

ЛОМОТЬКО Д. В., професор, д-р техн. наук,
НЕСТЕРЕНКО О. О. аспірант
(Український державний університет залізничного транспорту)

Удосконалення транспортно-експедиторської роботи з контейнерними вантажами

У статті розглянуто варіант технології перевезення контейнерних вантажів прискореними поїздами двома окремими маршрутами, які дають змогу доставляти вантажі в країни Європейського Союзу сухопутним шляхом на заході нашої країни та через порти чорноморського узбережжя; підходи, що дають змогу не тільки обрати оптимальний варіант технології перевезення контейнерних вантажів прискореними поїздами, але й удосконалити використання транспортних засобів в умовах обмеженості ресурсів. Раціональністю заходів підвищення якості організації вантажних перевезень є не тільки економічний ефект від витрат на перевезення вантажів, а також і час доставлення вантажу.

Ключові слова: залізничний транспорт, контейнеризація, контейнер, мультимодальні перевезення, вантажопотік, перевезення.

Проблема постановки дослідження

У системі транспортної галузі України залізниця зберігають найважливіше місце. В умовах воєнного стану транспортний комплекс України виконує багато надзвичайно важливих і додаткових місій. Їх виконання передбачає доставлення військової техніки, обладнання та озброєння, вантажів гуманітарного характеру тощо по всій території України. Збільшення обсягів, напрямків і номенклатури вантажів, які перевозять у контейнерах, дасть змогу ефективніше використовувати вагонний і контейнерний парки, зменшувати їхній порожній простір і використовувати можливість їхнього зворотного завантаження. Після 24 лютого 2022 року через окупацію чорноморських шляхів, навіть коли деякі європейські країни, такі як Румунія, Польща та країни Балтії, погодилися надати власні порти для подальшого перевезення зернових культур морем, основними ланцюгами поставок стають сухопутні коридори з країнами ЄС. Суть майбутнього ефекту полягає в інтегруванні в транспортну систему засобів автомобільного та залізничного транспорту. Змішані, мультимодальні, інтермодальні і комбіновані перевезення з'єднують у єдиний транспортний процес два домінуючі види наземного транспорту – автомобільний і залізничний, основна частина вантажних перевезень буде виконуватися залізничним транспортом.

Аналіз останніх публікацій

Загальна частка контейнерних перевезень здійснюється територією України автотранспортом. Проте загальна частка автотранспорту в обсязі контейнерних перевезень поступово зменшується, а залізничного транспорту, навпаки, збільшується. Так, якщо у 2013 році близько 75 % усіх контейнерів перевозили автомобільним транспортом, то вже у 2021

році частка контейнерів, що перевозили залізницею, зросла до 40 % [1, с. 13]. У 2021 році залізницею було перевезено рекордну кількість контейнерів – 445 тис. TEU (+7 % до 2020 року). Динаміку зміни обсягів залізничних контейнерних перевезень зображено на діаграмі (рис. 1).

Можна побачити, що частка контейнерних вантажів у загальних обсягах залізничних перевезень поступово зростає – з 0,5 % у 2009 році до 2,8 % у 2021 році, хоча в деяких країнах Європи цей показник досягає 45 % [1, с. 13]. За напрямками прямування контейнерів залізницею переважають міжнародне сполучення – 76 % (експорт – 40 %, імпорт – 27 %, транзит – 9 %), у внутрішньому сполученні прямує 24 % контейнерів [2, с. 13].

З 24 лютого 2022 року блокування морських портів України призвело до порушення налагоджених логістичних схем постачання на світові ринки, це вплинуло не тільки на економіку України, але і всю світову економіку в цілому, зокрема і світову транспортну систему.

Це стосується і контейнерних перевезень. У 2020-2021 роки чорноморські порти України переробляли більше 1 млн TEU, більше половини з яких складав імпорт [3, с. 13], однак із початком воєнного вторгнення робота портів повністю зупинилася. Якщо у 2021 році місячний контейнерообіг в Україні складав близько 70 тис. TEU, то у 2022 році цей показник впав до 6,5 тис. TEU [4, с. 13]. Перші ознаки життєвої діяльності почали відбуватися з серпня 2022 року – частина портів була розблокована, виключно для експорту зернових культур. Різке скорочення лінійного сполучення з чорноморським регіоном позначилося на глобальних логістичних мережах і посилює перевантаженість портів у Європі.

© ЛОМОТЬКО Д. В., ЗАПАРА Я.В., НЕСТЕРЕНКО О. О. 2024

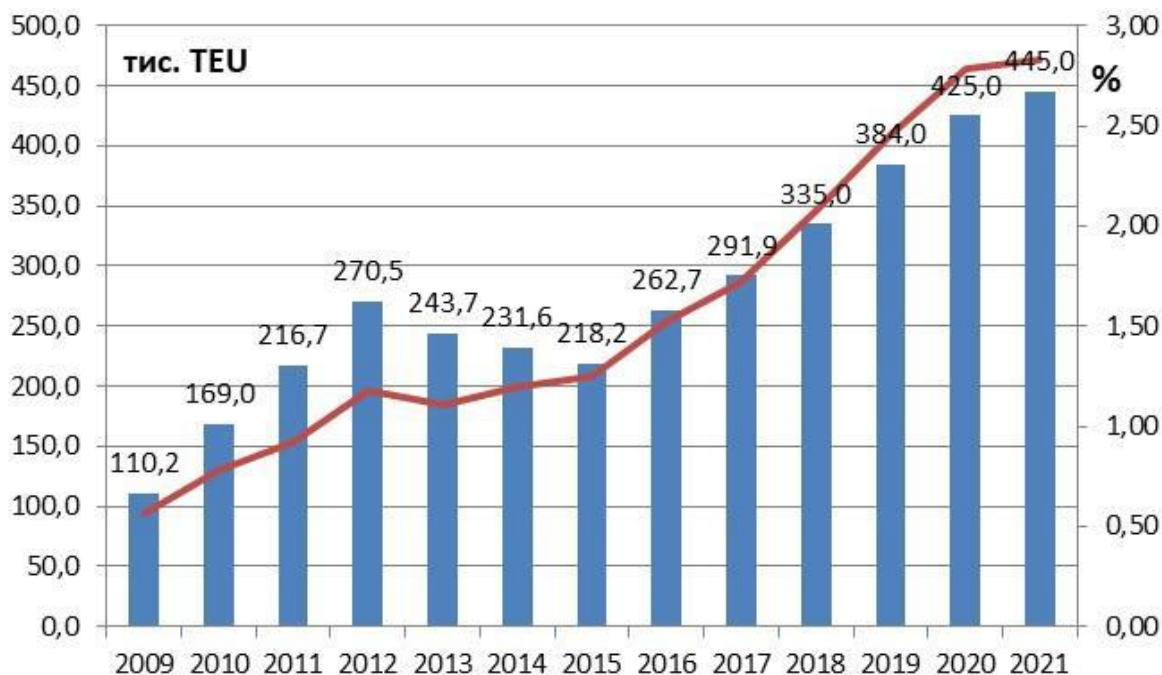


Рис. 1. Обсяги залізничних перевезень контейнерів (2009-2021 роки)

Усі ці фактори сприяли зростанню вартості контейнерних перевезень у травні-червні 2022 року на 50 %. Так сталося, що прикордонні термінали сусідніх з Україною країн ЄС здатні переробити протягом року майже 1,5 млн TEU, а наші – лише 170 тис. TEU. Водночас потужність портів терміналів України становить 2,5 млн TEU на рік, тобто в Україні є суттєва диспропорція потужностей у кінцевих пунктах мультимодального маршруту Чорне море – Європа. Для вирішення цієї ситуації необхідно залучати інвестиції в будівництво та розвиток мультимодальних центрів у прикордонних регіонах країни.

Мета статті

Одним із завдань в організації транспортно-експедиторської роботи є організація та оптимізація транспортного потоку та розподіл ланцюга поставок вантажів забезпечення швидкісного доставлення вантажів і скорочення затримок на прикордонних і перевальних станціях.

Метою дослідження є аналіз можливих шляхів удосконалення транспортно-експедиторської роботи з контейнерними вантажами на залізницях і розроблення пропозицій щодо обґрунтування необхідності створення системи прискорених контейнерних поїздів.

Викладення основного матеріалу

Послідовний логістичний транспортний ланцюг (ЛТЛ) подано як сукупність обслуговуючих апаратів і накопичувачів. До накопичувачів відносять місткість станційних колій залізничної станції і місць зберігання

вантажів (склади і напівпричепи), порти тощо. До обслуговуючих апаратів відносять маневрові локомотиви, навантажувально-розвантажувальні машини і автотранспорт [5, с. 13].

Оскільки розподіл продукції (транспортування, навантаження, складування) виконують у різних елементах ЛТЛ, то для прийняття оптимального рішення необхідно враховувати потреби суміжних складових частин (видів транспорту). Тобто обмежені ресурси (інвестиції) необхідно розподілити так, щоб були реалізовані всі завдання функціонування ЛТЛ, а саме доставлення вантажів «точно в термін» з мінімальними витратами для вантажовласника і перевізника.

Як критерії оптимальності можна використовувати і інші показники, що характеризують зацікавленість усіх учасників логістичного розподілу вантажів. На ефективність запропонованої у статті методики знаходження оптимального режиму функціонування ЛТЛ кількість критеріїв частин ланцюгів впливу практично не має.

За цільову функцію, що виступає як координуюча, приймають час доставлення вантажів, що є важливим показником якості роботи ЛТЛ. Завдання полягає в тому, щоб розподілити загальні виділені для оснащення певного об'єкта ресурси так серед частин ЛТЛ, щоб забезпечити мінімальний час на доставлення вантажів контейнерними поїздами при виконанні обмежень, що впливають на собівартість, пропускну спроможність ЛТЛ і сумарні виділені ресурси [5, с. 13].

Світовий досвід показує, що конкурентна боротьба з іншими видами транспорту щодо залучення нових вантажопотоків змусила залізниці безперервно покращувати транспортне обслуговування вантажопотоків, підвищувати рівень сервісу, збільшувати перелік запропонованих послуг.

У транспортному секторі сформувався попит на ті послуги, які допомагають покращити стан на ринку транспортних послуг завдяки комплексному, з урахуванням його зацікавленості, точному і доступному, з точки зору тарифів, обслуговуванню. Загальна комплексна оцінка якості обслуговування відображує конкурентоспроможність залізничного транспорту щодо його конкурентів.

Вимоги вантажовласників до якості транспортного обслуговування можна охарактеризувати низкою показників, таких як гарантований час доставлення, регулярність або ритмічність поставлення вантажів, забезпечення засобами перевезення, гнучкість у задоволенні змінюваних вимог із боку клієнтури, забезпечення збереження вантажів, що перевозять, експлуатаційна надійність усіх елементів логістичного ланцюга (ЛТЛ) доставлення вантажів, комплексність транспортного обслуговування, транспортна забезпеченість території і доступність користувачів, безпека перевезень, екологічність транспорту тощо [6, с. 13].

Для виконання цих вимог можна використовувати комбіновані перевезення, а саме організації на мережі залізниць вантажних контейнерних поїздів. Це один із методів підвищення якості транспортного обслуговування.

Організації контейнерних поїздів дають змогу, крім прискорення доставлення вантажів за рахунок скорочення простою вагонів на станціях навантаження в очікуванні відправлення, зменшити час знаходження вантажів у дорозі, скоротити час очікування подавання вагонів на навантажувально-розвантажувальні фронти станцій призначення, забезпечити високе збереження і надійність перевезень протягом усього маршруту перевезення.

При цьому забезпечено:

- відсутність перевантаження відправок на кордонах;
- надійний транспортний зв'язок через термінали;
- доставлення вантажів «від дверей до дверей»;
- стеження за вантажами на всьому шляху прямування, що включає оповіщення про відправлення і прибуття вантажів, що дає змогу покращити використання рухомого складу, контейнерів і напівприцепів.

Крім того, можна скоротити оборотні активи у клієнтів, збільшити обсяги перевезень і прибуткові надходження від пільг з оплати за вагони і контейнери, знижки за маршрутні відправлення і оборот грошових коштів, оскільки в контейнерах перевозять цінні вантажі.

Умовами організації контейнерних поїздів є:

- розроблення чіткої технології підвезення з базових терміналів контейнерів, готових до відправлення;

- зменшення хаотичного відправлення вагонів із напівприцепами;

- впровадження, незалежно від наявності вагонів із вантажем, декількох жорстких ниток графіка контейнерних поїздів [5, с. 13].

Для визначення доцільності формування контейнерного поїзда необхідно проаналізувати фактори, що впливають на умови його функціонування.

Доцільність формування контейнерного поїзда визначають дією комплексу факторів: склад (вагова норма), середньохорова швидкість, періодичність обертання, жорсткий графік руху (впровадження поїздів регулярного руху), вартість вантажної маси, оскільки основою системи перевезення вантажів у контейнерах є виконання основного принципу – баланс контейнерів, які надходять на термінал і відправляються з нього.

Проведено аналіз виробничих показників на основі двох залізничних станцій: ст. «Київ-Ліски» регіональної філії «Південно-Західна залізниця» і «Харків-Сортувальний» регіональної філії «Південна залізниця».

Основним вихідним даним для подальших розрахунків є кількість контейнерів, що проходить через вантажний двір залізничним та автотранспортом, завантажених і вивантажених контейнерів. Для визначення технологічних і економічних показників роботи необхідно в першу чергу знати вантажопотоки надходження контейнерів на вантажний двір і відправлення з нього контейнерів. Ідеться як про контейнери з вантажами, так і порожні. Основою системи перевезення вантажів у контейнерах є виконання основного принципу – баланс контейнерів, які надходять на термінал, та які відправляються з нього.

Тому для проведення аналізу будемо спиратися на основні показники: кількість поданих контейнерів на контейнерний пункт, завантажені контейнери, вивантажені контейнери з вагонів. Необхідну інформацію отримано зі звітів про рух контейнерів – форма КЕЗ-3, затверджена наказом АТ «Укрзалізниця» від 17.08.2007 року № 410-Ц.

На Рис. 2 зображено стабільні виробничі показники подавання контейнерів різними видами транспорту. Помітний спад завантаження та вивантаження контейнерів у 2020, 2021 роках може бути обумовлений світовою пандемією COVID-19, а критичний спад у 2022-2023 роках за кількістю контейнерів, що проходить через вантажний двір залізничним та автотранспортом, – з початком воєнної агресії.

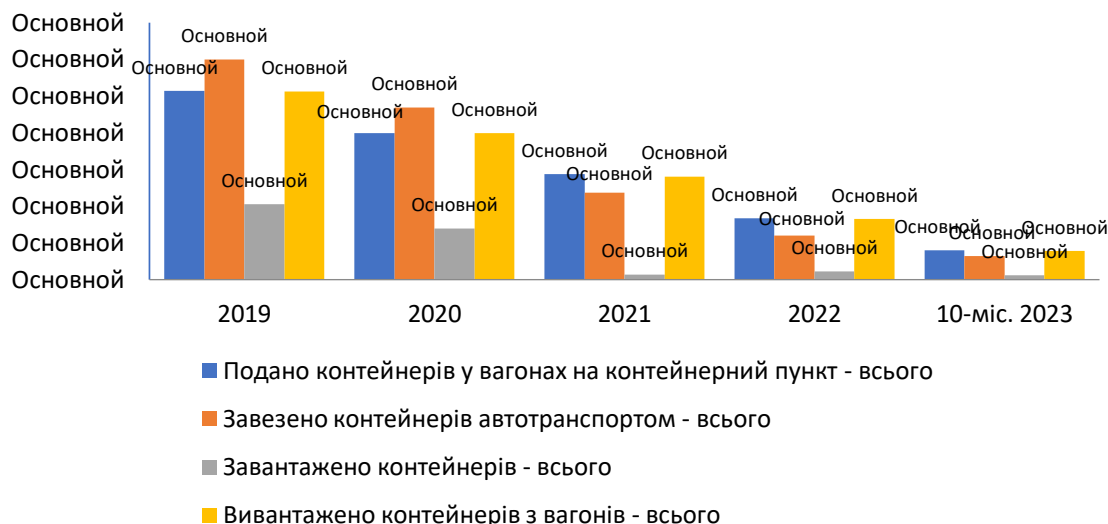


Рис. 2. Кількість контейнерів, що проходила через вантажний двір ст. «Київ-Ліски» у період з 2019 по жовтень 2023 року

На Рис. 3 зображено об'єми навантаження та кількість контейнерів, що проходить через ст. «Київ-Ліски» у період з січня по жовтень 2023 року включно. З початку 2023 року видно, як кількість контейнерів, поданих залізничним транспортом, з початку року домінувала, а з початку літа доставлення вантажів автотранспортом знаходиться на пікових позиціях.

Об'єм завантаженості виробництва на меншому рівні, ніж був у минулі роки, – це обумовлене тим, що частина контейнерних поїздів залізничного маршруту Китай – Європа не обслуговуються цим терміналом у зв'язку із введенням воєнного стану в Україні.

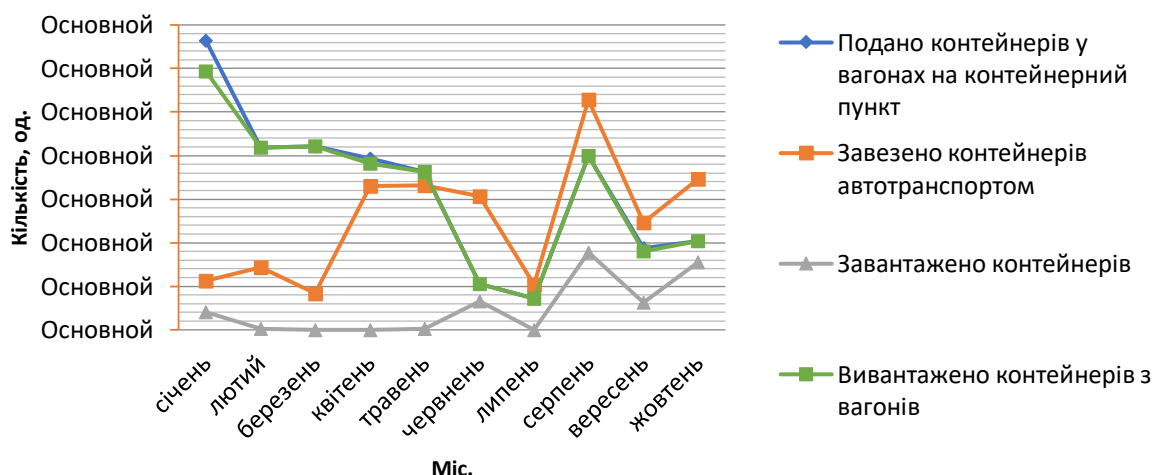


Рис. 3. Кількість контейнерів, що проходила через вантажний двір ст. «Київ-Ліски» у період січень-жовтень 2023 року

Другий термінал, який знаходиться на ст. «Харків-Сортувальний», почав працювати з 2020 року, тому інформацію будемо враховувати з початку введення його в експлуатацію; також за весь період роботи операції з завезення контейнерів автотранспортом не відбувалися, тому їх враховувати не будемо.

Своїх пікових показників було досягнуто у 2021 році, майже таку саму кількість контейнерів було подано залізничним транспортом на термінал ст. «Київ-Ліски».

З Рис. 4 видно кількість контейнерів, що проходила через вантажний двір ст. «Харків-Сортувальний».

Основною базою для навантаження виробництва були поїзди залізничного маршруту Китай – Європа, тому ми бачимо різкий спад у 2022 році та мінімальну завантаженість у 2023 році, що складає 14,5 % об'єму 2021 року.

:

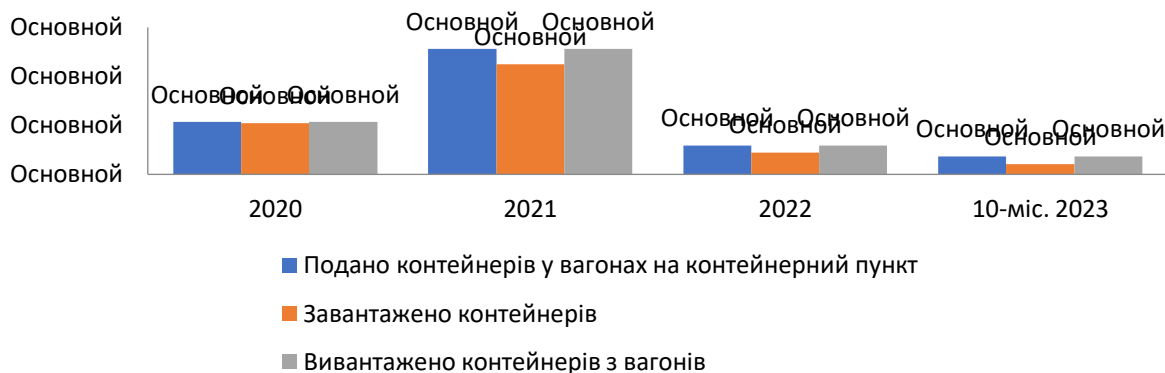


Рис. 4. Кількість контейнерів, що проходила через вантажний двір ст. «Харків-Сортувальний» у період з 2020 по жовтень 2023 року

На Рис. 5 зображено об'єми навантаження, що проходить через ст. «Харків-Сортувальний» у період із січня по жовтень 2023 року включно.

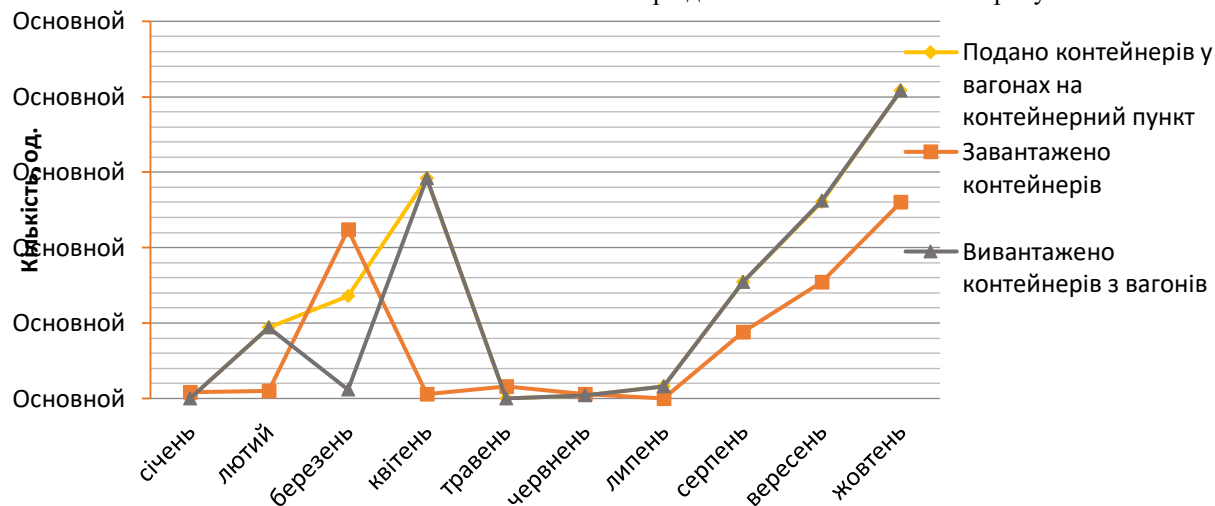


Рис. 5. Кількість контейнерів, що проходила через вантажний двір ст. «Харків-Сортувальний» у період січень-жовтень 2023 року

Проаналізувавши отримані дані, можемо побачити, що завантаженість контейнерних терміналів є зовсім неістотною порівняно з виробничими даними попередніх років. Інфраструктура терміналів України є досить розвиненою та забезпечує як нинішні, так і перспективні обсяги контейнерних перевезень.

