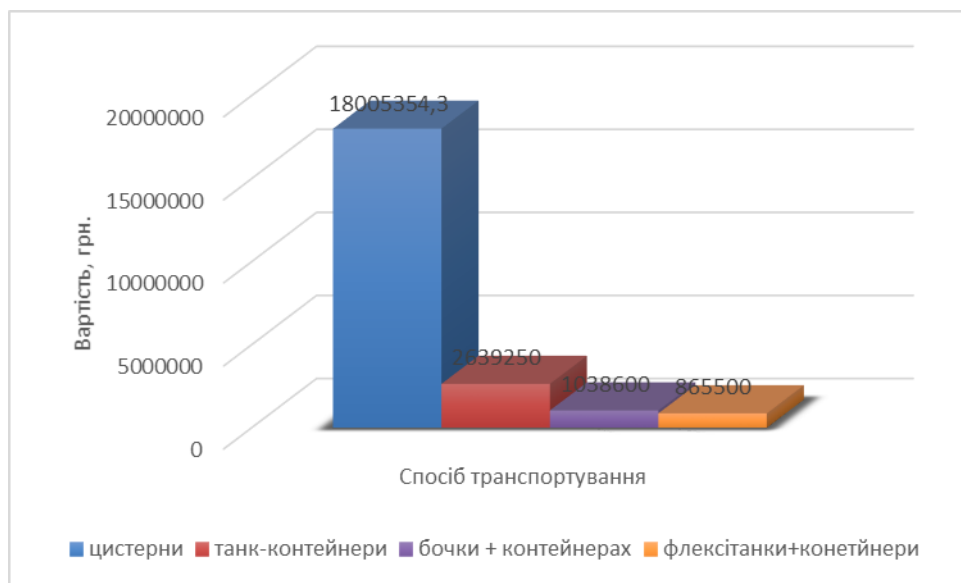


Рис. 7. Вартість транспортування олії соняшникової різними способами за участю залізниці

Наведений вище приклад дає змогу вантажовідправникам або виробникам харчової олії транспортувати більшу кількість харчової олії в меншій кількості контейнерів. Як результат, флексітанки збільшують вантажний простір, одночасно зменшуючи потребу в контейнерах. Крім того, виробники можуть пакувати і зберігати харчову олію на складах до відправлення за допомогою флексітанків.

Висновки

Аналіз існуючих технологій транспортування соняшникової олії залізницею в системі інтермодальних перевезень показав, що найоптимальнішим способом є використання флексітанків, адже за їхньою допомогою збільшується вантажний простір, що дає змогу значно більше перевозити вантажу: чотири контейнери, наповнені харчовою олією, дорівнюють трьом контейнерам флексітанків, наповнених харчовою олією, що зменшить вартість перевезення наливних вантажів і тим самим призведе до підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту. Розрахунки показали, що використання залізничного транспорту порівняно з автомобільним, для подолання частини маршруту в системі інтермодальних перевезень скорочує вартість доставки більш ніж на 50 %.

Список використаних джерел

1. Flexitank. Перевезення наливних вантажів – експорт, імпорт. URL: <https://seaandair.com.ua/transport/sea/flexitank/>.
2. Стройко Т. В. Експортна логістика олійно-жирової галузі України та необхідність її державної підтримки. *Економіка і регіон*. ПолтНТУ. 2014. № 6 (49). С. 3-8.
3. Логістичні рішення та особливості доставки рослинних олій за допомогою флексітанків. URL: <https://logist.fm/publications/logistichni-rishennya-ta-osoblivosti-dostavki-roslinnih-oliy-za-dopomogoyu-fleksitankiv>.
4. Прокудін Г. С., Редіч Ю. А., Єрко Я. В. Підвищення ефективності організації міжнародних вантажних перевезень соняшникової олії. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32 (71). Ч. 2. № 2. С. 212-215.
5. У березні експорт соняшникової олії з України склав 524 тис. т, що є найбільшим за час війни обсягом. URL: <https://ukragroconsult.com/news/u-berezni-eksport-sonyashnykovoyi-oliyi-z-ukrayiny-sklav-524-tys-t-shho-ye-najbilshym-za-chas-vijny-obsyagom/>.
6. Експорт соняшникової олії сягнув рекордного показника – 6,9 млн тонн на суму 5,3 млрд дол. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3196114-ukraina-torik-eksportuvala-rekordnij-obsag-sonasnikovoi-oliyi.html>.

7. У 2022 році найбільше української олії закупила Польща. URL: <https://agravery.com/uk/posts/show/u-2022-roci-najbilse-ukrainskoi-olii-zakupila-polsa>.
8. Transportation of Oil and Gas. URL: [GroupLM_OilGasMovement_Proj1.pdf](https://www.technavio.com/report/flexitanks-market-industry-analysis) (uvic.ca) <https://www.technavio.com/report/flexitanks-market-industry-analysis>.
9. Логістичні рішення та особливості доставки рослинних олій за допомогою флексітанків. URL: <https://logist.fm/publications/logistichni-rishennya-ta-osoblivosti-dostavki-roslinnih-olii-za-dopomogyu-fleksitankiv>.
10. Flexitanks Market by Application and Geography - Forecast and Analysis 2021-2025. URL: <https://www.technavio.com/report/flexitanks-market-industry-analysis>.

Berestov I., Kolisnyk A., Pestremenko-Skrypka O., Bogachuk D. Ustification of the feasibility of transporting sunflower oil using flexitanks in the intermodal transportation system.