Складність технології ЛТЛ, випадковий характер потоків вагонів і вантажів, що надходять, велика кількість обмежень і факторів викликають значні труднощі при розв'язанні загальної задачі оптимізації режимів її функціонування.

Крім того, розмірність і складність значно збільшуються у випадку оцінювання ефективності в умовах великої кількості критеріїв, що характеризують якість її роботи. Тому у зв'язку з труднощами розв'язання задач оптимізації об'єктів такого роду більш ефективним необхідно вважати багаторівневий підхід, при якому задача, що розв'язується, подана як ієрархічна система більш простих задач, розв'язок яких адекватний розв'язку загальної задачі.

Отже, повні витрати F_{kk} для контейнерних перевезень у вигляді вантажного модуля і контейнерного поїзда в неявному вигляді можна подати як цільову функцію

$$F_{kk} = f(F_{cp}; F_{pp}; F_{ac}; F_{pk}; F_{ap}; I) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де F_{cp} – питомі витрати на навантаження, розвантаження контейнера, грн/контейнер;

F_{pp} – питомі витрати на рух контейнера, грн/контейнер;

F_{ac} – питомі витрати на рух контейнерного поїзда, грн/контейнер;

F_{pk} – питомі витрати на виконання технічних операцій на вантажній станції з контейнерним поїздом, грн/контейнер;

F_{ap} – питомі витрати на операції на попутних технічних станціях, грн/контейнер;

I – інтенсивність потоку контейнерів, контейнер/доба.

На складові формули (1) накладено обмеження

$$\begin{cases} F_{kk} > 0 \\ I \geq 0 \\ S_{max} \geq S > 0 \end{cases},$$

де S – кількість контейнерів, що необхідно відправити зі станції в поточну добу, контейнер/доба;

S_{max} – максимальна кількість контейнерів, яка може знаходитись у контейнерному поїзді.

Оптимальний варіант технології прискорення просування залізницями транзитних вантажів вибирається на основі розрахунків економічного ефекту від впровадження комплексу різних організаційно-технологічних заходів [7, с. 13].

З метою спрощення розрахунків зроблено припущення, що економія від прискорення обігу вагона з контейнером за рік може бути критерієм оптимальності обрання технології руху контейнерного поїзда порівняно зі звичайною технологією доставлення:

$$E = \Delta n e_{e.-z.} 24, \quad (2)$$

де E – економія від прискорення обігу вагона;

Δn – кількість вивільнених вагонів;

$e_{e.-z.}$ – витратна ставка однієї вагоно-години в русі (5,61 грн).

Розрахуємо кількість вивільнених вагонів з контейнерами Δn :

$$\Delta n = \Delta \vartheta U, \quad (3)$$

де Δn – кількість вивільнених вагонів;

$\Delta \vartheta$ – прискорення обігу вагона, доба;

U – робота залізниці (дирекції), $U=40$ ваг. з контейнерами/доба.

Прискорення обігу вагона (Рис. 6) визначається як різниця обігу вагона за прогнозний і розрахунковий періоди.

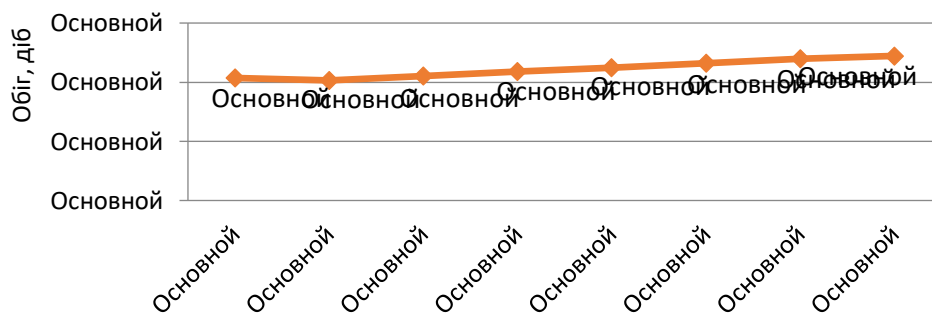


Рис. 6. Прогнозування значення обігу вагона з контейнерами по АТ «Укрзалізниця» на основі раніше отриманих даних (оптимістичний варіант)

За прогностичний період обіг вагона прийнято за прогностичною інформацією (виконано прогнозування з використанням Excel) і складає $\Delta\theta_1 = 10,88$ доби (як у 2022 році), а за розрахунковий період розраховано, поділивши фактичну відстань на отриману маршрутну швидкість. Підвищену маршрутну швидкість прийнято 400 км/доба, а у зв'язку з тим, що сьогодні в нас є

можливість поставляти вантажі в країни Європейського Союзу через сухопутні шляхи на заході нашої країни та порти чорноморського узбережжя, доцільно проводити розрахунки в цих двох напрямках відповідно зображених на Рис. 7, Рис. 8.



Рис. 7. Курсування контейнерного поїзда по території України від станції Х до станції О

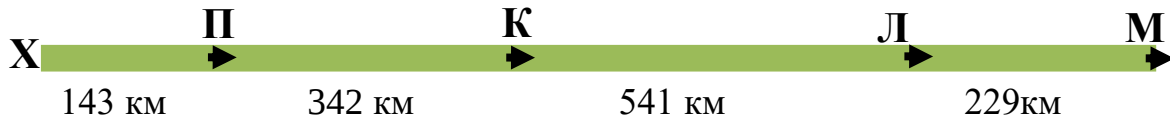


Рис. 8. Курсування контейнерного поїзда по території України від станції Х до станції М

Отже, склавши всю відстань курсування прискореного контейнерного поїзда по території України від станції Х до станції О (S1) і від станції Х до станції М (S2), маємо:

$$S1 = 143 + 342 + 316 + 479 = 1280 \text{ км};$$

$$S2 = 143 + 342 + 541 + 229 = 1255 \text{ км}.$$

Визначаємо обіг вагона за розрахунковий період, поділивши фактичну відстань на маршрутну швидкість:

$$\Delta\theta_2 (1) = 1280 / 400 = 3,2 \text{ доби};$$

$$\Delta\theta_2 (2) = 1255 / 400 = 3,14 \text{ доби}.$$

Звідси прискорення обігу вагона у 2023 році складає:

$$11,25 - 3,2 = 8,05 \text{ доби за маршрутом (S1);}$$

$$11,25 - 3,14 = 8,11 \text{ доби за маршрутом (S2).}$$

Кількість обігів за старою технологією у 2023 році складає:

$$365 / 11,25 = 32,445 \approx 33 \text{ обіг/р.}$$

Кількість обігів за запропонованою технологією складає:

$$365 / 3,2 = 114,06 \approx 114 \text{ обіг/р. за маршрутом (S1);}$$

$$365 / 3,14 = 116,24 \approx 116 \text{ обіг/р. за маршрутом (S2).}$$

Додаткова кількість обігів на 2023 рік від впровадження нової технології розраховується відніманням обігів за старою технологією від запропонованої технології:

$$114 - 33 = 81 \text{ обіг/р. за маршрутом (S1);}$$

$$116 - 33 = 83 \text{ обіг/р. за маршрутом (S2).}$$

Кількість вивільнених вагонів:

$$\Delta n = 81 * 40 = 3240 \text{ ваг за маршрутом (S1);}$$

$$\Delta n = 83 * 40 = 3320 \text{ ваг за маршрутом (S2).}$$

Підставляючи значення $\Delta n = 3240$ за маршрутом (S1) і $\Delta n = 3320$ за маршрутом (S2) до формули (2), отримуємо для умов 2023 року:

$$E = 3240 * 5,61 * 24 = 436\,234 \text{ грн за маршрутом (S1);}$$

$$E = 3320 * 5,61 * 24 = 447\,004 \text{ грн за маршрутом (S2).}$$

Тепер можемо розрахувати витрати на повернення вагонів Q згідно з тарифною схемою 14.2:

$$Q = \Delta n (S1) * x (S1) * \alpha \text{ за маршрутом (S1);}$$

$$Q = \Delta n (S2) * x (S2) * \alpha \text{ за маршрутом (S2),}$$

де $\Delta n (S1)$, $\Delta n (S2)$ – кількість виявлених вагонів по кожному маршруту;

x – тарифна ставка повернення вагона згідно з тарифною схемою 14.2;

α – кількість осей у вагона.

$$Q = 3240 * 810,0 * 4 = 10\,497\,600 \text{ грн за маршрутом (S1),}$$

$$Q = 3320 * 810,0 * 4 = 10\,756\,800 \text{ грн за маршрутом (S2).}$$

У Таблиця 1 відображено інформацію про ефективність від введення прискореного контейнерного поїзда.

Таблиця 1

Основні показники за двома різними маршрутами прямування

Для маршруту	Довжина маршруту, км	Обіг вагона за розрахунковий період, доба	Прискорення обігу вагона, доба	Додаткова кількість, обіг/р.	Кількість вивільнених вагонів, од.	Економія від прискорення обігу вагона з контейнером за рік, грн
S1	1280	3,2	8,05	81	3240	436 234
S2	1255	3,14	8,11	83	3320	447 004

Прискорення обігу вагона з контейнерами дає змогу вивільнити вагонний парк для додаткових перевезень. Економія від прискорення обігу вагона з контейнерами за 2023 рік складає 436 тис. грн за маршрутом (S1) і 447 тис. грн за маршрутом (S2). Цей парк визначають як добуток досягнутого прискорення обігу вагона на роботу регіональної філії (дирекції), а економічний ефект – і на витратну ставку однієї

вагоно-години. Аналогічним чином розраховано економію від прискорення обігу вагона з контейнером за інші роки з урахуванням прогнозного значення обігу вагона в Таблиця 2.

Приведення результатів і витрат різних років періоду реалізації проєкту до розрахункового року здійснюється множенням їхньої вартісної оцінки за кожний рік на коефіцієнт приведення a_T , що відповідає даному року.

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку

Номер з/п	Показник	Значення		
1	Робота залізниці за добу (вагонів у складі поїзда з контейнерами)	40		
2	Питомі витрати на одну вагоно-годину в русі, грн/год	5,61		
3	Прискорення обігу вагона за роками	За маршрутом		
		(S1)	(S2)	
		2023	8,05	8,11
		2024	8,41	8,47
		2025	8,78	8,84
		2026	9,02	9,08
4	Дисконтна ставка комерційних банків за депозитними вкладами, %	14		
5	Очікуваний рівень інфляції, %	7		

Оптимізація процесу перевезень шляхом організації прискореного руху контейнерних поїздів є важливим резервом скорочення транспортних витрат (Таблиця 3). При доставленні вантажів контейнерними поїздами покращується транспортне обслуговування вантажовласників, підвищується рівень транспортного сервісу, забезпечується схоронність вантажу протягом

усього маршруту прямування. Отже, запропонована технологія перевезень відрізняється від чинної тим, що термін доставлення зменшується, а витрати, пов'язані з організацією доставлення, суттєво скорочуються порівняно з традиційною схемою перевезення.

Таблиця 3

Розрахунок економічного ефекту від впровадження контейнерних поїздів на території України.

ПОКАЗНИК		РОЗРАХУНКОВИЙ ПЕРІОД			
		2023 рік	2024 рік	2025 рік	2026 рік
Річна економія від впровадження контейнерних поїздів по території України, грн	(S1)	436234	447005	447005	452390
	(S2)	447004	457776	457776	463162
Коефіцієнт приведення економічного ефекту до розрахункового року α_t	(S1), (S2)	1,21	1,136	1,066	1.000
Економічний ефект з урахуванням приведення до розрахункового року, грн	(S1)	528434	507797	476507	452390
	(S2)	507957	520034	487989	463162
Економічний ефект із наростаючим підсумком, грн	(S1)	528434	1036231	1512738	1965128
	(S2)	507957	1027991	1515980	1979142

Висновки

Процес доставлення вантажів контейнерними поїздами необхідно розглядати як важливий елемент логістичного транспортного ланцюга міжнародних транспортних коридорів. Проведено аналіз узагальненої економіко-математичної моделі контейнерних поїздів, яка включає основні критерії і параметри, що враховує технічне оснащення ланцюга і технологію транзитних потоків, коли в кожній частині ЛТЛ можуть бути канали обслуговування різної потужності, що мають різну вартість і вплив на просування вагонопотоків. Запропонована модель вантажного контейнерного поїзда дає змогу удосконалити технологію перевезень вантажів у контейнерах за участю залізниць.

При розробленні моделі завезення і вивезення вантажів за допомогою автотранспорту необхідно урахувати той факт, що в сучасних умовах обсяги перевезень дрібними відправками практично дорівнюють нулю. Це пояснюється тим, що вони дорого коштують (висока перевізна плата), мають низьку схоронність вантажів і великий термін доставлення. Практично всі вони на сьогодні перевозяться автомобільним транспортом, тому розглядати їх як перспективний напряму подальшому розвитку послуг при завезенні і вивезенні вантажів недоцільно.

Зробивши розрахунки економії від прискорення обігу вагона з контейнерами, встановлено, що відправлення контейнерів у складі маршрутного контейнерного поїзда набагато ефективніше, ніж у складі маршрутної групи, тому що термін доставлення вантажу швидше і складає 8,05-9,08 доби. Це суттєво менше, ніж за традиційної технології доставлення.

Економію від прискорення обігу вагона з контейнером за рік отримуємо в межах 430-450 тис. грн. Економічний ефект від впровадження контейнерних поїздів на території України за п'ять років експлуатації 1 965 128 грн для маршруту (S1) і 1 979 142 грн за маршрутом (S2).

Перспективою розвитку запропонованих підходів є уточнення прогнозу обсягів перевезень і складових витрат, пов'язаних із транспортуванням вантажів у контейнерах, за рахунок використання стохастичних методів моделювання і штучного інтелекту.

Список використаних джерел

1. Контейнерні перевезення та ринок термінальних послуг на залізницях України – що має змінитися? URL: <https://railexpoua.com/novyny/pro-rynok-terminalnykh-posluh-na-zaliznytsi-ukrainy/>.
2. Інтегрований звіт АТ «Укрзалізниця»-2020. Київ: Укрзалізниця, 2021. 308 с.
3. Вантажообіг морських портів України за 2021 рік становив 153 млн т. URL: <https://www.railinsider.com.ua/vantazhoobig-morskykh-portiv-ukrayiny-za-2021-rik-stanovyv-153-mln-t/>.

4. Informall BG: Відновлення прямих контейнерних перевезень в Україну є гуманітарною потребою. URL: <https://usm.media/informal-bg-vidnovlennya-pryamih-kontejnernih-perevezen-v-ukra%D1%97nu-%D1%94-gumanitarnoyu-potreboyu/>.

5. Альошинський Є. С., Кіхтєва Ю. В. Принципи логістичного дослідження роботи прикордонних передавальних станцій. *Восточно-европейский сборник передовых технологий*. Харків: УкрДАЗТ, 2007. Вип. 1. С. 110-113.

6. Баритко А. Л., Куренков П. В. Організація і технологія зовнішньоторгових перевезень. *Залізничний транспорт України*. 1998. № 8. С. 59-63.

7. Визначення сфери ефективності контейнерних перевезень /Ю. В. Демин та ін. *Залізничний транспорт України*. 1998. № 1. С. 4-5.

Lomotko Denys, Nesterenko Oleksandr IMPROVEMENT OF FREIGHT FORWARDING OPERATIONS WITH BULK CARGO

Abstract. The article considers the option of the technology of bulk cargo transportation by accelerated trains, based on two separate routes that allow delivering goods to the countries of the European Union by land in the west of our country and through the ports of the Black Sea coast. Approaches that allow not only choosing the best option for the technology of transporting bulk cargo by accelerated trains, but also improving the use of vehicles in conditions of limited resources are considered. The rationality of measures to improve the quality of freight transportation organization is not only the economic effect from freight charges, but also the time of delivery.

Conclusions. The analysis of the generalized economic-mathematical model of container trains, which includes the main criteria and parameters taking into account the technical equipment of the chain and the technology of transit flows, when in each part of the LTL can exist service channels of different capacity, with different costs and effects on the development of road traffic. The model of a freight container train proposed in this section improves the technology for the transport of goods in containers with railways. In developing a model for the delivery and export of goods using vehicles, it is necessary to take into account the fact that in the present conditions, the volume of small-scale transport is almost zero. This is because they are expensive (high transport fee), have low product safety and long delivery time. Almost all of them are now transported by road, so it is not recommended to consider them as a promising direction in the further development of services for the import and export of goods. After calculating the savings from acceleration of

car turnover by containers, it was found that shipping containers in a block container train is much more efficient than in a block group, As cargo delivery times are faster, ranging from 8.05 to 9.08 days. We get savings from acceleration of car turnover by containers for a year within 430 - 450 thousand UAH. Economic consequences of introduction of container trains in Ukraine for 5 years of operation 1 965 128 UAH. for the route (S1) and 1 979 142 UAH. on route (S2). The prospect of developing the proposed approaches can be clarified by predicting the volumes of transport and the costs of components associated with the transport of goods in containers, by using stochastic modelling methods and artificial intelligence.

Keywords: rail transport, containerization, container, multimodal transportation, freight traffic, transportation.

Ломотько Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет

залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

E-mail: den@kart.edu.ua.

Нестеренко Олександр Олександрович, аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0007-3688-3684>. E-mail: nesterenko8@kart.edu.ua.

Lomotko Denys, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of the department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

E-mail: den@kart.edu.ua.

Nesterenko Oleksandr, postgraduate student, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0007-3688-3684>.

E-mail: nesterenko8@kart.edu.ua.

УДК 656.072.2

DOI: 10.18664/iksz.v29i1.300883

БУТЬКО Т. В., д.т.н., професор,

КРИВИЧ А. В., магістрант

ЯЩУК Ю. І., аспірант

ГУРИН Д. О., магістрант

(Український державний університет залізничного транспорту)

ЖУКОВИЦЬКИЙ І.В., д.т. н, професор (Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту, Український державний університет науки і технологій)

Організація функціонування інтегрованих пасажирських залізничних пересадочних комплексів на засадах логістики

Анотація. Процес організації пасажирських залізничних перевезень потребує підвищеної уваги, особливо в період воєнного стану в країні. Одним із критичних місць у цьому процесі є зосередження значної кількості пасажирів у межах вокзалу і привокзальної площі, де відбувається пересадка на інші види транспорту. Проведений аналіз по країнах ЄС, США, Південної Кореї, Великої Британії, Китаю свідчить, що основною тенденцією в цих країнах є перехід універсальних залізничних вокзалів до інтегрованих залізничних пересадочних комплексів. Такий пересадочний комплекс виконує функції об'єднання різних видів транспорту: залізничного, авіаційного, міського, приміського, і забезпечує найбільш швидку пересадку пасажирів, що запобігає ефекту створення неконтрольованого натовпу. Для оцінювання параметрів пасажиропотоків в умовах такого мегаполіса, як Київ, було проведено дослідження, які подано у вигляді погодинних динамік розподілу кількості пасажирів, перевезених разом у міжрегіональному і приміському сполученні, і доведено існування «ранкового» і «вечірнього» ефектів. Це спричиняє збільшення кількості пасажирів та ускладнює управління потоками. Для переходу залізничного вокзалу Київ-Пасажирський у статус інтегрального пересадочного комплексу запропоновано об'єднати в єдину систему залізничну станцію, вокзал, привокзальну площу, де зосереджено зупинки міського транспорту, включно з метрополітеном, під управлінням єдиного інтермодального пасажирського оператора. Задля управління пасажиропотоками в такій системі сформовано оптимізаційну математичну модель із цільовою функцією, що являє собою сумарний час на пересування пасажирів кожною складовою системи. Система обмежень містить умову збереження пасажиропотоку і технологічні параметри щодо інтервалів часу прибуття поїздів.

Ураховуючи, що найбільш критичними місцями в системі є час перебування пасажирів у будівлі вокзалу і час знаходження на привокзальній площі, для управління пасажиропотоками на цих елементах використано апарат теорії динаміки натовпу. Процес пересування пасажиропотоків будівлею вокзалу подано як хвильовий процес. При цьому кожне прибуття поїзда утворює хвилю пасажирів. Для формалізації цього хвилеподібного процесу використано хвильове рівняння Шредінгера у форматі 2D, обмеженнями є план будівлі вокзалу. Таку модель доцільно використовувати для формування розумної системи орієнтації пасажирів на вокзалі. Для управління пасажиропотоками на привокзальній площі запропоновано використати комплекс математичних моделей: для формалізації руху пасажирів до зупинок міського транспорту – рівняння Ейконала, а для синхронізації пасажиропотоків із часом і місткістю міського транспорту – моделі теорії розкладу.

Процес управління пасажиропотоками на інтегрованому пересадочному комплексі запропоновано організувати на структурі розподілених систем підтримки прийняття рішень (СППР) під керівництвом єдиного пасажирського інтермодального оператора.

Ключові слова: пасажиропотоки, залізничний вокзал, інтегрований пересадочний комплекс, математичні моделі, міський транспорт.

Вступ

Процес організації пасажирського залізничного сполучення, зокрема швидкісного, є надзвичайно складним в умовах воєнного стану в Україні. АТ «Укрзалізниця» залишається основним стратегічним перевізником вантажів і пасажирів. Надійність самого перевезення і безпека пасажирів є

головним завданням у процесі функціонування транспортної системи України та АТ «Укрзалізниця» зокрема. Особливо це стосується великих мегаполісів, де концентруються пасажиропотоки і відбувається взаємодія залізничного і міського транспорту: метрополітену, міського електротранспорту (трамвай, тролейбус), маршрутних таксі тощо, зупинки яких зосереджено на привокзальній площі.

© БУТЬКО Т. В., КРИВИЧ А. В., ЯЩУК Ю. І., ГУРИН Д. О., ЖУКОВИЦЬКИЙ І.В 2024

У цьому контексті залізничну станцію, вокзал разом із привокзальною площею доцільно розглядати як великий пасажирський хаб (інтегральний пересадочний комплекс). Для того щоб запобігти скупченню пасажирів у такій системі, доцільно синхронізувати функціонування всіх її елементів на засадах логістики, тобто забезпечити чітку взаємодію залізничного і міського транспорту.

Постановка проблеми

Підвищення рівня конкурентоспроможності залізничного транспорту на ринку пасажирських перевезень обумовлено переважно рівнем організації, комфорту і безпеки процесу переміщення пасажирів. Особливої актуальності ці питання набувають у період воєнного стану в Україні.

Одним із критичних місць у процесі переміщення пасажирів є перебування їх у межах такої системи, як інтегрований пересадочний комплекс. Як відомо, пасажиропотокам, які прибувають і відправляються з залізничної станції, притаманний так званий «ранковий» і «вечірній» ефект, що призводить до значного збільшення пасажирів у всій системі. Цей ефект обумовлений підвищенням інтенсивності надходження і відправлення приміських і міжрегіональних поїздів у певні періоди доби, що у свою чергу спричиняє значну нерівномірність у функціонуванні зазначеної вище системи та ускладнює її управління. Ураховуючи, що пасажирські і приміські поїзди надходять на станцію з певним інтервалом часу, необхідно так скоординувати рух пасажиропотоку в системі, щоб загальний час знаходження пасажирів у ній був якомога найменшим, тобто не створювати ефект «неконтрольованого натовпу».

Управління пасажиропотоками відбувається на основі створення розумної системи орієнтації пасажирів і узгодженого графіка підведення на привокзальній площі міського транспорту до зупинок.

Отже, необхідним є формування комплексу математичних моделей, що адекватно відтворюють процес руху пасажиропотоків від платформи на станції, через будівлю вокзалу, привокзальну площу до зупинок міського транспорту.

Аналіз досліджень і публікацій

Як доводить аналіз, у більшості країн ЄС та інших країнах залізничні вокзали перетворилися у складові інтегрованих транспортних вузлів, а пасажирів все частіше складають маршрути, використовуючи декілька поїздів або різні види транспорту. Питанням організації функціонування пересадочних пасажирських комплексів присвячено багато уваги в сучасних наукових дослідженнях. Так, у дослідженні [1] для визначення розподілу щільності потоку пасажирів на вокзалі було запропоновано методологію, що поєднує методи математичної статистики та імітаційного моделювання. Цей метод дає змогу визначити необхідну пропускну спроможність пішохідних комунікацій та оптимальну швидкість пересадочних потоків. Однак такий метод потребує проведення складних статистичних досліджень параметрів пасажиропотоків, які можуть значно відрізнятися за різними залізничними вокзалами. У дослідженні [2], що стосується завантаження

залізничного вокзалу в Гуанчжоу (Китай), було запропоновано спосіб моделювання організації пасажиропотоків із використанням клітинних автоматів і генетичного алгоритму. У роботі [3] авторами зазначено, що розповсюдження пасажиропотоку відбувається в інформаційному полі. При цьому умовою формування потенційної функції на всій області визначення району пересадки є найкоротша відстань до глобальної мети і відчуття дискомфорту біля перешкод. Для формалізації процесу руху пасажирів запропоновано використання рівняння Ейконала. У роботі [4] розроблено модель узгодження графіка підведення рухомого складу різних видів транспорту до залізничного пересадочного комплексу на основі комплексного використання методів теорій розкладу та генетичних алгоритмів, що, на відміну від наявних методів, дає змогу визначити більш точний графік прибуття і відправлення міського пасажирського транспорту у взаємодії з залізничним за умови гарантованого забезпечення варіантів пересадки в межах директивних строків.

Проведений аналіз довів, що складність формалізації процесу організації потоків пасажирів на залізничному вокзалі при здійсненні пересадки потребує розроблення нових методів, які б дали змогу реалізувати модель направленої руху пасажиропотоків з урахуванням індивідуальної поведінки пасажирів на інтегрованому пересадочному комплексі.

Мета дослідження

Формалізація процедури управління пасажиропотоками на інтегрованому пасажирському залізничному пересадочному комплексі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Одним із основних завдань функціонування залізничної транспортної системи є організація надійного і безпечного перевезення пасажирів і вантажів. Особливої актуальності набуває це завдання в період воєнного стану в Україні. У надзвичайних умовах АТ «Укрзалізниця» виконувала і виконує функції, від яких залежить існування Української Держави. Як відомо, тільки за перше півріччя 2023 р. обсяги перевезень вантажів залізницею становили 70,5 млн т, а у важливому для країни експортному сполученні – 40 % загальних обсягів перевезень. АТ «Укрзалізниця» також здійснювала масштабні евакуаційні заходи з перевезень населення до західних областей (перевезено 4 млн пасажирів) і за кордон

(перевезено 600 тис. пасажирів). У цьому контексті особливу увагу слід приділити саме питанням безпеки при перевезенні населення, особливо зважаючи на трагічні події на вокзалі в м. Краматорськ. Саме такі події спонукають розглядати системно процес перевезення задля безпеки і комфорту пасажирів.

Процес перевезення пасажирів залізницею не закінчується такою подією, як прибуття потяга на відповідну платформу на станції. Далі пасажиропотоки переміщуються або будівлею вокзалу, або підземними тунелями і виходять на привокзальну площу для

пересадки на міський транспорт, включно з метрополітемом. Системний підхід передбачає, що залізничну станцію, вокзал разом із привокзальною площею доцільно розглядати як великий пасажирський хаб, тобто об'єднати їх у єдину систему під управлінням єдиного інтермодального оператора, який забезпечує синхронізацію при взаємодії залізничного і міського транспорту. Схему руху пасажиропотоків у такій системі наведено рис. 1.

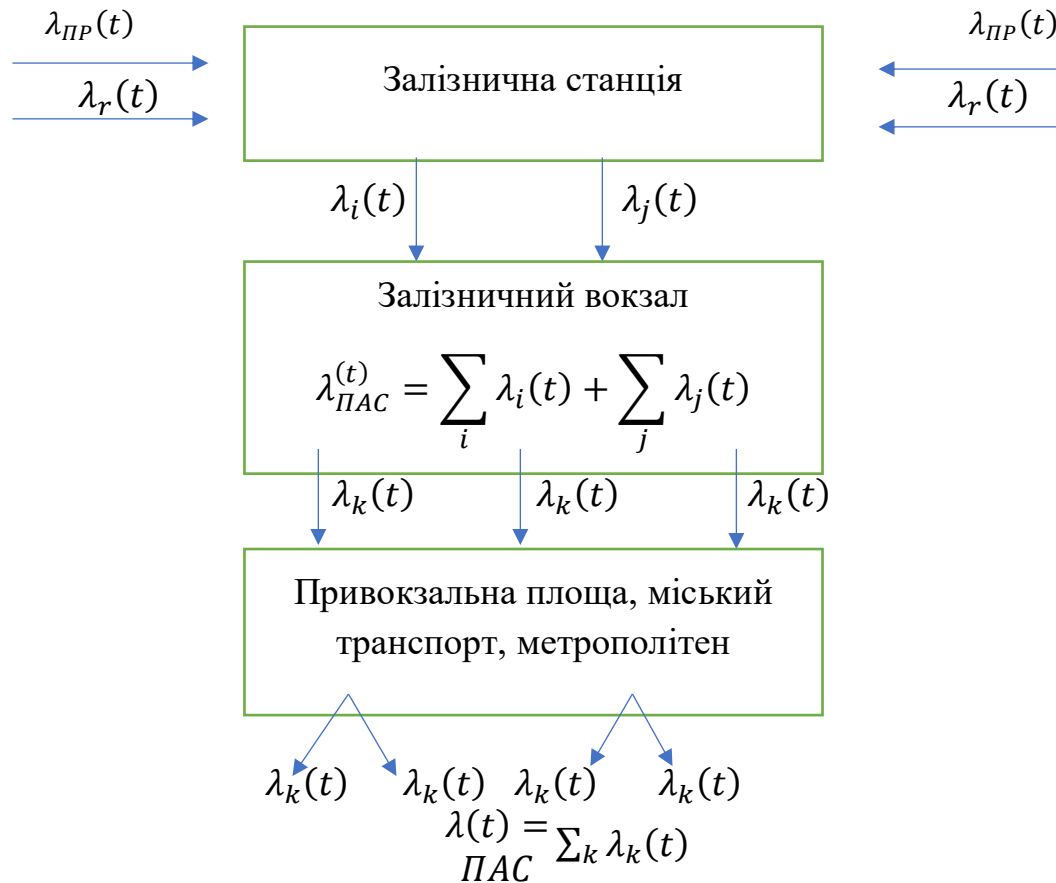


Рис. 1. Схема руху пасажиропотоків

Тут $\lambda_{PP}(t)$ – інтенсивність надходження приміського залізничного транспорту; $\lambda r(t)$ – інтенсивність надходження міжрегіональних пасажирських поїздів; $\lambda_i(t)$ – інтенсивність приміського пасажиропотоку; $\lambda_j(t)$ – інтенсивність міжрегіонального пасажиропотоку; $\lambda_k(t)$ – інтенсивність пасажиропотоку на k -й вид міського транспорту.

Як відомо, інтенсивність залізничного транспортного потоку в загальному випадку є функцією часу, і в інтервалі часу $t \in [0,75 - 2]$ год підпорядковується нормальному закону розподілу

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{|x-\lambda t|^2}{2\bar{J}}\right), \quad (1)$$

де x – випадкове значення кількості поїздів;

$\lambda = \lambda_{PP} + \lambda r$ – середня годинна інтенсивність.

У меншому періоді часу $t < 0,75$ год кількість поїздів підпорядковується закону Пуасона

$$P_t(X = x) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Для оцінювання особливостей зміни інтенсивності пасажиропотоку на інтегрованому пересадочному комплексі було проведено дослідження в умовах станції і вокзалу Київ-Пасажирський. Результати таких досліджень подано у вигляді динамік розподілу кількості пасажирів, що прибувають погодинно (разом у міжрегіональному та приміському сполученні (рис. 2) і окремо у приміському сполученні (рис. 3)), та оцінено такі параметри: $\bar{N}$ – середня годинна інтенсивність, σ – середньоквадратичне відхилення за час t та K_H – коефіцієнт нерівномірності.



$$(\bar{N} = 42967,7; \sigma = 1645,6; k_H = 1,2)$$



$$(\bar{N} = 21712,9; \sigma = 601,1; k_H = 1,1)$$

Аналіз динамік на рис. 2, 3 доводить існування так званого «ранкового» і «вечірнього» ефектів, коли кількість пасажирів збільшується приблизно на 20 %, а сам процес надходження пасажирів можна подати як хвилеподібний із різними амплітудами.

Для того щоб запобігти виникненню ефекту «натопу», доцільно синхронізувати функціонування елементів системи – залізнична станція, вокзал, привокзальна площа – відповідно до їхніх пропускних спроможностей. Для формалізації цього процесу сформовано оптимізаційну математичну модель із цільовою функцією такого вигляду:

$$F(t, n) = t_{\text{плат}} + t_{\text{вокз}} + t_{\text{прив. пл}} > \min \quad (3)$$

де t – час;

n – кількість пасажирів; $t_{\text{плат}}$ – час проходження пасажирів по платформі;

$t_{\text{вокз}}$ – час перебування пасажирів на вокзалі;

$t_{\text{прив. пл}}$ – час перебування пасажирів на привокзальній площі.

При цьому час між надходженням пасажирських поїздів, у тому числі приміських, $t_{\text{п}}$ має бути більшим,

ніж час проходження пасажирів по вокзалу:

$$t_{\Pi} \geq t_{\text{ВОКЗ}}. \quad (4)$$

Час підведення міського транспорту на привокзальну площу $t_{\text{МТР}}$ має відповідати умові

$$t_{\text{МТР}} \leq t_{\text{ВОКЗ}}. \quad (5)$$

Також має виконуватись умова збереження пасажиропотоку

$$\int_0^{t_{\text{плат}}+t_{\text{вокз}}} t_{\text{пас}} \cdot \lambda(t) dt = \int_0^t t * \lambda_k(t) - N_{\text{пер}}, \quad (6)$$

де $N_{\text{пер}}$ – кількість пасажирів, які залишаються у будівлі вокзалу для пересадки на інші поїзди (транзитні пасажирів).

Тобто вирази (4)-(6) являють собою систему обмежень математичної моделі.

Найбільш критичними місцями у формулі (3) є час перебування пасажирів у будівлі вокзалу $t_{\text{пас}}$ і час їхнього знаходження на привокзальній площі $t_{\text{прив. пл.}}$.

З метою управління пасажиропотоками при їхньому переміщенні будівлею вокзалу доцільно використовувати теорію динаміки натовпу. Разом із тим складність формалізації руху пасажирських потоків на залізничному вокзалі визначається технічними (просторовими) параметрами будівлі вокзалу та нерівномірним характером у часі і просторі переміщення самих пасажиропотоків. Аналіз напрямів досліджень у сфері математичного моделювання динаміки руху потоків людей доводить, що їх можна поділити на макроскопічні в неперервному просторі, мікроскопічні в дискретному просторі та гібридні, які поєднують особливості і переваги двох попередніх типів моделей. Моделі макроскопічного рівня описують рух пасажирських потоків у цілому, наприклад на основі рівнянь газо- і гідродинаміки, які дають дуже наближені рішення. Моделі мікроскопічного рівня описують поведінку окремих пасажирів у потоці, тобто вони враховують соціальні зв'язки: іде пасажир окремо чи пасажир рухається групами (родина з дітьми і багажем тощо). Формування гібридних моделей потребує переходу від дискретного простору до неперервного. Для того щоб пасажиропотік узагалі рухався, навколо пасажирів має існувати зона комфорту, яку доцільно уявити як коло з радіусом 0,5-0,8 м залежно від групи, у якій рухається пасажир. Отже, дискретний простір переводиться в неперервний простір 2D (ординати (x, y)), де, як відомо, визначена операція диференціювання. Спираючись на вищенаведене, сформуємо модель руху пасажиропотоків гібридного типу.

З метою моделювання і організації процесу руху пасажирів уявімо, що кожне прибуття поїзда утворює хвилю пасажирів, яка розповсюджується будівлею

вокзалу з деякою швидкістю V . Ця хвиля може поступово загасати (зменшується амплітуда хвилі) і через такі фактори, як дифузія пасажирів усередині вокзалу або вихід їх із вокзалу на привокзальну площу. Тобто рух пасажирів по вокзалу пов'язаний з хвилями, що генеруються прибуттям нових поїздів. Для відтворення цього процесу сформуємо модель, у якій пасажиропотоки можна уявити як хвильові функції, і скористаємося хвильовим рівнянням, аналогічним рівнянню Шредінгера [5, 6].

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = v \cdot \nabla^2 \psi - 2 \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad (7)$$

де $\psi(x, t)$ – хвильова функція, що описує щільність (кількість пасажирів на вокзалі залежно від часу t і їхнього місцезнаходження $X_{(x,y)}$ – координати простору);

v – швидкість розповсюдження хвилі (швидкість руху пасажирів) при надходженні потяга;

$$\nabla^2 = l \frac{\partial^2}{\partial x^2}; \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \text{оператор Лапласа, який}$$

описує розподіл пасажирів по будівлі вокзалу у форматі 2D.

α – коефіцієнт загасання, який може описувати зменшення амплітуди хвилі із часом.

Обмеженнями в моделі є просторові параметри будівлі вокзалу в плані. Розв'язок моделі подається у вигляді суми функції Бесселя і Неймана.

Таку модель доцільно використовувати для регулювання системи орієнтації пасажиропотоків на вокзалі задля зменшення часу перебування $t_{\text{вокз}}$ і запобігання створенню ефекту «натовпу».

З метою зменшення часу перебування пасажирів

на привокзальній площі тприв. пл запропоновано комплекс відповідних моделей – це моделі руху пасажирів по привокзальній площі та узгодження графіка підведення рухомого складу різних видів міського транспорту до залізничного пересадочного комплексу залежно від інтенсивності пасажиропотоку.

Ураховуючи фактори, яким надають перевагу пасажирів при виборі маршруту на привокзальній площі для пересадки на міський транспорт, – найкоротша відстань і відчуття дискомфорту біля перешкод, доцільно як модель руху пасажиропотоків обрати рівняння Ейконала [3].

Для зменшення часу очікування пасажирами прибуття бажаного виду міського транспорту, тобто синхронізації хвилеподібної інтенсивності пасажиропотоку з часом підведення і місткістю міського транспорту, доцільно використовувати моделі теорії розкладу (англ. *Schedule theory*) [4].

Запропонований комплекс математичних моделей для управління функціонуванням системи «залізнична станція, вокзал, привокзальна площа» може бути використаний для процесів посадки пасажирів у поїзди чи висадки з них. Інформаційно цей процес може бути організований у розподіленій системі підтримки прийняття рішень на автоматизованих робочих місцях персоналу залізничної станції, вокзалу та диспетчерського персоналу різних видів міського транспорту під керівництвом єдиного пасажирського інтермодального оператора на основі Internet/Intranet-технології.

Висновки

З метою підвищення надійності і комфорту залізничних пасажирських перевезень запропоновано перехід універсальних вокзалів у статус інтегрованих пасажирських пересадочних комплексів шляхом об'єднання в єдину віртуальну систему залізничної станції, залізничного вокзалу і привокзальної площі, де зосереджено зупинки міського транспорту. Як доводить аналіз по країнах ЄС, Великої Британії, США, Південної Кореї, Китаю тощо, такий перехід зменшує час перебування пасажирів у системі та запобігає створенню ефекту «неконтрольованого натовпу», якщо синхронізувати функціонування елементів системи.

Для оцінювання параметрів пасажиропотоків у такій системі проведено статистичні дослідження в умовах станції і вокзалу Київ-Пасажирський та отримано динаміки розподілу погодинної інтенсивності пасажирів, які прибули міжрегіональними і приміськими поїздами. Доведено існування «ранкового» і «вечірнього» ефектів, що призводить до збільшення інтенсивності пасажиропотоків приблизно на 20 %.

Сформовано оптимізаційну математичну модель функціонування такого інтегрованого пасажирського пересадочного комплексу при взаємодії з міським транспортом. Як цільову функцію обрано сумарний час перебування пасажирів на кожному елементі системи. Система обмежень включає умову збереження пасажиропотоку і технологічні параметри надходження

поїздів.

Для управління пасажиропотоками на елементах системи використано теорію динаміки натовпу. При цьому процес надходження і пересування пасажирів будівлею вокзалу подано як хвилеподібний, який генерується прибуттям кожного потяга. Для формалізації цього процесу запропоновано використання рівняння Шредінгера у форматі 2D, а обмеженням є план будівлі вокзалу. Використання такого підходу – це основа формування «розумної» системи орієнтації пасажирів на вокзалі, що зменшує час їхнього перебування в ньому.

Для управління пасажиропотоками на привокзальній площі запропоновано використання комплексу математичних моделей: моделі руху пасажирів до глобальної мети (зупинка міського транспорту) на основі рівняння Ейконала синхронізації інтенсивностей пасажиропотоків із часом підведення і місткістю міського транспорту на основі теорії розкладу.

Сформовано комплекс математичних моделей як основну СППР на АРМах відповідних працівників, запропоновано організувати на системі розподілених СППР під управлінням єдиного пасажирського інтермодального оператора.

Список використаних джерел

1. Торопов Б. І. Розвиток пасажирських комплексів на основі закономірностей формування пасажиропотоків: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Київський ін-т залізничного транспорту Харківської держ. акад. залізнич. тр-ту. Київ, 2001. 21 с.
2. Wand W., Huand H. The Optimization Study on Passenger Organization at Passenger Station Based on CAS. Transportation Logistics Engineering Institution, HoHai University 210098, P.R. China PHD of Business School. 2007. DOI10.2991/iske.2007.166.
3. Бутько Т. В., Прохорченко А. В., Журба О. О. Формування моделі організації пасажиропотоків при здійсненні пересадки на залізничному вокзалі з використанням колективного інтелекту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2010. № 2. С. 57-61.
4. Журба О. О. Формування моделі узгодження графіка підводу рухомого складу різних видів транспорту до залізничного вокзалу. *Збірник*

наукових праць. Донецьк: Дон ІЗТ, 2010. Вип. 22. С. 62-68.

5. Schrodinger E. An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules. *Physical Review*. 1926. 28(6). P.1049-70. doi:10.1103/PhysRev.28.1049.

Abstract. The process of organizing passenger railway transportation requires increased attention, especially during the period of martial law in the country. One of the critical places in this process is the concentration of a significant number of passengers within the station and the station area, where transfers to other modes of transport take place. The analysis carried out for the countries of the EU, USA, South Korea, Great Britain, and China shows that the main trend in these countries is the transition of universal railway stations to integrated railway transfer complexes. Such a transfer complex performs the functions of combining various types of transport: railway, air, urban, suburban and ensures the fastest transfer of passengers, which prevents the effect of creating an uncontrolled crowd. In order to evaluate the parameters of passenger flows in the conditions of such a metropolis as Kyiv, studies were conducted, which are presented in the form of hourly dynamics of the distribution of the number of passengers transported together in interregional and suburban traffic, and the existence of «morning» and «evening» effects was proven. This causes an increase in the number of passengers and complicates flow management. For the transition of the Kyiv-Pasajirskyi railway station to the status of an integral transfer complex, it is proposed to unite the railway station-station-square into a single system, where city transport stops are concentrated, including the subway, under the management of a single intermodal passenger operator. In order to manage passenger flows in such a system, an optimization mathematical model with an objective function representing the sum of the times for the movement of passengers through each component of the system was formed. The system of restrictions contains the condition of maintaining the passenger flow and technological parameters regarding the time intervals of train arrivals.

Given that the most critical points in the system are the time passengers stay in the station building and the time they are on the station square, the crowd dynamics theory apparatus was used to manage passenger flows on these elements. The process of movement of passenger flows through the station building is represented as a wave process. At the same time, each train arrival creates a wave of passengers. To formalize this wave-like process, Schrödinger's wave equation in 2D format was used, and the plan of the station building acts as a limitation. This model should be used for the formation of a smart passenger orientation system at the train station. It is proposed to use a set of mathematical models to manage passenger flows at the station square, namely: to formalize the movement of passengers to city transport stops - the Eikonal equation, and to synchronize passenger flows with the time and capacity of city transport - timetable theory models.

The process of managing passenger flows at the

integrated transfer complex is proposed to be organized on the basis of the structure of distributed decision support systems (DSS) under the leadership of a single passenger intermodal operator.

Бутько Тетяна Василівна, д.т.н., професор, завідувач кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: butko@kart.edu.ua. ID ORCID 0000-0003-1082-599X.

Tetyana Butko, Doctor of technical Sciences, Professor, Head of the Department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: butko@kart.edu.ua. ID ORCID 0000-0003-1082-599X.

Кривич Артем Вікторович, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: krivich.artem35@gmail.com. ID ORCID 0009-0006-8910-4835.

Artem Kryvyich, master's student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: krivich.artem35@gmail.com. ID ORCID 0009-0006-8910-4835.

Ящук Юрій Іванович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: topqrtent@gmail.com. ID ORCID 0009-0006-1985-1181.

Yury Yashchuk, postgraduate student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: topqrtent@gmail.com. ID ORCID 0009-0006-1985-1181.

Гурин Дмитро Олександрович, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: dmitroqurin@gmail.com. ID ORCID 0009-0009-1439-9407.

Dmytro Hurin, master's student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: dmitroqurin@gmail.com. ID ORCID 0009-0009-1439-9407.

Жуковицький Ігор Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Електронні обчислювальні машини, Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0002-3491-5976. Тел.: +380503633573. E-mail: ivzhukl@ua.fm.

Ihor Zhukovyt'skyi, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronic Computers, Dnipro Institute of Infrastructure and Transport, Ukrainian State University of Science and Technology. ORCID ID: 0000-0002-3491-5976. Тел.: +380503633573. E-mail: ivzhukl@ua.fm.

УДК 681.31

DOI: 10.18664/ikszt.v29i1.300911

КАЧАНОВ П.О., доктор технічних наук, професор, професор ЗВО кафедри автоматики і управління в технічних системах Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет»

СИТНІК Б. Т., кандидат технічних наук, доцент, доцент ЗВО

МІРОШНИК А.М., аспірант кафедри автоматики і управління в технічних системах Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет»

Удосконалення моделі та методу структурної ідентифікації параметрів інерційних об'єктів

Представив д.т.н., професор Приходько С.І.

Удосконалено моделі ідентифікації параметрів та структури складного динамічного рухомого об'єкта (РО) для побудови адаптивних систем керування (АСК) для корекції параметрів налаштування регуляторів.

Показано, що параметричний вихід адаптивного цифрового фільтра можна використовувати як при автоматичному коригуванні параметрів керованого фільтра так і при автоматичному коригуванні параметрів регулятора в контурі регулювання системи керування в обмеженому діапазоні змін коефіцієнта адаптації, що розширює сферу застосування запропонованого методу ідентифікації. Значення коефіцієнтів знаменника формуючого фільтра моделі послідовно змінюються на ідентифіковані значення коефіцієнтів передавальної функції об'єкта $a_1, a_2 \dots a_{n-1}$ для знаходження нових значень коефіцієнтів a_n . В автоматичному режимі роботи ідентифіковані раніше значення коефіцієнтів об'єкта повинні запам'ятовуватися і вводиться у формуючий фільтр, змінюючи його структуру та порядок, для обчислення значення величини наступного коефіцієнта об'єкта. Після ідентифікації необхідних значень коефіцієнтів передавальної функції об'єкта $a_1, a_2 \dots a_n$ процес ідентифікації повторюється послідовно у кожному циклі перехідних процесів системи керування. Підключення об'єкта до відповідних входів-виходів формуючих фільтрів пристрою ідентифікації здійснюється логічним пристроєм.