Abstract. The work examines the technology of transporting bulk cargoes in different ways by part of the inbound transport. It was revealed that sunflower oil has been exported in significant volumes to various countries in recent years. The main buyers of Ukrainian oil crops and oils in 2021, as in previous years, are Asian and European countries. The leading position among importers of Ukrainian crop oils will be maintained for the fourth year in a row by Germany, which purchased almost a fourth - 23.9 % - of Ukrainian exports of this type of agricultural product. The economic expediency of using flexitanks in comparison with newer methods of sunflower oil transportation is substantiated.

After all, with the help of flexitanks, the cargo space increases, which allows you to transport much more cargo: four containers filled with edible oil are equal to three containers of flexitanks filled with edible oil, which will reduce the cost of transporting bulk cargo, thereby increasing the competitiveness of railway transport. Recalculations showed that the use of railway transport, compared to road transport, to cover a part of the route in the system of intermodal transportation, reduces the cost of delivery by more than 50 %.

Keywords: intermodal transportation, flexitanks, containers, rail transport.

Надійшла 09.06.2023 р.

Берестов Ігор В'ячеславович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID [0000-0002-1209-6885]. E-mail: berestov@kart.edu.ua.

Колісник Аліна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID [0000-0001-5038-0230]. Tel.: 093-734-41-20. E-mail: kolisnuk@kart.edu.ua.

Пестременко-Скрипка Оксана Сергіївна, кандидат технічних наук старший викладач кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту ORCID ID [0000-0001-5335-5399]. E-mail: pestremenko@kart.edu.ua.

Богачук Діана Петрівна, студентка гр. 133-ОПУТ-320, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: shilka@kart.edu.ua.

Berestov Igor, PhD (Tech.), Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID [0000-0002-1209-6885]. E-mail: berestov@kart.edu.ua.

Kolisnyk Alina, PhD (Tech.), Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport ORCID ID [0000-0001-5038-0230]. Tel.: 093-734-41-20. E-mail: kolisnuk@kart.edu.ua.

Pestremenko-Skrypka Oksana, PhD (Tech.), Senior Lecturer, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID [0000-0001-5335-5399]. E-mail: pestremenko@kart.edu.ua.

Bohachuk Diana, st. of gr. 133-OPUT-Z20, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: shilka@kart.edu.ua.

Редакційна колегія

Бабаєв М. М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Бутько Т. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Гаврилюк В. І., д.ф.-м.н., професор,
Український державний університет науки і
технологій;

Доценко С. І., д.т.н., доцент, УкрДУЗТ;

Жуковицький І. В., д.т.н., професор,
Український державний університет науки і
технологій;

Замула О. А., д.т.н., професор,
ХНУ імені В. Н. Каразіна;

Каргін А. О., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Климаш М. М., д.т.н., професор,
НУ «Львівська політехніка»;

Збігнев Лукасік, д.т.н., професор,
Технологіко-гуманітарний університет імені
Казимира Пуласького (Польща);

Марек Мезитис, д.т.н., професор, Ризький
технічний університет (Латвія);

Мойсеєнко В. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Панченко С. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Приходько С. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ,
головний редактор;

Рубан І. В., д.т.н., професор, ХНУРЕ;

Серков О. А., д.т.н., професор, НТУ «ХП»;

Скалозуб В. В., д.т.н., професор,
Український державний університет науки і
технологій;

Трубчанінова К. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Тьєрі Хорсін, професор математики,
Національна консерваторія мистецтв та
ремесел (Франція);

Штомпель М. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

© Журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" (Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте) - Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti

*Свідоцтво про державну реєстрацію
Серія КВ № 21514-11414 ПР від 18. 08. 2015 р.
Засновник - Український державний університет
залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7,
м. Харків, 61050*

ISSN 2413-3833 (Online), ISSN 1681-4886 (Print)
Зареєстровано 24 жовтня 2001 р. у Centre International de
l'ISSN, 75002 PARIS, France.

*Журнал входить до Переліку наукових фахових видань
України, категорія «Б» (наказ Міністерства освіти і
науки України № 409 від 17 березня 2020 р. зі змінами
від 02.07.2020 р. № 886)*

*Журнал включено до міжнародної наукометричної бази
даних Index Copernicus ([http://journals.indexcopernicus.com/-
++++p24787015.3.html](http://journals.indexcopernicus.com/-++++p24787015.3.html)), Google Scholar
(<https://scholar.google.com>), науково-видавничої платформи
«Наукова періодика України» (<http://iiks.kart.edu.ua>).*

Затверджений до друку Вченою радою УкрДУЗТ

*Рецензування проводиться конфіденційно за принципами
double-blind*

Статті друкуються мовою оригіналу

*Редакція не обов'язково поділяє думку автора і
не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився*

*Передрук матеріалів – тільки з дозволу редакції
журналу*

*Індекс журналу у Каталозі передплатних видань
України – 48707*

Адреса редакції: Україна, 61050, Харків-50,
майд. Фейєрбаха, 7, УкрДУЗТ, корп. 1, к. 215.
Тел.: (057) 730-10-84, 730-10-82. E-mail: xiittc@ukr.net

Відповідальна за випуск Мещерякова І.М.
Редактор Ібрагімова Н. В.

Підписано до друку 16.06.2023 р. Формат 60х84 1/8.
Папір писальний. Ум.-вид. ар. 5,5 Зам №
Наклад 105 прим. Ціна договірна.
Частина тиражу розповсюджується безкоштовно.

Видавець та виготовлювач
Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.