Ключові слова: структурно-параметрична ідентифікація, адаптивна система керування, високошвидкісний рух, формуючий фільтр.

Вступ.

Зниження витрат палива та енергії високошвидкісних РО пов'язане з необхідністю створення систем автоматичного керування, їх ідентифікацією, оптимізацією та адаптацією [1, 2, 12-22], забезпеченням безпеки обслуговуючого персоналу, високою швидкістю обладнання та обмеженими реакціями людини [23-25], що потребує його виключення з процесу управління РО.

Аналіз наявних рішень.

© КАЧАНОВ П.О., СИТНІК Б. Т., МІРОШНИК А.М., 2024

Цифрові системи керування (ЦСК) [10, 11] на залізничному транспорті використовуються в складних ієрархічних системах цифрового керуванні РО (роботами. дронами. локомотивами та ін.), в системах нагляду за станом колії, мостів, споруд тощо. Приклад такої системи з блоком ідентифікації та адаптивним ПД-регулятором наведено на рис. 1.

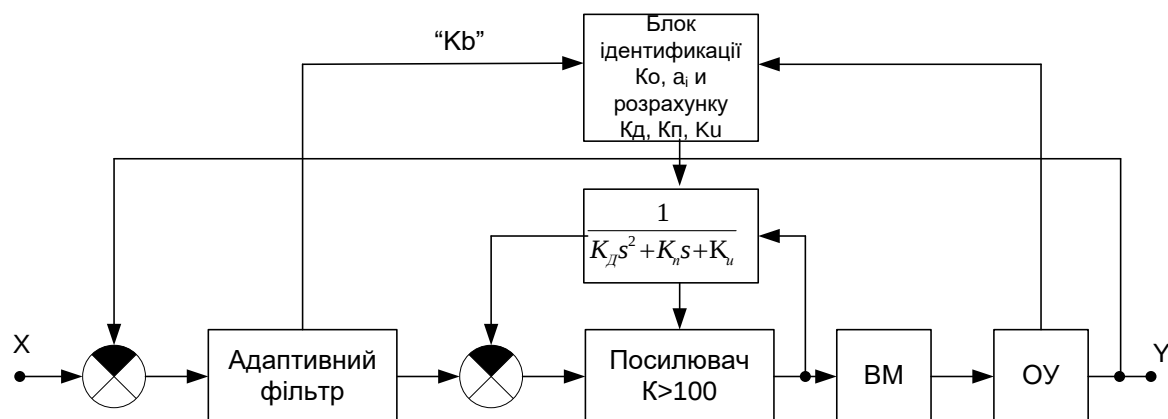


Рисунок 1 – Структура системи з блоком ідентифікації та адаптивним ПІД-регулятором

Провідні залізничні компанії [5-9] впроваджують квадрокоптери для контролю та діагностування залізничних об'єктів, боротьби з крадіжками, вандалізмом та вирішення інших проблем на підприємствах залізниць. Дрони збирають інформацію, яка дозволяє підвищити до 20% показники безпеки та значно зменшити витрати.

Наприклад, за даними компанії BNSF (США) кожна колія двічі на тиждень повинна перевірятися обхідниками. Безпілотний контроль квадрокоптерами може збільшити частоту перевірок колії для покращення стану безпеки руху потягів.

Велика кількість сучасних наукових досліджень та реалізацій АСК присвячена створенню робастних, нейроробастних, нечітких, інтелектуальних фільтрів та регуляторів [1, 2, 3].

АСК [2, 3] знаходять застосування як системи керування складними нестационарними та багатовимірними об'єктами, що суттєво покращує їх характеристики надійності та техніко-економічні показники. За наукову основу досліджень було взято роботи вчених Бесекерського В.А., Загарія Г.І., Заде Л.А., Лазаряна, В.А., Поспелова Д. А., Ципкіна Я.З.

Роботи цих та багатьох інших вчених [1-30] створили методичні та теоретичні передумови розвитку теорії АСК.

Мета дослідження.

Метою дослідження є забезпечення можливості ідентифікації всіх статичних та динамічних параметрів інерційних об'єктів шляхом організації послідовності визначення параметрів процесів ідентифікації та логіки організації підключення об'єкта до формуючих фільтрів системи ідентифікації.

Постановка задачі.

Завданням дослідження є розроблення нових моделей ідентифікації параметрів та структури РО для корекції поточних параметрів налаштування цифрових регуляторів АСК.

Основний матеріал.

Розглянемо обмеження відомої моделі та методу перешкодо захищеної ідентифікації. Структура схема відомої моделі надана на рис.2.

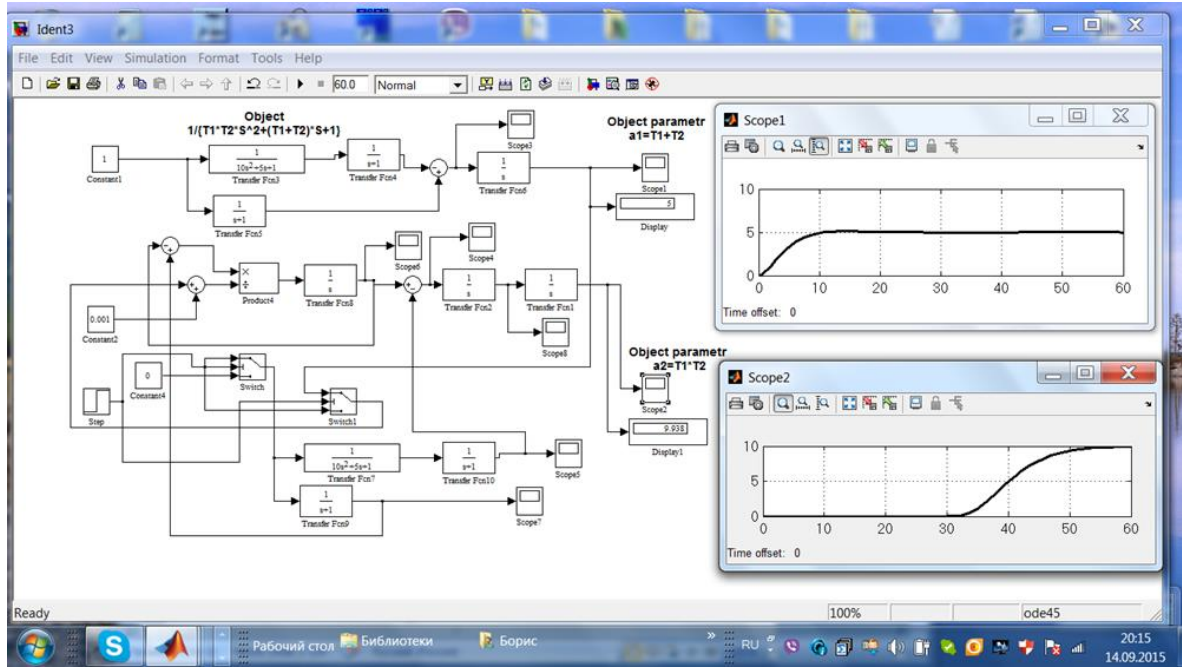


Рисунок 2 – Структура схема відомої моделі.

Динамічний об'єкт можна уявити передавальною функцією виду $W_o(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{c_k s^k + \dots + c_2 s^2 + c_1 s + 1} =$

$$\frac{K_0}{e^{\tau s} (c_k s^k + \dots + c_2 s^2 + c_1 s + 1)} \approx$$

$$\approx \frac{K_0}{(\frac{\tau}{m} s + 1)^m (c_k s^k + \dots + c_2 s^2 + c_1 s + 1)} \approx \frac{K_0}{a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1},$$

(1)

де $n=m+k$,

K_0 - статичний коефіцієнт посилення.

В [1] при $K_0=1$ запропоновано для визначення значень параметрів a_1 і a_2 використовувати теорему про кінцеве значення функції і помилку ідентифікації $e_1(s)$ в режимі, що встановився в наступному вигляді

$$e_1(s) = [W_{\phi_1}(s) - W_o(s)W_{\phi_2}(s)]X_{ex}(s) \quad (2)$$

і

$$e_1(0) = \lim_{s \rightarrow 0} \{ [W_{\phi_1}(s) - W_o(s)W_{\phi_2}(s)]X_{ex}(s) \} \quad (3)$$

та фільтри

$$W_{\phi_2}(s) = \frac{1}{a_{\phi_1} s + 1} \quad (4)$$

і

$$W_{\phi_2}(s) = \frac{1}{a_{\phi_2} s + 1} \quad (5)$$

Недоліком цієї моделі є те, що вона крім ідентифікації динамічних параметрів налаштування a_1 і a_2 не визначає ні його статичного коефіцієнта посилення при $K_0 \neq 1$ ні ідентифікацію динамічних

параметрів інерційних об'єктів a_1 і a_2 при $a_{\phi_1} \neq a_{\phi_2}$, при введенні в пристрій [16, 17] аперіодичного та адаптивного фільтрів, що підключаються до входу та виходу об'єкта, відповідно, при впливі на систему ідентифікації перешкод зі змінними характеристиками.

Крім того ця модель не може бути розширена на ідентифікацію поточних параметрів об'єктів n -ого порядку з будь-якими значеннями: $K_0, a_1, a_2, \dots, a_n$. Якщо $a_{\phi_1} \neq a_{\phi_2}$, то при $X_{ex}(s) = \frac{1}{s}$ на виходах обчислювача в режимі, що встановився $t \rightarrow \infty, s \rightarrow 0$ формуються сигнали

$$X_{\phi_{blx_1}}(s) = e_1(s) = \frac{a_{\phi_2} a_2 s^2 + (a_2 + a_1 a_{\phi_2})s + (a_{\phi_2} + a_1 - a_{\phi_1})}{(a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_{\phi_1} s + 1)(a_{\phi_2} s + 1)} \quad (6)$$

і

$$X_{\phi_{blx_1}}(0) = a_{\phi_2} + a_1 - a_{\phi_1}. \quad (7)$$

$X_{\phi_{blx_2}}(s)$ шукається як зображення інтеграла від помилки ідентифікації

$$e_2(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \{ [W_{\phi_1}(s)W_f(s) - W_o(s)W_{\phi_2}(s)W_f(s)]X_{ex}(s) \}$$

де $W_f(s)$ формуючий фільтр моделі (ФФМ) з передавальною функцією $W_f(s) = \frac{1}{a_{\phi_3} s + 1}$ і $a_{\phi_3} \neq$

$$a_{\phi_1} \neq a_{\phi_2}$$

$$X_{\phi_{blx_2}}(s) = \frac{e_2(s)}{s}$$

$$X_{\text{вх}2}(s) = \frac{e_2(s)}{s} = \frac{a_{\phi_2} a_2 s^2 + (a_2 + a_1 a_{\phi_2} - a_1 a_{\phi_1})s + (a_{\phi_2} - a_{\phi_1})}{s (a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_{\phi_1} s + 1)(a_{\phi_2} s + 1)(a_1 s + 1)} \quad (8)$$

З цього випливає, що за $a_{\phi_1} \neq a_{\phi_2}$

$$X_{\text{вх}2}(0) = \infty,$$

тобто система непрацездатна і, крім цього, вона не працює, якщо K_0 відрізняється від 1.

У системі ідентифікації [1], структурна модель якої наведена на рис.3, другий параметричний вихід другого адаптивного фільтра (АФ), підключеного до виходу об'єкта (рис.3), використовується для встановлення постійної часу другого керованого фільтра, підключеного до входу об'єкта, чим забезпечується рівність постійних часу першого та другого фільтрів при змінних перешкодах.

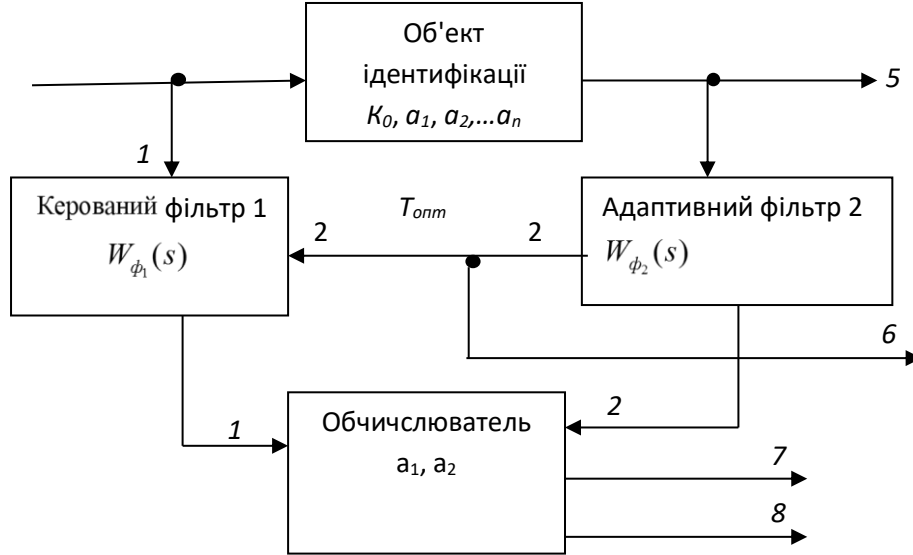


Рисунок 3 – Структурна схема

перешкодо захищеної системи ідентифікації.

$$X_{\text{вх}1}(s) = \frac{a_1 s}{(a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_{\phi} s + 1)} X_{\text{вх}}(s), \quad (9)$$

$$X_{\text{вх}2}(s) = \frac{a_2 s^2}{s (a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_{\phi} s + 1)(a_1 s + 1)} X_{\text{вх}}(s), \quad (10)$$

Отже, наявність цієї відмітної ознаки призводить до виключення ручного налаштування фільтрів при змінних перешкодах, що забезпечує рівність їх постійних часу і точність вимірювання параметрів об'єкта, що досліджується, і є метою роботи.

На вхід другого фільтра надходить вихідний сигнал об'єкта з адитивною перешкодою. Передатна функція другого фільтра описується виразом (5), де a_{ϕ_1} - сигнал другого входу першого керованого фільтра. Так як $a_{\phi_1} = a_{\phi_2} = T_{\text{опт}}$, то передавальні функції першого фільтра та другого фільтра рівні.

При $a_{\phi_1} = a_{\phi_2} = a_{\phi} = T_{\text{опт}}$ на виходах 7 і 8, відповідно, обчислювача в режимі, що встановився при $t \rightarrow \infty, s \rightarrow 0$ та при $X_{\text{вх}}(s) = \frac{1}{s}$ формуються сигнали

$$X_{\text{вх}1}(0) = a_1 \text{ і } X_{\text{вх}2}(0) = a_2, \quad (11)$$

які не залежать від змінних параметрів фільтрів.

Пропонована модель перешкодо-захищеної системи ідентифікації, структурна схема якої наведена на рис.4, може бути розширена на ідентифікацію поточних параметрів об'єктів n -ого порядку з будь-якими значеннями: $K_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ при дослідженні та налагодженні систем автоматичного регулювання в умовах впливу на них перешкод змінної інтенсивності.

Передатна функція об'єкта n -ого порядку з параметрами: $K_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ має такий вигляд (1). До таких систем відносяться, наприклад, замкнуті контури керування потяги з різним числом вагонів різної маси [23-25].

$$W_e(s) = W_m(s) - W_o(s) = \frac{K_0(a_n s + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1) - K_0}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} =$$

$$= \frac{K_0(a_n s + \dots + a_2 s^2 + a_1 s)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$

Вихідний сигнал $X_{\text{вх}1}(s)$ при $X_{\text{вх}}(s) = \frac{1}{s}$ дорівнює

$$X_{\text{вх}1}(s) = W_e(s) * X_{\text{вх}}(s) =$$

$$= \frac{K_0(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} * \frac{1}{s} =$$

$$= \frac{K_0(a_n s^{n-1} + \dots + a_2 s^1 + a_1)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$

У режимі, що встановився

$$X_{\text{вх}1}(0) = s \lim_{s \rightarrow 0} (W_e(s) * X_{\text{вх}}(s)) =$$

$$s \lim_{s \rightarrow 0} W_e(s) * X_{\text{вх}}(s) = s \lim_{s \rightarrow 0} X_{\text{вх}1}(s) =$$

$$= s \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{K_0(a_n s^{n-1} + \dots + a_2 s^1 + a_1)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} \right] = K_0 * a_1 * s$$

$$W_e(s) = W_m(s) - W_o(s) =$$

$$= \frac{K_0}{(a_\phi s + 1)(0 * s^m + \dots + 0 * s^2 + a_1 s + 1)} - \frac{K_0}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} =$$

$$= \frac{K_0(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1) - K_{1o}}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$

$$= \frac{K_0(a_n s^n + \dots + a_2 s^2)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$

$$X_{\text{вх}2}(0) = s \lim_{s \rightarrow 0} (W_e(s) * X_{\text{вх}}(s)) = s \lim_{s \rightarrow 0} (W_e(s) * X_{\text{вх}}(s)) =$$

$$= s \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_0(a_n s^n + \dots + a_2 s^3)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} * \frac{1}{s} =$$

$$= s \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_0(a_n s^{n-1} + \dots + a_2 s^2)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$

$$X_{\text{вх}2}(0) = s \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_0(a_n s^{n-1} + \dots + a_2 s^2)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$

Розділимо $X_{\text{вх}2}(s)$ на отримане значення коефіцієнта K_0 і двічі проінтегруємо

$$X_{\text{вх}2}(0) = s \lim_{s \rightarrow 0} \frac{X_{\text{вх}2}(s)}{K_0 s^2} \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^2 K_0 * a_2}{K_0 s^2} =$$

Ділимо значення сигналу $X_{\text{вх}1}(s)$ на K_0 , і інтегруємо його, а на виході інтегратора $X_{\text{вх}1}(0)$ в режимі, що встановився, отримаємо значення параметра a_1

$$X_{\text{вх}1}(0) = s \lim_{s \rightarrow 0} \frac{X_{\text{вх}1}(s)}{K_0 s} \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s K_0 * a_1}{K_0 s} =$$

Визначення значення a_2 . Встановимо коефіцієнти передавальної функції моделі формуючого фільтра, ввівши в модель отримані значення коефіцієнта передавальної функції об'єкта a_1 та K_f наступним чином: $K_f = K_0$, $b_0 = 1$, $b_1 = a_1$, $b_2 = 0, \dots$, $b_n = 0$. Тоді отримаємо

Тоді модель має передатну функцію виду

$$W_m(s) = \frac{K_0}{(a_\phi s + 1)(0 * s^m + \dots + 0 * s^2 + a_1 s + 1)}$$

Визначимо передатну функцію помилки моделі об'єкта $W_e(s)$.

Визначення значення a_3 . Аналогічно додаємо в модель отримані значення коефіцієнтів передавальної функції об'єкта K_0 , a_1 і a_2

$$\begin{aligned}
W_e(s) &= W_m(s) - W_o(s) = \\
&= \frac{Ko}{(0 * s^m + \dots + 0 * s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} - \frac{Ko}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} = \\
&= \frac{Ko(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1) - Ko(a_2 s^2 + a_1 s + 1)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} = \\
&= \frac{Ko(a_n s^n + \dots + a_3 s^3)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} \\
&= \frac{Ko(a_n s^{n-3} + \dots + a_3)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)(a_2 s^2 + a_1 s + 1)} \\
X_{\text{вх}X_3}(s) &= W_e(s) * X_{\text{вх}}(s) * \frac{1}{s^3} = \\
&= \frac{Ko(a_n s^n + \dots + a_3 s^3)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)(a_2 s^2 + a_1 s + 1)} * \frac{1}{s^3} = \\
&= \frac{Ko(a_n s^{n-3} + \dots + a_3)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)(a_2 s^2 + a_1 s + 1)} \\
X_{\text{вх}X_3}(0) &= s \lim_{s \rightarrow 0} \lim_{e \rightarrow 0} \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \lim_{s \rightarrow 0} e_3 \\
X_{\text{вх}X_3}(0) &= \frac{X_{\text{вх}X_3}(0)}{Ko} = a_3
\end{aligned}$$

Значення коефіцієнтів знаменника формуючого фільтру моделі послідовно змінюються на ідентифіковані значення коефіцієнтів передавальної функції об'єкта $a_1, a_2 \dots a_{n-1}$ для знаходження нових значень коефіцієнтів a_n . В автоматичному режимі роботи ідентифіковані раніше значення коефіцієнтів об'єкта повинні запам'ятовуватися і вводиться у формуючий фільтр, змінюючи його структуру та порядок, для обчислення значення величини наступного коефіцієнта об'єкта. Після ідентифікації необхідних значень коефіцієнтів передавальної функції об'єкта $a_1, a_2 \dots a_n$ процес ідентифікації повторюється послідовно у кожному циклі перехідних процесів системи керування. Підключення об'єкта до відповідних входів-виходів формуючих фільтрів пристрою ідентифікації здійснюється логічним пристроєм. Як впливає з виразів (4), (5) значення постійних часу не адаптивних фільтрів не залежать від характеристик перешкод, що вимагає попереднього налаштування фільтрів на певний спектр перешкод, а при його зміні може призвести до значного зниження точності вимірювання параметрів об'єкта, що досліджується. Так як частотний спектр перешкод у вхідному та вихідному сигналах вимірюваного об'єкта завжди різний, то при встановленні адаптивних та керованих фільтрів їх постійні часу будуть

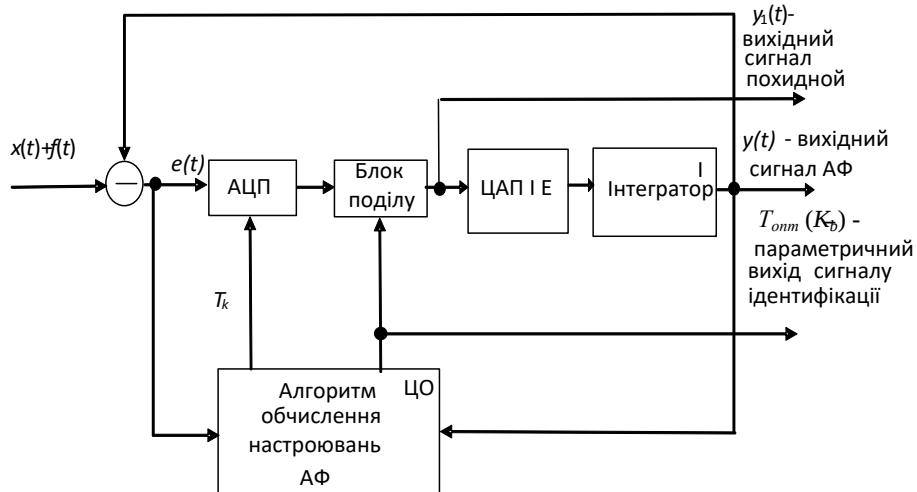
Розділивши $X_{\text{вх}X_3}(s)$ на отримане значення коефіцієнта Ko і три рази про інтегрувавши отримаємо значення коефіцієнта a_3 на виході ідентифікатора $X_{\text{вх}X_3}(0)$:

встановлюватися автоматично без попереднього налаштування, і при зміні амплітудних та частотних характеристик перешкод у вхідному та вихідному сигналах об'єкта $a_{\phi_1} = a_{\phi_2}, a_{\phi_3} = a_{\phi_4}$ і, отже, пристрій стає працездатним.

Аналіз стійкості цифрового адаптивного фільтра. Структурна схема відомої обчислювальної цифро-аналогової імітаційної моделі АФ, синтез якої проведено у роботах [16-19], наведено на рис.5. АФ [16-19] включає інтегратор, вихід якого є адаптивним виходом пристрою, на якому формується відфільтрований сигнал, блок поділу, вихід якого є другим виходом пристрою, на якому формується сигнал, зворотно-пропорційний постійної еквівалентної часу адаптивного фільтра. Еквівалентна постійна часу АФ змінюється таким чином, щоб забезпечити ефективне придушення перешкоди при мінімальних амплітудних і фазових спотвореннях корисного сигналу.

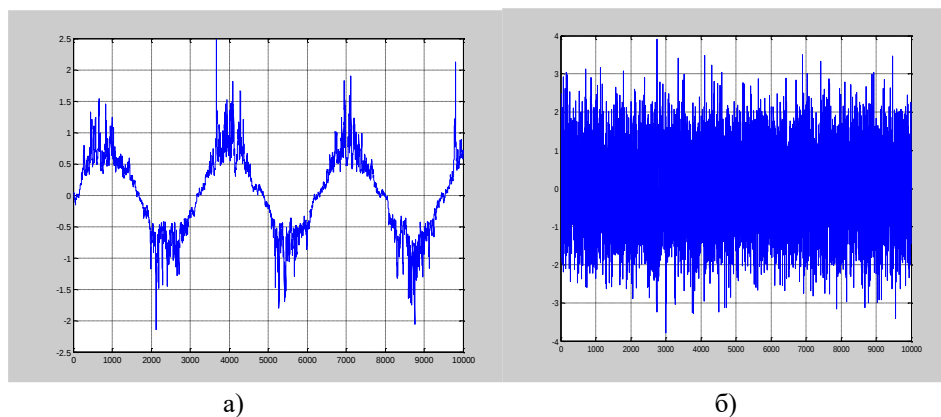
При моделюванні перешкод замість генератора шуму може використовуватися генератор високої частоти $\omega \gg \omega_\beta$, а при моделюванні корисного випадкового сигналу - аперіодичний фільтр, що відбілює сигнал.

Результати моделювання на програмній моделі адаптивного цифрового фільтра наведено на рис. 6.



АЦП – аналого-цифровий перетворювач, ЦО – цифровий обчислювач, ЦАП і Е – цифро-аналоговий перетворювач та екстраполятор з передавальною функцією $W_e(s)$, І – інтегратор із передавальною функцією $K(s)$, T_k – період квантування (дискредитації), K_b – коефіцієнт адаптації.

Рисунок 5 - Структурна блок-схема обчислювальної цифро-аналогової імітаційної моделі АФ



а) Вихідний сигнал фільтру с завадою $\text{filter_out} \pm E(N1,1)$, б) Сигнал завад F на вході фільтру.

Рисунок 6- Результати моделювання АФ

В m-файлі програмної S-моделі АФ використовувалися наступні формули:

$m_ham=1.0$; Амплітуда вхідного сигналу фільтра;

$m_xch=2.0$; Частота вхідного сигналу фільтра;

$n=0:0.001:9.999$; $m_t=0.001$; $m_mod=10.0$; $m_ti=0.01$;

$m_d=0.1$; $m_m=1.0$; $NI=m_mod/m_t$;

$E(N1,1)=X(N1,1)-\text{filter_out}(N1-1,1)+F(N1,1)$;

$EA(N1,1)=E(N1,1)*E(N1,1)$;

$ED(N1,1)=EA(N1,1)+m_d$;

$YA(N1,1)=\text{filter_out}(N1-1,1)^2+m_d$;

$Y1(N1,1)=E(N1,1)*YA(N1,1)/(ED(N1,1))$;

$Kb(N1,1)=YA(N1,1)/(m_d+ED(N1,1))$;

$\text{filter_out}(N1,1)=(0.5*m_t/m_ti)*(Y1(N1,1)+Y1(N1-1,1))+\text{filter_out}(N1-1,1)$.

Результати моделювання наступні:

Вхідний сигнал $X=1 \sin(m_xch*n)$.

Вхідний сигнал завад $F(N1,1)=\pm 3.5*\sqrt{(-2)*\log(A)}.*\cos(2*\pi*B)$, де $A=\text{rand}(NI,1)$, $B=\text{rand}(NI,1)$.

Вихідний сигнал Y_c задавою

$$\text{filter_out} \pm E(N1,1) = 1 \pm (0.1 \pm 1.5) \sin(m_xch * n),$$
 тобто
 рівень завод 3.5 змінюється при зміні амплітуди
 сигналу від 0.1 до 1.5.

Вихідний сигнал змін коефіцієнта адаптації
Kb від 2.3 до 35.

Структурну схему обчислювальної цифро-аналогової імітаційної моделі керованого фільтра [1] наведено на рис.7.

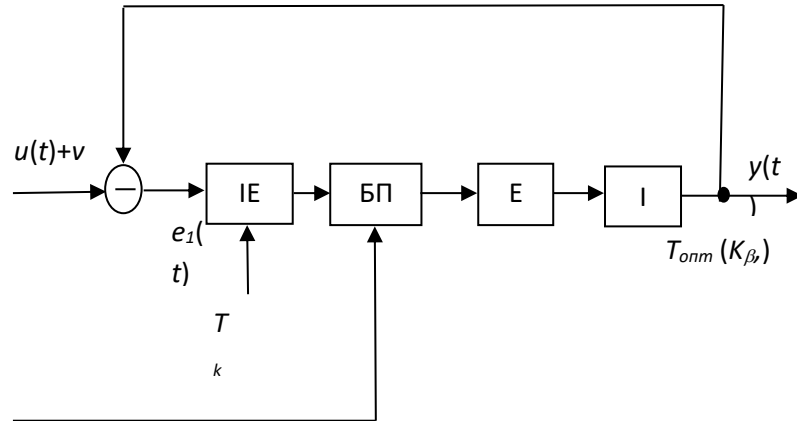


Рисунок 7 – Структурна схема обчислювальної цифро-аналогової імітаційної моделі керованого фільтра.

ІЕ-імпульсний елемент, БП – блок подибу, Е-екстраполятор, І-інтегратор

Передатна функція АФ каналом $x \rightarrow y$ дорівнює

$$W_{\phi 2}(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{1}{T_{onm}s+1}, \quad (15)$$

де

$$T_{onm} \approx \frac{T_\beta}{K_b} \approx \frac{T_\beta \sqrt{Q}}{\sqrt{R}} = a_{\phi 2} \quad (16)$$

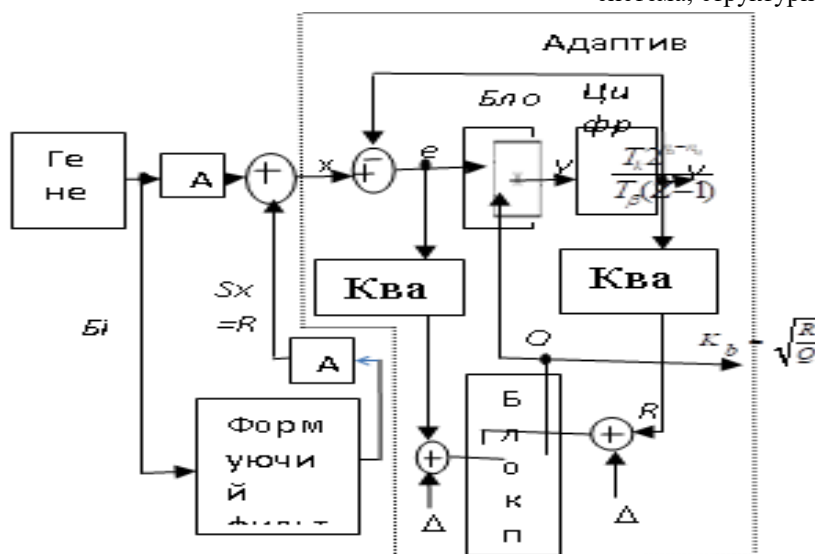
оптимальне значення постійного часу фільтра,

T_β - необхідна постійна часу фільтра за корисним сигналом,

K_b - коефіцієнт адаптації,

Q і R – поточні значення рівнів спектральних густин перешкоди та корисного сигналів, відповідно.

При переході до цифрових аналогів ланок структурних елементів фільтрів моделі навіть структурно стійкі ланки першого порядку можуть втрачати стійкість за певних співвідношеннях параметрів цих ланок і періодом дискретизації. Відповідно до [18, 19] для реалізації цифро-аналогової імітаційної моделі АФ може бути використана система, структурна схема якої наведена на рис. 8.



БП – блок поділу; І – інтегратор; БМ – блок множення; Δ - мала величина, що вводиться в дільник для виключення поділу на нуль.

Рисунок 8 - Структурна схема цифровааналогової імітаційної моделі цифрового АФ

Отже, для стійкості цифрового АФ необхідно,

$$\text{щоб постійні часу } T_\beta, T_{\text{опт}} \approx \frac{T_\beta}{K_\beta} \approx \frac{T_\beta \sqrt{Q+\Delta}}{\sqrt{R+\Delta}} = a_{\phi 2},$$

Вихідний сигнал блоку поділу дорівнює поточному значенню K_b коефіцієнта адаптації і може бути використаний для автопідстроювання параметрів налаштування цифрових регуляторів за зміни оптимального значення постійного часу АФ. Послідовним з'єднанням адаптивних фільтрів може бути реалізована структура АФ вищого порядку.

Передаточна функція розімкнутого фільтра з функцією передавання $K(s)$ з екстраполятором $We(s)$ має вигляд:

$$W_p(s) = W_e(s)K(s) = \frac{1-e^{-st}}{s} \cdot \frac{1}{T_{\text{онм}}s}, \quad (17)$$

де n_a і n_u - розрядності перетворювачів АЦП та ЦАП, $K_{a-u} = 2^{n_a-n_u}$ - підсумковий статичний коефіцієнт передачі перетворювачів АЦП та ЦАП.

Z-перетворення цієї передавальної функції має вигляд

$$W_p(Z) = \frac{T_k}{T_{\text{онм}}(Z-1)}. \quad (18)$$

Z-передаточна функція замкнутого контуру (суматор, блок множення, інтегратор) цифрово-аналогової імітаційної моделі цифрового АФ має вигляд

$$H(Z) = \frac{T_k 2^{n_a-n_u}}{T_{\text{онм}} \left(Z - 1 + \frac{T_k 2^{n_a-n_u}}{T_{\text{онм}}} \right)} = \frac{A(Z)}{B(Z)}. \quad (19)$$

Для аналізу стійкості розглянемо характеристичне рівняння замкнутого контуру (19)

$$B(Z) = Z - 1 + \frac{T_k 2^{n_a-n_u}}{T_{\text{онм}}} = 0. \quad (20)$$

Застосувавши до цього рівняння білінійне перетворення, отримаємо

$$B(W) = \frac{1+W}{1-W} - 1 + \frac{T_k 2^{n_a-n_u}}{T_{\text{онм}}} = 0$$

та

$$\frac{T_k 2^{n_a-n_u}}{T_{\text{онм}}} W + 2 - \frac{T_k 2^{n_a-n_u}}{T_{\text{онм}}} = 0. \quad (21)$$

За критерієм Гурвіца ця система стійка, якщо виконується умова позитивності коефіцієнтів $d_0 > 0$ і $d_1 > 0$,

$$\text{де } d_0 = \frac{T_k 2^{n_a-n_u}}{T_{\text{опт}}}, \text{ а } d_1 = 2 - \frac{T_k 2^{n_a-n_u}}{T_{\text{опт}}}, \text{ тобто } 0 < \frac{T_k 2^{n_a-n_u}}{T_{\text{онм}}} < 2.$$

коефіцієнт адаптації $K_b = \sqrt{\frac{R+\Delta}{Q+\Delta}}$, та T_k перебували у таких межах

$$0 < \frac{1}{T_{onm}} < \frac{2}{T_k 2^{n_a - n_u}}$$

або

$$0 < K_\beta < \frac{2^{n_u - n_a + 1} T_\beta}{T_k} \quad (22)$$

При прагненні до нуля складової оцінки дисперсії за корисним сигналом ($Q \rightarrow 0$), ця нерівність може бути порушена, і в цьому випадку в адаптивному фільтрі виникнуть нестійкі коливання, що розходяться. Для їх усунення необхідно до велич R і Q додати константу Δ малої величини, що обмежує діапазон адаптації коефіцієнта $K_b = \sqrt{\frac{R+\Delta}{Q+\Delta}}$ при заданому

відношенні $\frac{2^{n_u - n_a + 1} T_\beta}{T_k}$ з урахуванням розрядності перетворювачів АЦП і ЦАП.

Аналіз системи ідентифікації. Приклад моделювання системи ідентифікації об'єкта, що досліджується, з передатною функцією третього порядку має вигляд

$$W_o(s) = \frac{3}{6s^3 + 10s^2 + 5s + 1}.$$

Для спрощення розглянемо схему прикладу без логічного пристрою, підключивши моделі об'єкта безпосередньо до відповідних входів 1, 2, 3, 4 та виходів 1, 2, 3, 4 формуючих фільтрів системи ідентифікації

Комп'ютерна модель запропонованої системи ідентифікації та її структурних елементів, а також графіки перехідних процесів ідентифікації параметрів K_0 , a_1 , a_2 , a_3 , інерційного об'єкта наведено на рис.9.

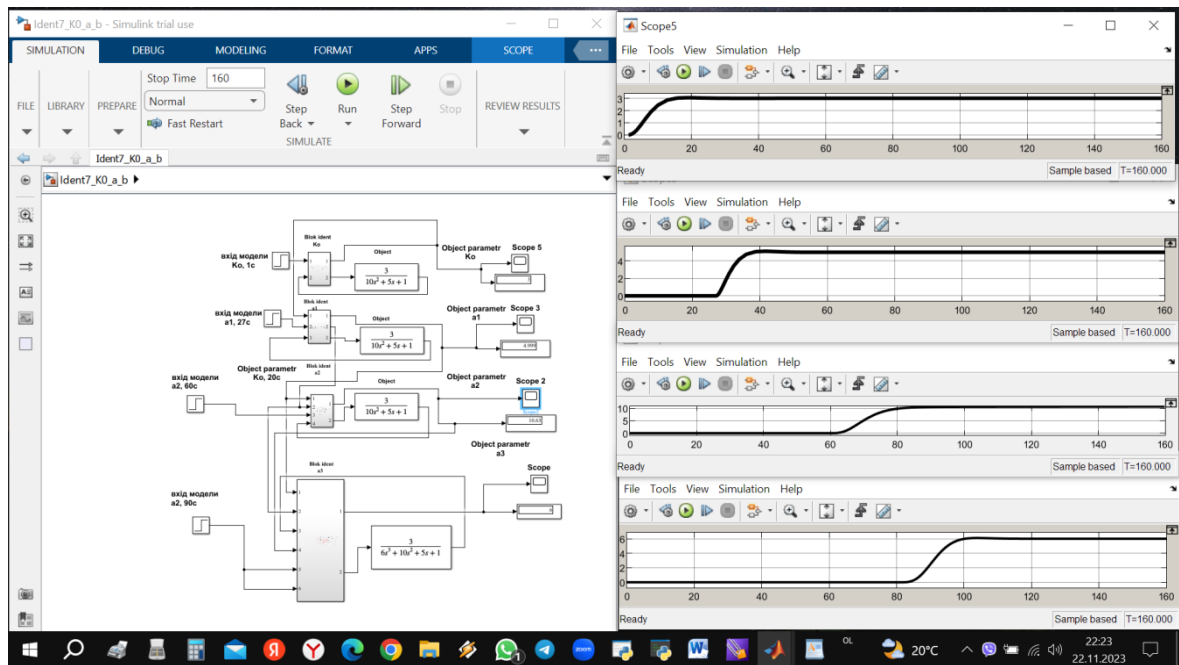


Рисунок 9 – Комп'ютерна модель системи ідентифікації

Комп'ютерна модель системи ідентифікації статичного коефіцієнта посилення K_0 методом поділу вихідних сигналів об'єкта $W_o(s) = \frac{10}{20s^2 + 9s + 1}$ і моделі

пропущених через адаптивний і керований фільтри (або фільтри з однаковими постійними часу) для об'єкта, що підключається до входу 1 і виходу 1 системи ідентифікації надана на рис.10.

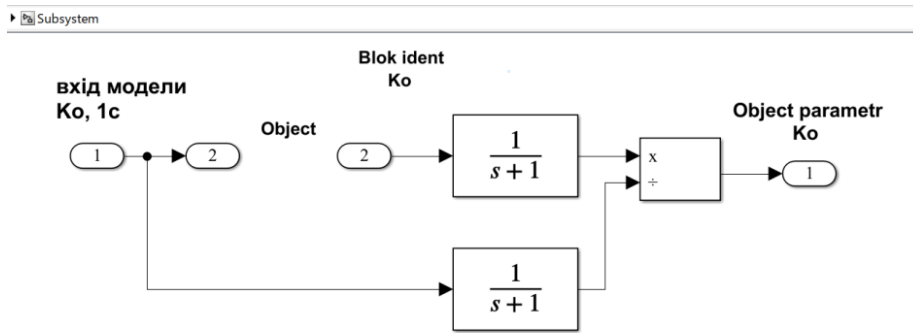


Рисунок 10 – Комп'ютерна модель системи ідентифікації статичного коефіцієнта посилення K_0 методом поділу вихідних сигналів об'єкта і моделі пропущених через адаптивний і керований фільтри (або фільтри з однаковими постійними часу) для об'єкта, що підключається до входу 1 і виходу 1 системи ідентифікації

Комп'ютерна модель системи ідентифікації статичного коефіцієнта посилення K_0 для об'єкту

$W_o(s) = \frac{10}{20s^2 + 9s + 1}$ методом мінімізації помилки вихідних сигналів об'єкта і моделі надана на рис.11.

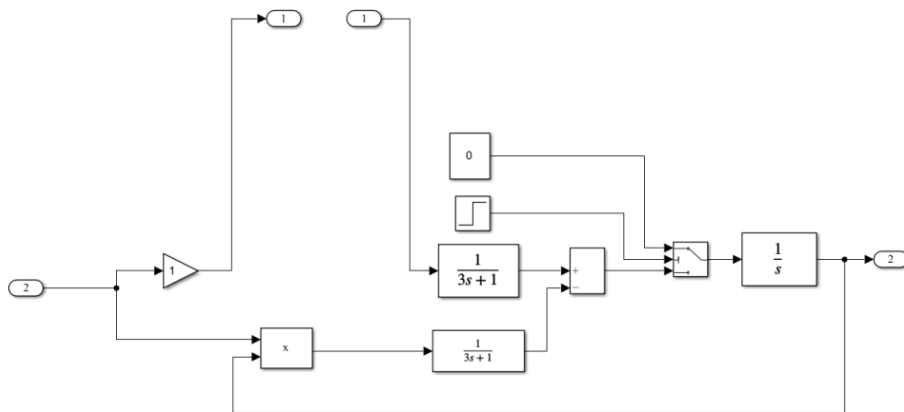


Рисунок 11 – Комп'ютерна модель системи ідентифікації статичного коефіцієнта посилення K_0 методом мінімізації помилки вихідних сигналів об'єкта і моделі

Сигнали пропущені через адаптивний і керований фільтри (або фільтри з однаковими постійними часу). Об'єкт підключається до входу 1 і виходу 1 системи ідентифікації. До входу 2 подається сигнал ідентифікації (вхід об'єкту), а на виході 2 формується значення коефіцієнта посилення K_0 .

Графік установки K_0 для об'єкта $W_o(s) = \frac{10}{20s^2 + 9s + 1}$ надано на рис.12. Комп'ютерну модель логічного пристрою підключення об'єкта до системи ідентифікації наведено на рис.13.

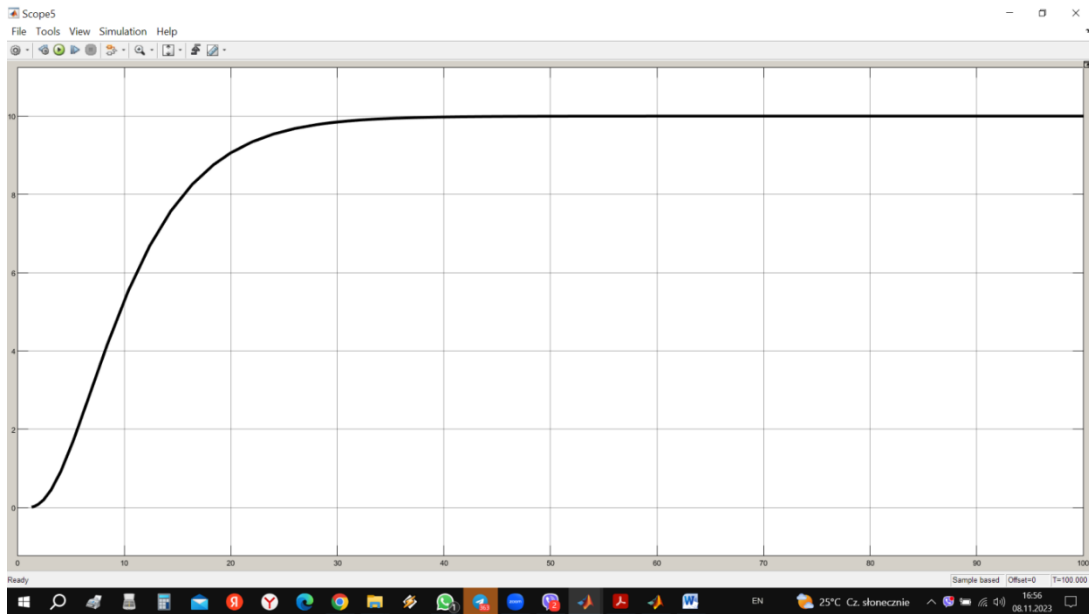
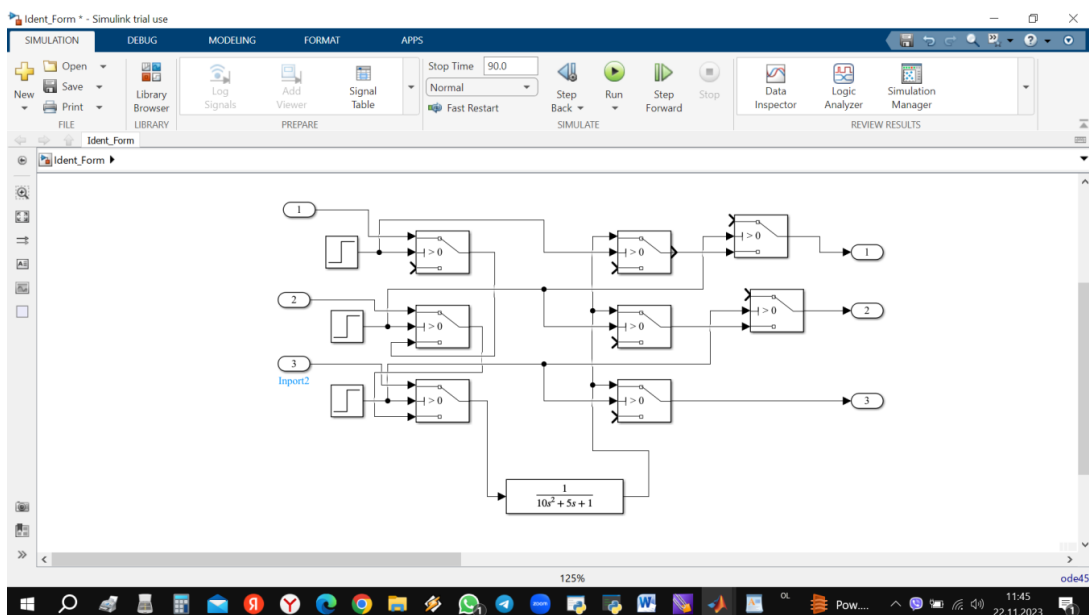
Рисунок 12– Графік установки K_0 

Рисунок 13 – Комп'ютерна модель логічного пристрою підключення об'єкта до системи ідентифікації

Висновки

Удосконалено моделі структурно-параметричної (за запропонованою процедурою) ідентифікації структури та усіх, на відміну від відомих моделей, параметрів складного РО і побудови адаптивних систем керування для корекції поточних параметрів налаштування регуляторів параметрами ідентифікації.

Параметричний вихід АФ можна використовувати при автоматичному коригуванні параметрів керованого фільтра для забезпечення ідентифікації всіх статичних та динамічних параметрів об'єкта.

Показано, що параметричний вихід адаптивного цифрового фільтра можна використовувати при автоматичному коригуванні параметрів регулятора в контурі регулювання системи керування в

обмеженому діапазоні змін амплітудних і частотних характеристик корисного сигналу та перешкод в діапазоні адаптації коефіцієнта адаптації $K_b = \sqrt{\frac{R+\Delta}{Q+\Delta}}$ при заданому співвідношенні $\frac{2T_\beta}{T_k}$, що розширює сферу застосування запропонованого методу ідентифікації.

Перспективою подальших розробок у цій галузі є:

реалізація програмних цифрових моделей ідентифікації для корекції параметрів налаштування цифрових регуляторів параметрами ідентифікації,

реалізація станцій керування регуляторами з можливістю без ударного програмного введення вхідних сигналів ідентифікації в об'єкт у ручному та автоматичному режимах роботи системи керування.

Література

1. Сытник Б.Т. Метод идентификации параметров инерционных объектов /, Б.Т.Сытник, В.А.Брыксин, В.С. Михайленко, А.А.Пархоменко// Научно-технический журнал "Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті". – 2013. – №5. – С.56-61.[Електронний ресурс]: – Режим доступу: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=33934
2. Сытник Б.Т. Структурно-параметрическая идентификация в адаптивных системах управления движением поездов / Б. Т. Сытник, М. С. Курцев, В. С. Михайленко // Информационно управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2014. – № 3. – С. 17-21. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt_2014_3_4
3. Лазарян В.А. Динамика транспортных средств. Избранные труды / В.А. Лазарян. - К.: Наукова думка, 1985. - 528 с.
4. Загарий Г.И., Шубладзе А.М. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 104с.
5. Marco Dal Pino. Управление дронами с помощью приложений для распознавания речи на основе Intel Real Sense SDK [Електронний ресурс]: – Режим доступа: <https://habr.com/company/intel/blog/273083>
6. Собственный рой беспилотников – возможно ли? [Електронний ресурс]: – Режим доступу : <http://robotrends.ru/pub/1603/sobstvennyy-roy-bespilotnikov-vozmozno-li>
7. Роботизированные комплексы и системы [Електронний ресурс]: – Режим доступа: <http://ds-robotics.ru/sections/informacziya/robotizirovannyye-kompleksyi-i-sistemyi.html>
8. Метод коллективного управления группой роботов [Електронний ресурс]:– Режим доступа: <http://www.studmedlib.ru/ru/doc/ISBN9785922111416-SCN0004.html>
9. Як дрони можуть змінити майбутнє залізничної галузі. Підвищення ефективності і зменшення операційних витрат залізниць. Безпілотники можуть швидко в цьому допомогти.Режимдоступу:[Електронний ресурс] https://cfts.org.ua/blogs/yak_droni_mozhut_zminiti_maybutne_zaliznichno_galuzi_292
10. Ситнік Б.Т. Комп'ютерні системи керування: Навч. посібник. – Ч1.– Моделювання систем. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 182 с.
11. Ситнік Б.Т. Комп'ютерні системи керування: Навч. посібник. – Ч.2 – Цифрові комп'ютерні системи керування – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 141 с.
12. Адаптивные системы идентификации / Кикун А.Г., Костюк В.И., Краскевич В.Е., Сильвестров А.Н., Шпит С.В.-К.:Техніка,1975.-288с.
13. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов / А.М.Дейч. - М.: Энергия.1979.-240с.
14. Растрин Р.А. Введение в идентификацию объектов управления / Р.А.Растрин, Н.Е.Маджаров.- М.: Энергия, 1977.-216с.
15. Марков С.И. Идентификация параметров колебательных систем автоматического регулирования / Марков С.И., Минаев В.М., Артамонов Б.Н. – Л.: Энергия.1975.- 96с.
16. Устройство для измерения параметров инерционных звеньев. Устройство для измерения параметров инерционных звеньев. Авторское свидетельство СССР №1209538. Бюл. изобр. 1984.
17. Гусев П.В., Загарий Г.И., Сытник Б.Т. Устройство для измерения параметров инерционных звеньев. Авторское свидетельство СССР №1783478. Бюл. изобр. №47, 1992.

18. Ситник Б.Т., Ситник В.Б. Синтез структуры и моделирование адаптивных цифровых фильтров и систем управления с нестационарными характеристиками. Часть 1 // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2003. – №6. – С.18 – 24.

19. Ситник Б.Т., Ситник В.Б., Яцько С.И. Синтез структуры и моделирование адаптивных цифровых фильтров и систем управления с нестационарными характеристиками. Часть 2. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – № 1. – С. 62 – 66.

20. Гусев П.В., Загарий Г.И., Ситник Б.Т. Адаптивный фильтр. Патент України 11427, Бюл. № 14, 1996.

21. Ситник В.Б. Адаптивная фильтрация и дифференцирование сигналов в системах автоматического управления [Текст]/В.Б.Ситник// Науково-технічний журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті". – 2012. – №4. – С.42-46.

22. Авт. свідоцтво № 47196, реєстр. 14.01.2013, МОН України, Державний департамент інтелектуальної власності. Комп'ютерна програма "Адаптивний профіль диференціатор-ідентифікатор" ("The adaptive profile differentiator-identifier") /В.Б. Ситник; заявка від 13.11.2012 № 47499.

23. Ситнік Б. Т. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Частина 1. Структура автоматичної системи нечіткого задання графіка швидкості руху рухомого об'єкта з її корекцією за фактичними параметрами проїзду/Ситнік Б. Т., Бриксін В. О., Ломотько Д. В., Ситник В. В., Давидов І. В.//Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: 2021. – №4. – С.24–35. – Режим доступу: <https://doi.org/10.18664/iksz.v26i4.247235>

24. Ситнік Б. Т. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Частина 2. Аналіз способів керування швидкістю поїзда з тяговими двигунами постійного та змінного струму/Ситнік Б. Т., Бриксін В. О., Давидов І. В.//Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: 2022. – №1. – С.3–18.- <https://doi.org/10.18664/iksz.v27i1.254087>

25. Ситнік Б. Т. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією

швидкості за фактичними параметрами прямування
Частина 3. Синтез структури і моделювання адаптивних цифрових регуляторів корекції швидкості руху високошвидкісних поїздів із заданими ПД-законами формування імпульсних управлінь/Ситнік Б. Т., Бриксін В. О., Давидов І. В.//Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: 2022. – №.3 – С.35–48.- DOI: 10.18664/iksz.v27i3.265542. Режим доступу: <http://jiks.kart.edu.ua/issue/view/15894>, <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11256>

26. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах.-М.: Наука, 1968.- 400с.

27. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А.Пегат.- М.: Бином, 2009. – 798 с.

28. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.

29. Крутько П.Д. Вариационные методы синтеза систем с цифровыми регуляторами.- :М.:Советское радио, 1967. – 439с.

30. Мірошник А.М. Структурно-параметрична індексна ідентифікація в адаптивних системах управління рухомими об'єктами / Б. Т. Ситнік, Мірошник А.М. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2023. – № 4. – С.64-70. – Режим доступу: <http://jiks.kart.edu.ua/article/view/296396>

Ключові слова: структурно-параметрична ідентифікація, адаптивна система керування, високошвидкісний рух, формуючий фільтр.

Качанов П. О., Ситнік Б. Т., Мірошник А. М., Удосконалення моделі та методу структурної ідентифікації параметрів інерційних об'єктів. Удосконалено модель ідентифікації структури й параметрів складного рухомого об'єкта рейкового транспорту для побудови адаптивних систем керування з корекцією параметрів налаштування регуляторів. Показано, що параметричний вихід адаптивного цифрового фільтра можна використовувати як при автоматичному коригуванні параметрів керованого фільтра так і при автоматичному коригуванні параметрів регулятора в контурі регулювання системи керування в

обмеженому діапазоні змін коефіцієнта адаптації, що розширює сферу застосування запропонованого методу ідентифікації. Значення коефіцієнтів знаменника формуючого фільтру моделі послідовно змінюються на ідентифіковані значення коефіцієнтів передавальної функції об'єкта $a_1, a_2 \dots a_{n-1}$ для знаходження нових значень коефіцієнтів a_n . В автоматичному режимі роботи ідентифіковані раніше значення коефіцієнтів об'єкта повинні запам'ятовуватися і вводиться у формуючий фільтр, змінюючи його структуру та порядок, для обчислення значення величини наступного коефіцієнта об'єкта. Після ідентифікації необхідних значень коефіцієнтів передавальної функції об'єкта $a_1, a_2 \dots a_n$ процес ідентифікації повторюється послідовно у кожному циклі перехідних процесів системи керування. Підключення об'єкта до відповідних входів-виходів формуючих фільтрів пристрою ідентифікації здійснюється логічним пристроєм.

Kachanov P. O., Sytnik B., Miroshnyk A.
Improved model and method of structural identification of parameters of inertial objects. Models for identification of parameters and structure of a complex dynamic moving object (MO) have been improved for the construction of adaptive control systems (ACS) for correcting the parameters of regulator settings.

It is shown that the parametric output of the adaptive digital filter can be used both for the automatic adjustment of the parameters of the controlled filter and for the automatic adjustment of the controller parameters in the regulation circuit of the control system in a limited range of changes in the adaptation coefficient, which expands the scope of the proposed identification method. The values of the coefficients of the denominator of the forming filter of the model are successively changed to the identified values of the coefficients of the transfer function of the object $a_1, a_2 \dots a_{n-1}$ to find new values of the coefficients a_n . In the automatic mode of operation, previously identified values of the coefficients of the object must be remembered and entered into the forming filter, changing its structure and order, to calculate the value of the next coefficient of the object. After identifying the necessary values of the transfer function coefficients of the object $a_1, a_2 \dots a_n$, the identification process is repeated sequentially in each cycle of transient processes of the control system. The connection of the object to the corresponding inputs-outputs of the forming filters of the identification device is carried out by a logical device.

Keywords: structural-parametric identification, adaptive control system, high-speed motion, shaping filter
 Рецензент д.т.н., професор
 (УкрДУЗТ)
 Надійшло

Качанов Петро Олексійович, д.т.н., професор, професор ЗВО кафедри автоматики і управління в технічних системах Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет»,

e-mail: petro.kachanov@khpi.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-7532-5913>

Ситнік Борис Тимфійович, кандидат технічних наук, доцент, м. Харків, Україна. E-mail: bts12021947@gmail.com <http://orcid.org/0000-0002-9664-5617>

Мірошник Анатолій Миколайович, аспірант кафедри «Автоматика та керування у технічних системах, АУТС», НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна.

e-mail: anatolii.miroshnyk@nure.ua
<https://orcid.org/0000-0001-5702-9611>

Kachanov Petro Oleksiiiovych, doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Higher Education automation and control in technical systems of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic University"

e-mail: petro.kachanov@khpi.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-7532-5913>

Sytnik Borys, Ph.D., associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. e-mail: bts12021947@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9664-5617>

Miroshnyk Anatolii, graduate student of the department "Automation and control in technical systems, ACTS", NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine.

e-mail: anatolii.miroshnyk@nure.ua
<https://orcid.org/0000-0001-5702-9611>

УДК 681.31

DOI: 10.18664/ikszt.v29i1.300988

МІРОШНИК М. А., д.т.н., професор, професор кафедри теоретичної та прикладної системотехніки, Харківський Національний Університет імені В. Н. Каразіна,

ПАХОМОВ Ю. В., к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,

ПШЕНИЧНИЙ К. Ю., аспірант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки,

ШАФРАНСЬКИЙ А. В., аспірант кафедри теоретичної та прикладної системотехніки, Харківський Національний Університет імені В. Н. Каразіна

Асерційна верифікація моделей пристроїв реального часу з недетермінованими зовнішніми подіями

Представив д.т.н., професор Приходько С.І.

Запропоновано метод верифікації моделей пристроїв реального часу з обробкою зовнішніх подій із недетермінованою тривалістю, що описані з використанням мов опису апаратури (Hardware Description Language, HDL). У методології використано апарат асерцій для опису темпоральної природи вищезазначених моделей.

Ключові слова: автоматизація проектування, моделювання, верифікація, системи реального часу, події, темпоральний граф переходів.

Вступ

Логічні системи керування є важливим елементом будь-якої цифрової системи. Такі системи використовують двійковий алфавіт для визначення поведінки блока керування. Відомо, що шаблон кінцевого автомата (Finite State Machine, FSM) є популярною моделлю для таких систем. Слід зазначити, що кінцевий автомат є математичною абстракцією, яку можна подати різними способами, такими як таблиця переходів станів, діаграма станів (граф переходів), граф-схема алгоритму тощо. При використанні шаблону автомата важливо розуміти, що поведінка цільової системи залежить від подій, які відбуваються в зовнішньому середовищі. У кінцевому автоматі події використовуються для моделювання певних зовнішніх дій, які викликають переходи з одного стану в інший. До подій належать сигнали, виклики, певний проміжок часу або зміна стану. Події можуть бути синхронними чи асинхронними; їх вираження у кінцевій моделі – одна з ключових частин процесу проектування. Окрім того, існує клас

пристроїв, логіка яких залежить не тільки від часу, у який надходять ці події, але і часових характеристик цих подій. Прикладом такої події є затискання кнопки, що призводить до вимикання пристрою.

Відомо, що верифікація цифрових дизайнів, розроблених на базі Application-Specific Integrated Circuit (ASIC), Field Programmable Gate Array (FPGA), System on Chip (SoC) займає до 70 % загального часу проектування [1]. Як результат, до 80 % кодової бази цифрового дизайну займає код тестування (testbench). Зменшення цих двох параметрів зменшує час випуску пристрою на ринку (time-to-market) і є одним із головних завдань галузі автоматизації проектування обчислювальної техніки.

Аналіз наявних рішень

У роботі [4] розглянуто узагальнену модель часового автомата з тайм-аутами і часовими обмеженнями та вихідними затримками. Узагальнена модель структурного темпорального керуючого автомата $Y(t) = g(X(t), Z(t), T)$, $Z(t+1) = f(X(t), Z(t), T)$, де X – множина вхідних сигналів, Z – множина

внутрішніх змінних, яка визначає стан автомата, Y – множина вихідних сигналів, t – машинний час, що визначається в автоматичних тактах, d – функція виходів, f – функція переходів структурного автомата. $T = \{T_c, T_o, T_d\}$ є множиною часових параметрів автомата, де t_c – часові обмеження, t_o – вхідні тайм-аути, t_d – вихідні затримки.

Модель автомата реального часу є способом опису систем реального часу, який був введений у роботі [2]. Графова модель автомата доповнюється дискретною множиною таймерів, що набувають натуральних значень. Як і в класичного графа, вершини називаються «станами», а дуги «переходами». Кожен таймер обнуляється в момент переходу і збільшується з кожним тактом автомата. З кожним переходом пов'язано часове обмеження (clock constraint), що вказує, що перехід можливий лише в тому випадку, якщо поточні значення таймера відповідають заданому обмеженню. Кожна позиція також пов'язана з обмеженнями таймерів – інваріантами; система може перебувати в цій позиції до тих пір, поки виконується її інваріант.

Питання моделювання та верифікації цифрових дискретних подієвих систем розглядається в роботі [3], де введено зв'язок між методологією Event-B і автоматизованим моделюванням. Цей документ важливий для верифікації моделей на основі автоматів.

У роботі [4] подано спосіб підвищення якості верифікації часових автоматів шляхом вираження часових переходів за допомогою розширення автоматного шаблону додатковими асерційними конструкціями мовою System Verilog Assertions (SVA). Показано, як такий підхід скорочує час пошуку помилки оператора в SystemVerilog коді.

У роботі [5] розглянуто питання логічних систем з обробкою зовнішніх подій із мінімальною тривалістю, запропоновано новий вид переходу, який враховує не тільки зовнішню подію, але і її тривалість. Технічно це реалізується за допомогою додаткового таймера. Розглянуто різні варіанти поведінки автомата залежно від тривалості зовнішньої події.

У роботі [6] розглянуто принципи побудови систем верифікації та вбудованої самодіагностики систем на кристалі (SoC), що містять систему обробки PS (processing system) і програмовану логіку PL (programmable logic). Реалізація моделі пристрою керування світлофором виконана мовою програмування C з використанням стека інструментальних засобів САПР Vivado/Vitis/Vitis HLS. Неруйнівний діагностичний експеримент також реалізується за допомогою мови C шляхом повного обходу всіх можливих дуг графа, який описує систему логічного керування.

Мета дослідження

Метою дослідження є зменшення часу верифікації за рахунок введення надлишковості у HDL-модель пристрою реального часу з обробкою недетермінованих зовнішніх подій – механізму асерцій [7-10], який дає змогу явно виражати характеристики дизайну та аналізувати помилки HDL-коду під час моделювання.

Постановка задачі

Розробити модель вираження темпоральних властивостей моделей пристроїв реального часу з недетермінованими зовнішніми подіями шляхом розширення HDL-опису пристрою асерційними конструкціями.

Основний матеріал

Візуальним описом моделі часового автомата і його повною математичною моделлю є темпоральний граф переходів. Такий граф розширюється таймером, який реалізує затримки у станах. Таймер використовується для перебування у стані впродовж певної кількості тактів синхросигналу. На рис. 1 наведено приклад автомата з часовими переходами.

Як уже було зазначено, існує категорія пристроїв, які відрізняються реакцією на події, що тривають у часі. Для цієї групи пристроїв важливі часові параметри зовнішньої події. Часові обмеження події – це значення $t_c(X(i)) = [c1]$, що вказує на мінімальний час тривалості певного вхідного сигналу. У прикладі з кнопкою блокування мобільного телефону $t_c = 3$ (для зручності значення подано в секундах). Це обмеження виражено на темпоральному графі у формі переходу. При визначенні цього переходу необхідно враховувати значення таймера зі значенням $t_c(X(i))$.

На рис. 2 наведено приклад такого переходу. Як і у випадку темпорального переходу, в умові береться до уваги стан таймера. Головною відмінністю є те, що таймер тепер має нижню границю, тобто для успішної зміни стану $a2/a3$ необхідно, аби сигнал події $evnt$ був активним (набував значення високого рівня, тобто '1') і таймер більшим за значення $t_c(evnt)$.

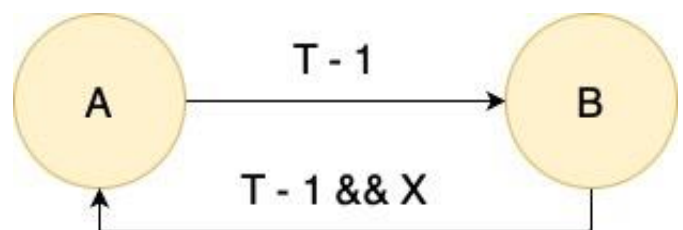


Рис. 1. Приклад темпорального графа переходів

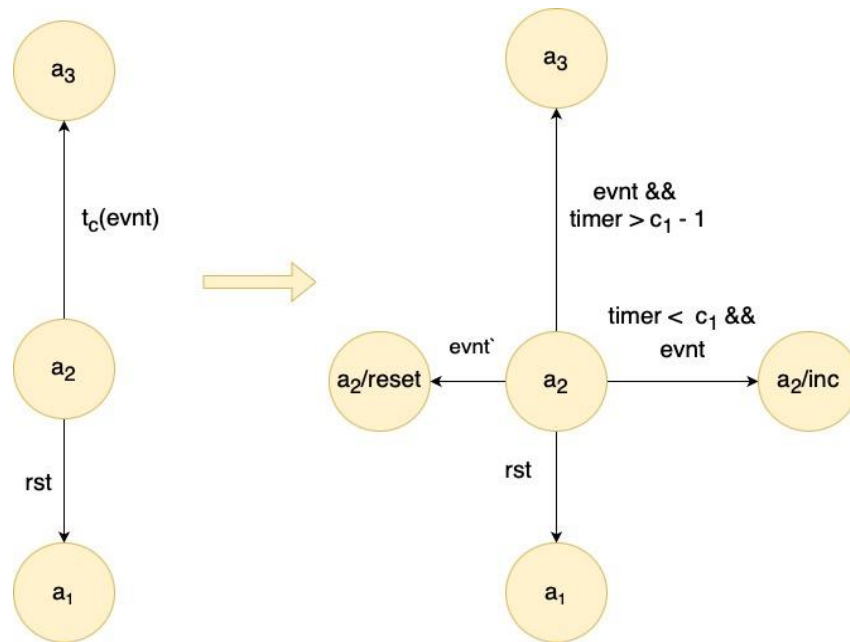


Рис. 2. Приклад темпорального графа переходів із зовнішньою подією з мінімальною тривалістю

У роботі [5] розглянуто різні випадки тривалості події та відповідні реакції автомата на них: 1) зовнішня подія триває рівно стільки часу, скільки вказано у специфікації; 2) зовнішня подія триває менше необхідного часу; 3) зовнішня подія триває більше необхідного часу; 4) зовнішня подія не відбувається. Очевидно, що HDL-опис має враховувати всі можливі сценарії. Окрім того, ці поведінки мають бути покритими тестовими сценаріями *testbench* у процесі верифікації.

Для ілюстрації запропонованих методів будемо використовувати модель модуля збереження енергії. Модуль працює у двох режимах: стандартному і енергозбереження. Вхідний алфавіт складається з двійкових сигналів $X = \{onn, evnt\}$, де *onn* – сигнал для вмикання алгоритму енергозбереження, *evnt* – сигнал сповіщення про те, що сталася зовнішня подія, і система має вийти з режиму енергозбереження. Вихідні двійкові сигнали налаштовані так: $Y = \{save\}$, де *save* означає вхід у режим енергозбереження.

Виділимо стани автомата, що описує функціональність модуля:

- стан a_1 – модуль працює в режимі обходу, тобто зовнішні події не відстежуються;
- стан a_2 – розрахунок режиму енергозбереження: якщо протягом фіксованого часу не відбувається жодних подій, автомат переходить у стан a_3 ;
- стан a_3 – режим енергозбереження.

Алгоритм роботи модуля збереження енергії досить простий. Щоразу, коли цей блок вмикається сигналом *onn*, він починає моніторинг вхідного сигналу

evnt. Якщо сигнал *evnt* не з'являється протягом фіксованого часу, система має перейти в режим енергозбереження (збереження вихідного сигналу встановлено на високий рівень). Система виходить із режиму збереження в разі встановлення сигналу *evnt* або вимкнення модуля через вхідний сигнал *onn* із подальшим зняттям сигналу збереження. На рис. 3 зображено граф переходів автомата Мура такого пристрою.

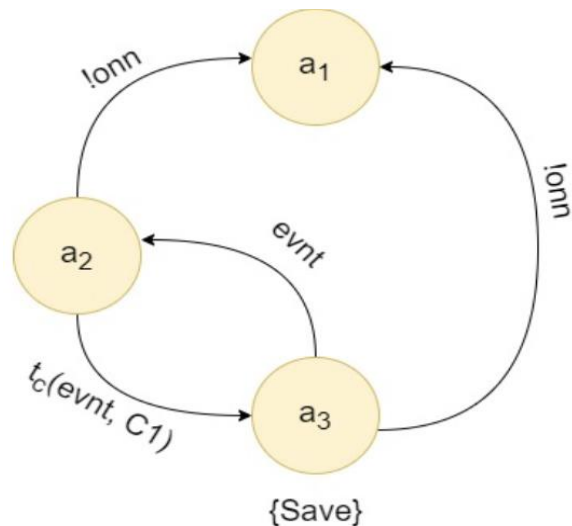


Рис. 3. Граф переходів кінцевого автомата Мура для модуля енергозбереження

На рис. 4 зображено процес переходів такого автомата мовою Verilog.

System Verilog Assertions (SVA) є підмножиною мови Verilog, що дає змогу виражати особливості дизайну за допомогою спеціальних конструкцій. Слід зазначити, що всі конструкції SVA ігнорують під час синтезу, а отже, ніяк не впливають на кінцеву схему.

Темпоральні властивості будь-якої HDL-моделі можуть бути виражені за допомогою трьох конструкцій SVA:

- *sequence* – використовується для подання послідовності подій моделювання в часі, який виражається циклами синхросигналу;
- *property* – конструкція, що об'єднує різні *sequence* з використанням операторів SVA;
- *assert* – подає асерційну точку, яка використовується для перевірки *property* під час моделювання або формальної верифікації.

```
always @(state, evnt, onn, count)
case (state)
a1: if (onn) begin
    next_state = a2;
end
else begin
    next_state = a1;
end

a2: if (!onn) begin
    next_state = a1;
end
else if (count >= C1 - 1 && !evnt) begin
    next_state = a3;
    next_count = 3'd0;
end
else if (!evnt) begin
    next_state = a2;
    next_count = count + 1'b1;
end
else begin
    next_state = a2;
    next_count = 3'd0;
end

a3: if (!onn) begin
    next_state = a1;
end
else if (evnt) begin
    next_state = a2;
end
else begin
    next_state = a3;
end

default: begin
    next_state = a1;
    next_count = 3'd0;
end
endcase
```

Рис. 4. Verilog опис процесу переходів модуля енергозбереження

Опишемо можливі сценарії поведінки дизайну залежно від тривалості зовнішньої події за допомогою вищезазначених конструкцій. На рис. 5 наведено конструкцію *property*, яка описує передумову обчислення режиму енергозбереження – модуль ввімкнений, зовнішня подія відсутня, сигнал *save* має низький логічний рівень.

```
sequence no_event;
    (onn && !evnt && !save);
endsequence
```

Рис. 5. SVA-опис передумови обчислення режиму енергозбереження

Наступним кроком необхідно описати можливі ситуації поведінки дизайну. На рис. 6 наведено опис поведінки, коли зовнішня подія триває необхідну кількість тактів – у цьому випадку 5 тактів.

```

property exact_match;
  disable iff(rst)
  @(posedge clk) no_event | => !evnt [*5] | => save;
endproperty

```

Рис. 6. SVA-опис поведінки, коли зовнішня подія триває необхідну кількість тактів

На наступному такті сигнал *save* повинен мати високий логічний рівень. Часову діаграму, яка описує таку ситуацію, наведено на рис. 7. Жовтою стрілкою позначено момент початку обчислення властивості – виконання умови *onn && !evnt && !save*, зеленою –

момент успішного обчислення властивості – сигнал *save* набуває значення логічної одиниці. Слід зазначити, що це опис ситуації, коли зовнішня подія триває більше необхідної кількості тактів.

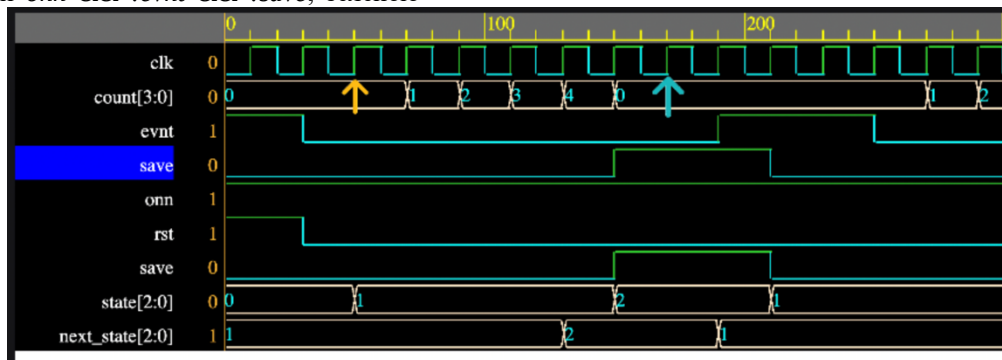


Рис. 7. Часова діаграма обробки зовнішньої події, яка триває необхідну кількість тактів

Аналогічно опишемо ситуацію, коли зовнішня подія не задовольняє часові вимоги. На рис. 8 наведено SVA-код опису такого сценарію. Відповідна часова діаграма зображена на рис. 9. Червоною стрілкою позначено момент початку обчислення властивості –

виконання умови *onn && !evnt && !save*, жовтою – момент, коли сигнал *evnt* набуває значення логічної одиниці, зеленою – момент успішного обчислення властивості: сигнал *save* набуває значення логічного нуля.

```

property smaller_match;
  disable iff(rst)
  @(posedge clk) no_event | => evnt | => !save;
endproperty

```

Рис. 8. SVA-опис поведінки, коли зовнішня подія триває менше необхідної кількості тактів

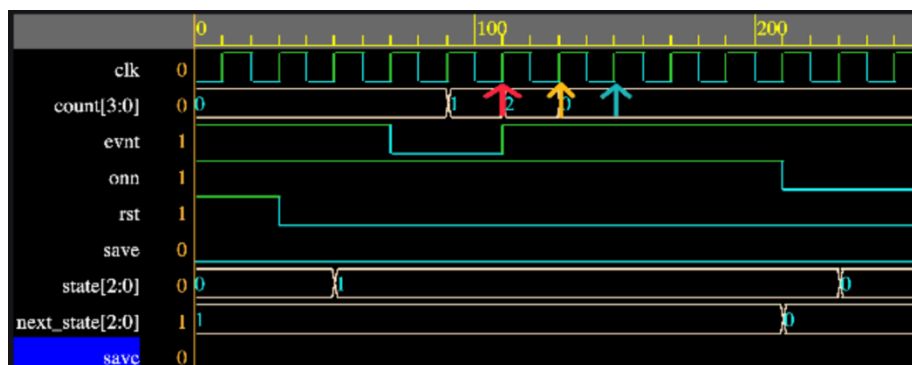


Рис. 9. Часова діаграма обробки зовнішньої події, яка триває менше необхідної кількості тактів

Останній варіант поведінки – модуль ввімкнений (сигнал *onn* має рівень логічної одиниці), сигнал *evnt* має високий логічний рівень увесь час

(зовнішня подія не відбувається взагалі). SVA-опис такої поведінки подано на рис. 10.

```
property event_all_time;
  disable iff(rst)
  @(posedge clk) onn and evnt | => !save;
endproperty
```

Рис. 10. SVA-опис поведінки, коли зовнішня подія не задовольняє часові вимоги

Відповідна часова діаграма зображена на рис. 11. Червоними стрілками позначено момент початку обчислення властивості – виконання умови *onn* &&

evnt, жовтими – моменти успішного обчислення властивості: сигнал *save* набуває значення логічного нуля.

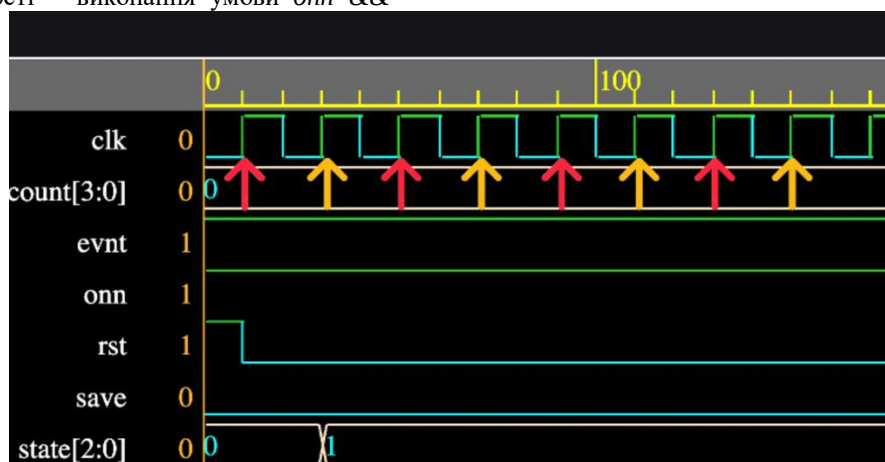


Рис. 11. Часова діаграма роботи автомата, коли зовнішня подія не відбувається

Важливим аспектом написання верифікаційного коду з використанням асерцій є визначення поведінки середовища моделювання в разі порушення визначених властивостей. Окрім того, враховуючи імплікаційну природу властивостей,

необхідно знати, чи активує тестовий код (testbench) такі сценарії. Для вирішення цих завдань у SVA використовують конструкції *assert* та *cover* відповідно. На рис. 12 наведено фрагмент використання цих конструкцій для раніше розглянутих властивостей.

```
assert property (exact_match); // асерційна точка
cover property (exact_match); // точка функціонального покриття
```

Рис. 12. Використання операторів *assert property* та *cover property* для визначення точок асерції та функціонального покриття

На рис. 13 показано помилку оператора в HDL-коді автомата і відповідну реакцію середовища моделювання. Після запуску тестів з'являються помилкові повідомлення, які свідчать про порушення

раніше описаних властивостей – у цьому випадку *exact_match* з зазначенням початкової та кінцевої точки обчислення властивості.

```
assign save = state == a2; // Помилка в HDL кодї
```

```
Error: ASRT_0005 design.sv(87): Assertion FAILED at time: 150ns, scope: testbench.inst, start-time: 30ns
Error: ASRT_0005 design.sv(93): Assertion FAILED at time: 170ns, scope: testbench.inst, start-time: 150ns
Error: ASRT_0005 design.sv(93): Assertion FAILED at time: 190ns, scope: testbench.inst, start-time: 170ns
Error: ASRT_0005 design.sv(93): Assertion FAILED at time: 210ns, scope: testbench.inst, start-time: 190ns
Error: ASRT_0005 design.sv(93): Assertion FAILED at time: 230ns, scope: testbench.inst, start-time: 210ns
```

Рис. 13. Помилка HDL-оператора та реакція середовища моделювання

Отже, значно зменшується час пошуку помилкових HDL-операторів і конструкцій. Окрім того, за рахунок оператора *cover property* проєктувальник має змогу бачити, які сценарії поведінки покрито тестами.

Обговорення результатів

У статті розглянуто питання скорочення часу верифікації цифрових приладів шляхом введення додаткових конструкцій в HDL-код опису пристрою. На практиці показано використання мови SVA (підмножини мови Verilog) для опису асерційних конструкцій. Слід зазначити, що запропоновані підходи також можна реалізовувати при діагностиці та верифікації автоматних моделей, написаних із

використанням мов програмування C/C++, які також мають підтримку асерційних конструкцій. На рис. 14 показано приклад використання оператора *assert* при написанні тестового коду пристрою логічного керування світлофором мовою C. Особливу актуальність цей підхід має при реалізації пристроїв логічного керування в класичних SoC, наприклад сімейства ZYNQ-7000 фірми Xilinx Inc [6]. Реалізація моделі пристрою керування мовою програмування C з використанням асерційних конструкцій на базі стека інструментальних засобів САІР Vivado/Vitis/Vitis HLS дає змогу виконати наскрізне проєктування та верифікацію як апаратної частини програмованої логіки (PL), так і процесорного програмного забезпечення в частині PS.

```
// Simulate transition to A7
assert(fsm.get_current_state() == fsm_states::A1);
for (int i = 0; i < T1; ++i) {
    street_fsm_controller( input_signals: OnSignal, &: control_output, extClock: false);
    street_fsm_controller( input_signals: OnSignal, &: control_output, extClock: true);
}
assert(fsm.get_current_state() == fsm_states::A7);
assert(fsm.get_control_signals() == YGR);
```

Рис. 14. Використання оператора *assert* у тестовому кодї мовою C

Висновки

Запропоновано модель верифікації часових автоматів із зовнішніми подіями з недетермінованою тривалістю шляхом введення додаткових асерційних конструкцій, які описують можливі сценарії поведінки автомата залежно від тривалості зовнішньої події. Асерційні точки є потужним інструментом, які спрощують пошук помилкового HDL-оператора під час верифікації проєкту. Окрім того, показано, що асерції можна використовувати для підвищення якості тестів (functional coverage), зменшуючи час верифікації і, як наслідок, час випуску готового продукту на ринок (time-to-market).

Запропоновані теоретичні викладки проілюстровано на прикладі розширення Verilog опису автомата модуля енергозбереження з використанням мови SVA.

Список використаних джерел

1. Bergeron Janick. Writing testbenches: functional verification of HDL models. Boston: Kluwer Academic Publishers. 2001. 354 с.
2. Design timed FSM with VHDL Moore pattern / M. A. Miroschnyk, A. S. Shkil, E. N. Kulak, D. Y. Rakhlis, A. M. Miroschnyk, N. V. Malahov. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. № 2(53). P. 137-148.

4. Iabab Al-Fedaghi. Modeling Physical. *Digital Systems: Formal Event-B vs. Diagrammatic Thining Machine. International Journal of Computer Science and Network Security*. 2020. No. 20 (4). P. 208–220. hal-02614504, version 1 (20-05-2020).

5. Miroshnyk A. M., Kulak G., Pshenychnyi K. Y. Assertion Based Design of Timed Finite State Machine. *2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Batumi, Georgia. 2021. P. 1–4.

6. Temporal events processing models in finite state machines / M. A. Miroshnyk, S. I. Shmatkov, O. S. Shkil, K. Y. Pshenychnyi (2023). *Radio Electronics, Computer Science, Control*. (4), 49.

7. Проектування та самодіагностика кіберфізичних пристроїв керування на платформі SoC / О. С. Шкіль, Д. Ю. Рахліс, І. В. Філіпенко, В. Р. Корнієнко. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. No 4 (26). С. 122–134.

8. Components of a complete assertions-based verification solution. Cadence. 2005. URL: www.cadence.com/products/functional_ver/abv_dt.aspx.

9. IEEE Std 1076-2002, IEEE Standard VHDL Language Reference Manual. 124 p.

10. IEEE Std 1364-2001, IEEE Standard for Verilog Hardware Description Language. Electrical and Electronics Engineers, Inc. USA. 2003. P. 1-23.

11. Хаханов В. І., Каминська М. А., Зайченко С. О. Верифікація цифрових пристроїв на основі використання аналізу тестопридатності та асерційних бібліотек (російською мовою). *АСУ та прилади автоматики*. Харків, 2007. № 140. С. 75–83.

Miroshnyk M. A., Shkil O. S., Pshenychnyi K., Shafranskyi A. Assertion based verification of real-time device with non-deterministic external events. A real-time device models with processing of external events with indefinite duration described using hardware description languages (HDLs) verification method, is proposed. The methodology uses the apparatus of assertions to describe the temporal nature of the above models. It is shown that the introduction of additional HDL structures allows to increase the level of testability and reduce the verification time without additional hardware, time and energy costs of the digital product. The effectiveness of the proposed approaches was illustrated on the example of the energy saving module model. The HDL code of the device has been extended with additional constructs in the System Verilog Assertions language to describe the nature of the model depending on an external event. Different scenarios of the device were considered depending on the duration of the external event with corresponding illustrations on time diagrams. It was also shown how the proposed methodology can be used in automatic models of digital devices described in the C language.

Keywords: *design automation, simulation, verification, real time systems, events, temporal state diagram.*

Мірошник Марина Анатоліївна, д.т.н., професор, професор кафедри теоретичної та прикладної системотехніки, Харківський Національний Університет імені В. Н. Каразіна. E-mail: m.miroshnyk@karazin.ua

<https://orcid.org/0000000222312529>.

Пишеничній Кирило Юрійович, аспірант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, АПОТ, ХНУРЕ, м. Харків, Україна.

E-mail: kyrylo.pshenychnyi@nure.ua,

<https://orcid.org/0009-0007-0799-6604>.

Шафранський Андрій Вікторович, аспірант кафедри теоретичної та прикладної системотехніки, Харківський Національний Університет імені В. Н. Каразіна. E-mail: shafranskyi.andrei@student.karazin.ua, <https://orcid.org/0009-0004-7725-3556>.

Miroshnyk Maryna, Doctor of Technical Sciences, Professor of theoretical and applied systems engineering department, V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, Ukraine, 61022.

E-mail: m.miroshnyk@karazin.ua <https://orcid.org/0000000222312529>.

Pakhomov Yuriy, Doctor of Philosophy, Associate professor of the Department of Computer science and information technologies, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova Str., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002.

E-mail: Yuriy.Pahomov@kname.edu.ua ,

<https://orcid.org/0000-0002-2267-8600>.

Pshenychnyi Kyrylo, Ph.D., graduate student of the department Design Automation Department, DAD, KHNURE, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kyrylo.pshenychnyi@nure.ua, <https://orcid.org/0009-0007-0799-6604>.

Shafranskyi Andrei, graduate student of the Department of theoretical and applied systems engineering, Kharkiv National University named after V. N. Karazin

Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, Ukraine, 61022. E-mail:

shafranskyi.andrei@student.karazin.ua

<https://orcid.org/0009-0004-7725-3556>.

УДК 656.2

DOI: 10.18664/iksz.v29i1.300904

ПАРХОМЕНКО Л.О., к.т.н.,
ПРОХОРОВ В.М., к.т.н.,
КАЛАШНІКОВА Т.Ю., к.т.н.,
ОВСЯННІКОВ Д.О., (Український державний університет залізничного транспорту)

Формування моделі управління пріоритетністю обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності.

Забезпечення своєчасної доставки вантажів є ключовим моментом перевізного процесу і вирішальну роль в цьому питанні повинні грати залізничні технічні станції, так як саме вони керують процесом обробки вагонопотоків. Складність вирішення цієї проблеми полягає в наявності низки факторів невизначеностей, які мають потенційний вплив на процес прийняття рішень, але згідно до традиційних технологій управління їх взагалі дуже важко оцінити, а тим паче врахувати при прийнятті управлінських рішень. Стаття присвячена проблемі ідентифікації факторів, які необхідно першочергово враховувати при прийнятті рішень, з цією метою було запропоновано модель визначення пріоритетності обробки вагонів на залізничних технічних станціях з метою подальшої автоматизації процесу управління.

Були проаналізовані як фактори невизначеності, що можуть ускладнювати процеси обробки та формування поїздів та їх просування залізничною мережею, так і параметри вагонів, за якими доцільно визначати пріоритетність обробки вагонів з метою забезпечення своєчасної доставки вантажів та зменшення збитків залізничних перевізників. Стаття пропонує рішення у вигляді нейромережевої моделі, спеціально розробленої для визначення пріоритетності обробки вагонів.

Основні функціональні блоки моделі включають в себе вхідний шар, що враховує різні фактори, такі як затримка, залишковий час, величина штрафу тощо. Приховані шари обчислюють взаємодію цих факторів, а вихідний шар генерує оцінки пріоритету для кожного вагона.

Модель класифікує вагони за чотирма класами пріоритетності: звичайний, середній, високий та винятковий і визначає величину абсолютного пріоритету. Такий підхід дозволяє максимально точно прогнозувати чутливість процесу обробки вагонів до керуючих дій з метою забезпечення для максимальної кількості вагонів можливості "наздогнати" графік та уникнути штрафних санкцій.

Висновок статті вказує на важливість розробленої моделі для подальшої автоматизації процесу управління технічними станціями з метою уникнення затримок у доставці вантажів та штрафних санкцій.

Ключові слова: дотримання терміну доставки вантажів, пріоритетність обробки вагонів, автоматизація управління технічною станцією, невизначеність, нейромережева модель.

Постанова проблеми.

Залізниця є важливим ланцюжком логістичного вантажного транспорту, а ефективне управління обробкою вагонів на станціях має критичне значення для забезпечення надійності процесу перевезень. І якщо нещодавно одними з основних проблем на мережі АТ Укрзалізниця були нестача рухомого складу: вантажних вагонів і локомотивів, то зараз стрімко набирає оберти інша проблема – невиконання термінів доставки вантажів. Звісно фактор війни є однією з причин даної проблеми. Але також слід констатувати той факт, що проблема недотримання термінів доставки вантажів не є наслідком проблеми нестачі рухомого складу, адже ця проблема більшою мірою все ж таки була останніми роками вирішена. Тому слід визнати, що основною складовою проблеми недотримання термінів доставки вантажів,

звісно попри фактор війни, є все ж таки неефективне оперативне управління перевізним процесом на залізниці.

Задача визначення пріоритетності обробки вагонів у залізничних перевезеннях постає внаслідок ряду факторів та викликів, що виникають у сучасних логістичних процесах. Декілька ключових моментів, які призвели до постановки цієї задачі, можуть бути такими:

1. Оптимізація логістичних потоків: зростання обсягів вантажоперевезень на залізницях призводить до потреби в оптимізації логістичних потоків; визначення пріоритетів у обробці вагонів може сприяти ефективнішому розподілу ресурсів та зниженню затримок.

2. Підвищення конкурентоспроможності: залізничний транспорт конкурує з іншими видами транспорту; швидке та точне сортування вагонів дозволяє залізницям забезпечувати високу якість обслуговування, що є ключовим фактором для залучення клієнтів та підтримки конкурентоспроможності.

3. Мінімізація штрафів: штрафи за порушення термінів доставки вантажу можуть становити значну частину витрат для залізничних компаній; ефективне визначення пріоритетності дозволяє уникнути збільшення штрафів і збільшує фінансову стійкість логістичних операторів.

4. Використання сучасних технологій: завдяки розвитку сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT) та системи штучного інтелекту (AI) стало можливим ефективне використання даних для прийняття рішень у реальному часі, що важливо для оптимізації обробки вагонів.

Отже, постановка цієї задачі базується на потребі покращення логістичних процесів, забезпечення високої якості обслуговування та вирішенні фінансових викликів, що виникають у залізничних перевезеннях.

Таким чином, актуальною є проблема пріоритезації обробки вагонів на залізничній станції і побудова автоматизованої системи, яка враховуватиме всі важливі фактори впливу для ефективного прийняття рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблеми визначення пріоритетності обробки вагонів на технічних стаціях є специфічними і дуже залежать від системи організації вагонопотоків. Тому науковий інтерес до даної теми є не дуже високим у західних розвинених країнах, особливо в тих, де працюють багато дрібних операторів, натомість більший інтерес можна спостерігати в країнах Східної Європи та Азії, тобто в тих країнах, в яких або система організації вагонопотоків схожа з радянською, або вона взагалі ще знаходиться на стадії розвитку. Прикладом цього є стаття [1], що опублікована саме в малайзійському науковому журналі. Оригінальність статті полягає в застосуванні математичного підходу — моделі пріоритетного цільового програмування — для вирішення завдань перепланування руху по залізниці. Цей підхід дозволяє ефективно враховувати вимоги оператора та забезпечити оптимальне управління, зменшуючи затримки та підвищуючи надійність обслуговування. Успішне застосування моделі в експерименті на реальній залізничній мережі свідчить про її потенційну застосованість в умовах виникнення подій та затримок, що робить статтю значущою для оптимізації та управління залізничним транспортом. Однак є виключення і серед розвинених західних країн, як ось, наприклад, стаття [2] професорів лондонського університету, яка також висвітлює проблеми затримок і

несвоєчасної доставки вантажів на британській залізниці. Автори вбачають головною причиною цього явища саме проведену у 90-х роках приватизацію галузі. Однак автори переважно розглядають економічні і організаційні чинники цього негативного явища і майже не торкаються технологічних. Цікавою також є стаття [3] китайських дослідників. У статті розглядається оптимізація доставки та вивезення вагонів на залізничну станцію з різною територією обслуговування. Наведено математичну модель та використано алгоритм відпалювання для розв'язання задачі. Виявлено, що алгоритм відпалювання ефективніший за генетичний та алгоритм пошуку табуляції. Проте стаття обмежена вивченням лише районів навантаження і не розглядає можливості прискорення обробки вагонів на технічних станціях. Ще одна подібна стаття [4] присвячена багатоцільовій оптимізації процесу вивезення та розміщення вагонів на станції з врахуванням кількох цільових критеріїв. Використовуючи модель оптимізації з обмеженнями щодо можливостей локомотива та пріоритетів для передачі між ділянками, що обслуговуються, застосовано алгоритм відпалювання для знаходження оптимального рішення. Використано випадок розміщення та вивезення вагонів на залізничній станції для верифікації моделі та алгоритму. Результати свідчать, що модель відповідає вимогам схеми розміщення та вивезення вагонів і ефективність обчислень відповідає потребам залізничної експлуатації. Однак стаття не розглядає аспекти прискорення обробки вагонів на технічних станціях та обмежена аналізом лише гілкоподібних ділянок. Наступна стаття [5] також присвячена оптимізації системи розміщення та вивезення вагонів на гілкоподібній мережі вантажних операцій (PTWS-BSFON) в Китаї. Розглянуто процес операції PTWS з трьох аспектів: підсистема розформування-формування вагонів на технічній вантажній станції, підсистема розміщення місцевих вагонів та підсистема вивезення місцевих вагонів. Розроблено платформу для симуляції двох типових режимів розміщення та вивезення вагонів за допомогою програмного забезпечення Arena. Зазначено ієрархічну структуру стратегій розміщення та вивезення в симуляційній платформі для сценаріїв PTWS-SO та PTWS-SSMS. Результати симуляції на конкретних прикладах свідчать про обґрунтованість методології застосування різних стратегій та покращення ефективності PTWS-BSFON. Однак стаття розглядає питання пришвидшення транспортування вагонів лише переважно в контексті оптимізації місцевої роботи.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Як показав аналіз наукових публікацій останніх років, проблема пріоритезації обробки

вагонів на залізничних технічних станціях в них досліджена дуже зверхньо. Останні наукові публікації в області залізничного транспорту та логістики свідчать про те, що проблема пріоритизації обробки вагонів рідко розглядається як окрема і чітко визначена задача. Більшість наявних досліджень концентруються на загальних питаннях оптимізації залізничних перевезень та управління логістичними потоками, не надаючи достатньої уваги специфіці обробки вагонів на технічних станціях.

Недоліки в існуючих дослідженнях полягають у відсутності визначеності у методиках надання пріоритетів для вагонів, враховуючи їхню конкретну ситуацію та потреби. При цьому, систематичний підхід до пріоритизації вагонів, який враховує різноманітні фактори, такі як затримки, залишковий час та штрафи, залишається малодослідженим.

Невизначеність у питанні пріоритизації вагонів ускладнює роботу залізничних компаній та логістичних операторів, які можуть стикатися з непередбачуваними затримками та неефективністю в управлінні транспортними потоками. Крім того, відсутність чіткої методології пріоритизації може призводити до фінансових втрат через штрафні санкції за порушення термінів доставки.

Отже, невирішеність цієї проблеми викликає необхідність подальших досліджень та розробки нових методів пріоритизації обробки вагонів, спрямованих на покращення ефективності та точності управління залізничними перевезеннями.

Формулювання цілей. Метою дослідження є удосконалення процесу управління переробкою вагонопотоків за рахунок формування моделі визначення пріоритетів обробки вагонів на технічних станціях.

Викладення основного матеріалу дослідження.

В сучасних умовах управління залізничними технічними станціями оперативний керівний персонал стикається з рядом викликів, які впливають на ефективність обробки та формування вантажних поїздів. Зокрема, несподівані коливання вантажних потоків та технічні негаразди можуть значно ускладнювати протікання цих процесів.

Динаміка та обсяг перевезень можуть змінюватися, викликаючи нестабільність у роботі станцій. Технічні несправності та аварійні ситуації можуть призводити до непередбачуваних затримок та обмежень у русі поїздів, що ускладнює вирішення задач обробки вагонів. Крім того, планування та координація руху поїздів на мережі може бути викликана неправильними управлінськими рішеннями, що призводить до неефективності та затримок. Кліматичні умови та стан інфраструктури також можуть вносити свій вклад у непередбачувані обставини. Нестабільність вагонопотоків – це також дуже важливий чинник, який значно посилює

ступінь невизначеності і безпосередньо впливає на можливість вагона "наздогнати" графік перевізного процесу, адже у разі ненадання підвищеного пріоритету вагонам певних напрямків і, наприклад, подальшому значному різкому зниженню трафіку вагонів цього або попутних напрямків крізь станцію, швидкість формування составів цього напрямку на станції може значно уповільнитись, що призведе лише до подальшого збільшення відставання цих вагонів від графіка та, як наслідок, недотримки термінів доставки та нарахування штрафів.

У такому контексті виникає необхідність вдосконалення систем управління та впровадження ефективних рішень для прискорення обробки та формування вантажних поїздів. Застосування нейромережевих моделей допомагає вирішити ці виклики, дозволяючи автоматизувати та оптимізувати процеси управління на технічних станціях, забезпечуючи при цьому швидкість та ефективність обробки вагонів у невизначених умовах.

Перший та вирішальний фактор у визначенні пріоритету обробки та відправлення вагона у системі залізничних перевезень - це поточна затримка. Для обчислення цього показника використовується різниця між фактичним часом прибуття вантажу до пункту призначення та тим, що було розраховано на початку маршруту. При цьому враховується поточне місцезнаходження вагона, відстань до пункту призначення та поточна швидкість для конкретної категорії поїздів.

Другий аспект, який слід враховувати, - це залишковий час, який визначається як різниця між оригінально розрахованим терміном доставки та фактичним часом. Важливо зазначити, що наявність значного залишкового часу має стратегічне значення, оскільки це надає додаткові можливості для вживання заходів щодо вирішення можливих проблем і уникнення надмірного збільшення пріоритету для конкретного вагона.

Третім фактором доцільно обрати величину штрафу, яку буде стягнуто з залізничного підприємства у разі недотримання терміну доставки вантажу. Таким чином, наприклад, з двох вагонів, які мають однаковими всі інші фактори, слід обробляти першим той вагон, за перевезення вантажу якого була сплачена більша провізна плата. Тобто це або дорожчий вантаж, або більша відстань перевезення. Хоча договори або інші нормативні документи, згідно до яких нараховуються сума штрафу, можуть містити й інші умови, але все ж таки основою зазвичай є саме провізна плата.

Вибір математичного апарату нейронних мереж для побудови моделі оцінки пріоритету обробки вагонів визначається їхньою здатністю враховувати складні та нелінійні залежності між різними факторами, які впливають на обробку вагонів на залізничних технічних станціях.

Математична апаратура нейронних мереж дозволяє автоматично визначати оптимальні вагові коефіцієнти для різних факторів вибору порядку обробки вагонів, враховуючи їхню важливість та взаємодію. Це особливо важливо в контексті обробки великої кількості даних та різноманітних вхідних параметрів.

Нейронні мережі підходять для розв'язання задач прогнозування та класифікації, оскільки вони можуть адаптуватися до складних неструктурованих даних та ефективно враховувати взаємозв'язки між різними змінними. Мережі працюють за принципом взаємозв'язаних шарів нейронів, які автоматично навчаються здійснювати передбачення на основі вхідних даних.

При використанні нейронних мереж для моделювання пріоритету обробки вагонів, ми можемо враховувати різні параметри, такі як час затримки, залишковий час слідування, величину штрафу та інші, та навчити модель автоматично визначати їхню вагомість у визначенні порядку обробки.

Такий підхід дозволяє створювати гнучкі та адаптивні моделі, які можуть ефективно працювати зі складними залежностями в даних, що сприяє точнішій та надійнішій оцінці пріоритетів обробки вагонів на залізничних технічних станціях.

У рамках нейромережевої моделі для визначення пріоритетності обробки вагонів у залізничних перевезеннях, процес визначення пріоритету може бути розглянутий як оптимізація вагових коефіцієнтів, які визначають важливість різних факторів у виборі порядку обробки. Модель використовує архітектуру повнозв'язаної нейронної мережі з наступними етапами обробки:

1. на початку, вхідний шар мережі представляє різні фактори, такі як поточна затримка, залишковий час та величина штрафу, які враховуються при визначенні пріоритету обробки вагону;
2. слідом за цим, інформація проходить через приховані шари мережі, де нейрони обчислюють взаємодію різних факторів та їх ваги; ваги налаштовуються під час тренування мережі на історичних даних;
3. на виході мережі розташований вихідний шар, який містить нейрони, які генерують оцінки пріоритетів для кожного вагону; функція активації на цьому шарі вирішує, як ці оцінки враховують фактори;
4. функція втрат оцінює різницю між розрахованим пріоритетом та фактичним пріоритетом на тренувальних даних; мережа намагається мінімізувати цю різницю в процесі навчання.
5. для корекції ваг використовується оптимізатор на основі втрат та градієнтів, зворотне поширення похибок допомагає мережі адаптуватися до змін у вагах для покращення точності прогнозування пріоритету; таким чином, нейромережева модель використовує свою

архітектуру для автоматизованого врахування та оптимізації різних факторів, що впливають на процес розсортування та відправлення вантажів.

На рис. 1. наведено модель на основі архітектури повнозв'язаної нейронної мережі прямого розповсюдження сигналу, що була сформована для вирішення задачі визначення пріоритетів обробки вагонів. Модель має 3 вхідні і 2 вихідні параметри.

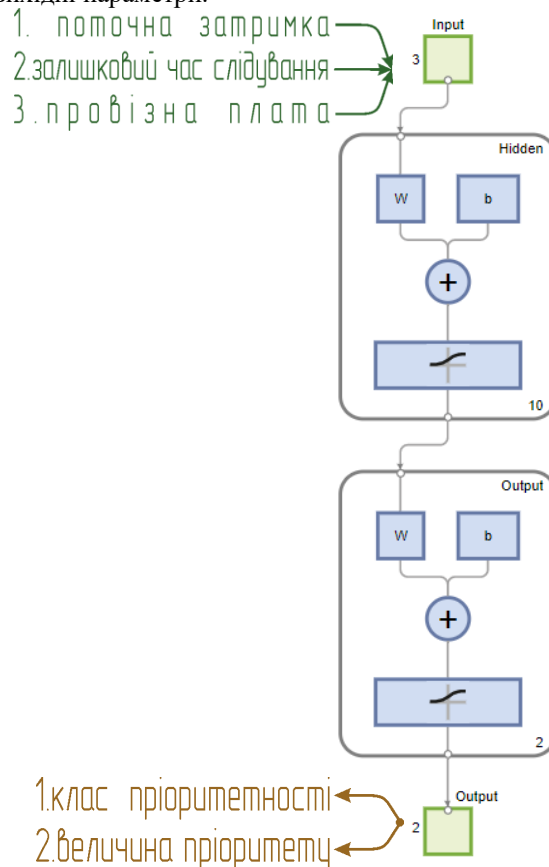


Рис. 1. – Архітектура повнозв'язаної нейронної мережі прямого розповсюдження сигналу

Обчислення у мережі даної архітектури мають певні особливості. Розрахунок підсумовування ваг для нейрона у прихованому шарі можна виразити формулою:

$$z = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_i) + b, \quad (1)$$

де n - кількість вхідних параметрів,

w_i - ваговий коефіцієнт, x_i - вхідний параметр,

b - зсув.

У контексті нейронних мереж "зсув" (bias) - це додатковий параметр, який додається до зваженої суми вхідних сигналів перед застосуванням функції активації. Зсув дозволяє

зсувати (зміщувати) результат зваженої суми, що інколи є важливим для коректної роботи нейрона.

Математично, якщо Z – зважена сума вхідних сигналів, а b – зсув, то вони входять у функцію активації виглядають так:

$$f(z + b), \quad (2)$$

Зсув дозволяє моделі вивчати зміщення відносно нульового входу і може бути корисним для адаптації до різних умов та навчання оптимальних параметрів нейрону.

У якості функції активації для нейрона у прихованому шарі була застосована логістична функція (logsig), формулу якої можна записати наступним чином:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-a \cdot z}}, \quad (3)$$

де a – параметр, який контролює нахил (slope) функції активації. Цей параметр може варіюватися і впливати на крутість (steepness) "схилу" функції. Зазвичай a обирається як певна константа (наприклад, $a = 1$), але в деяких випадках він може бути параметром, який підлягає оптимізації під час тренування нейронної мережі.

У вихідному шарі, де h вектор активацій прихованого шару, вихідний сигнал o розраховується аналогічно:

$$o = \sum_{j=1}^m (w_j \cdot h_j) + b, \quad (4)$$

де m – кількість нейронів у прихованому шарі, w_j – ваговий коефіцієнт, h_j – активаційний вихід нейрона у прихованому шарі.

Ці формули допомагають визначити математичний аспект роботи окремого нейрона та мережі в цілому, враховуючи вагові коефіцієнти, функції активації та зсуви.

Згідно до обраної архітектури нейронної мережі було розроблене програмне забезпечення в середовищі Matlab, в ході моделювання та оптимізації структури мережі було встановлено, що створена модель забезпечує якісний результат за умови, що прихований шар містить близько 80 нейронів. На рис. 1 наведено діалогове вікно процесу навчання мережі за методом зворотного розповсюдження похибки.



Рис. 2. Діалогове вікно процесу навчання мережі за методом зворотного розповсюдження похибки

У ході тренування було отримано наступні графіки, що ілюструють динаміку процесу навчання нейронної мережі. На першому графіку, що представляє динаміку похибок навчання (рис. 3.), дані розділяються на три основні набори: навчальний, тестовий (перевірочний), і валідаційний.

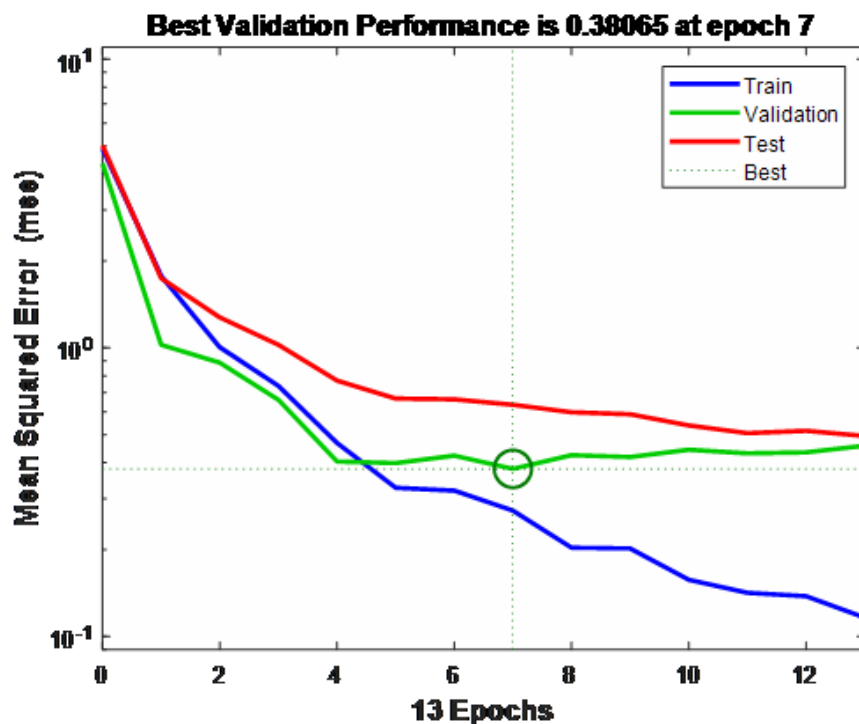


Рис. 3. Динаміка середньоквадратичних похибок в процесі навчання розробленої мережі із застосуванням навчального, валідаційного та тестового наборів даних.

Навчальний набір використовується для навчання самої моделі. Модель адаптується до даних цього набору, обчислюючи градієнт функції втрат і оновлюючи параметри для мінімізації цієї функції.

Тестова вибірка не використовується під час тренування, але використовується для оцінки продуктивності моделі після завершення навчання. Модель оцінюється на тестовій вибірці, щоб визначити, наскільки добре вона узагальнюється на нових, раніше небачених даних.

Валідаційна вибірка використовується для тонкого налаштування параметрів моделі та запобігання перенавчанню. У процесі навчання модель оцінюється на валідаційній вибірці, і отримані результати використовуються для регулювання гіперпараметрів, таких як швидкість навчання. Важливо розділити дані на ці три вибірки для ефективного оцінювання успішності моделі та уникнення перенавчання, що є стандартною практикою в області машинного навчання.

Наступний графік (рис. 4.), який відображає динаміку перевірного набору, дозволяє визначити, як точність чи помилка мережі змінюються на перевірочних даних під час тренування. Це важливо для оцінки того, наскільки ефективно мережа узагальнює свої знання на нових даних.

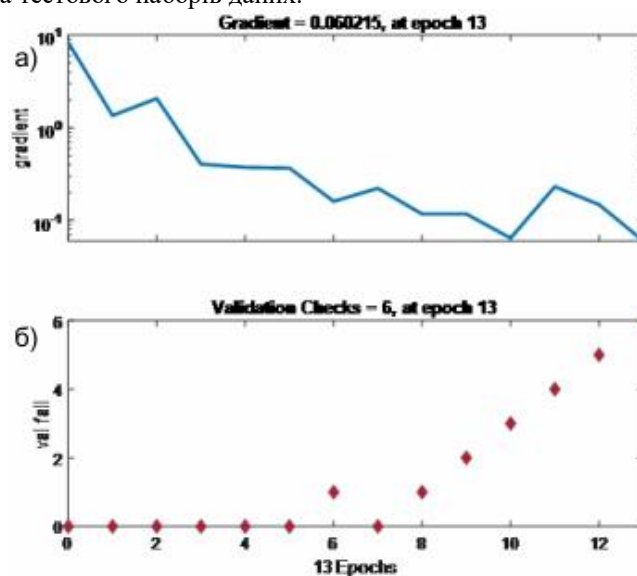


Рис. 4. Динаміка: а) градієнту та б) помилок валідації в процесі навчання розробленої нейронної мережі.

Графік гістограми помилок у процесі навчання нейронної мережі (рис. 5.) відображає розподіл величин помилок між прогнозованими та фактичними значеннями. Важливим аспектом аналізу є спостереження за нормальним розподілом помилок, який вказує на ефективність моделі. Збільшення розбіжності від нормального розподілу може свідчити про проблеми, такі як перенавчання (англ. *overfitting*) або недонавчання (англ. *underfitting*), що впливають на узагальнюючу

здатність моделі до нових даних. Оцінка розподілу помилок та виявлення явищ перенавчання чи

недонавчання сприяє оптимізації тренування моделі для досягнення бажаних результатів.

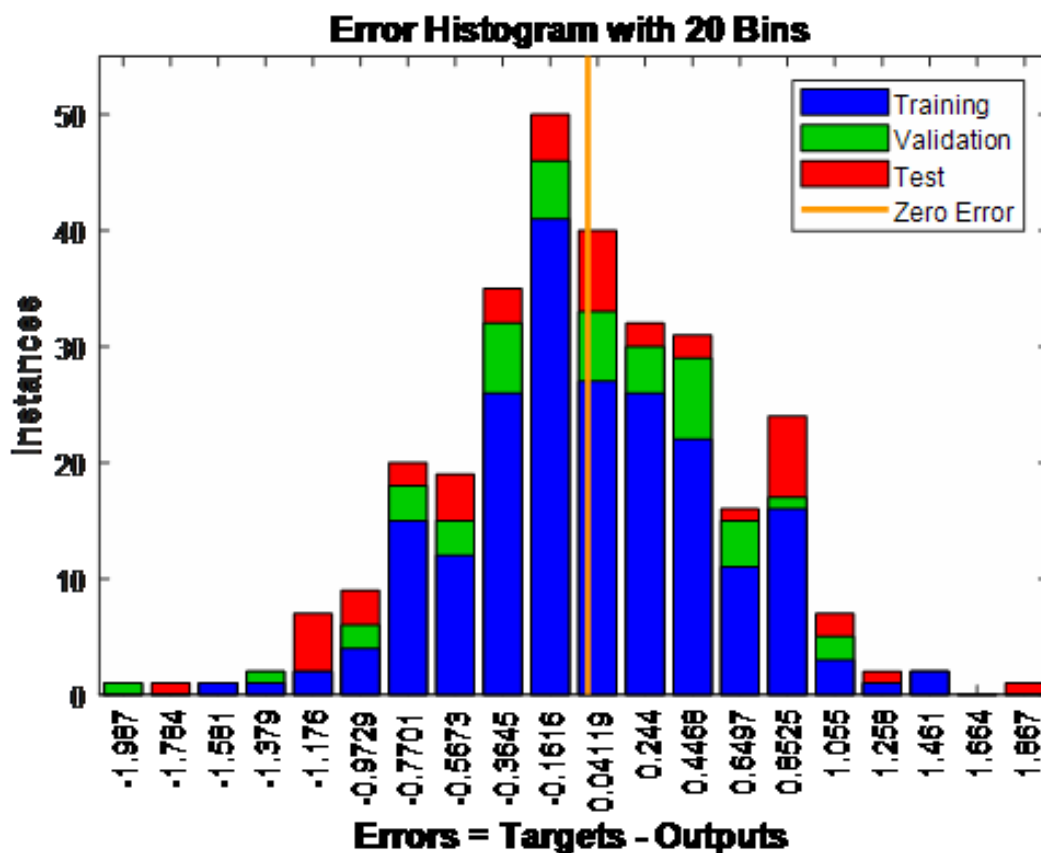


Рис. 5. Гістограма розподілу кількості екземплярів оцінювання вихідних сигналів мережі згідно до величини похибки

На наступному тривимірному графіку (рис. 6.) наведена візуалізація результату класифікації за

відповідними рівнями пріоритету екземплярів даних, що представляють інформацію про вантажні вагони на станції.

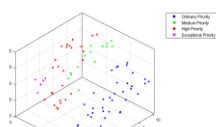


Рис. 6. Візуалізація класифікації вагонів за допомогою нейромережі згідно до чотирьох класів пріоритетності.

Отже було сформовано нейронну модель, призначену для визначення пріоритетності обробки вагонів на залізничних технічних станціях. Ця модель виробляє два ключових параметри, що сприяють управлінню та оптимізації процесами сортування вагонів.

Перший параметр – "клас пріоритетності" – визначає категорію пріоритетності для кожного вагона. Модель класифікує всю множину вагонів на вагони "звичайного пріоритету", "середнього пріоритету", "високого пріоритету" та "виняткового пріоритету". Ця класифікація надає зручний спосіб ідентифікації важливості вагона для технічної станції.

Другий параметр – "величина абсолютного пріоритету" – визначає конкретне числове значення пріоритету для кожного вагона. Цей параметр враховує всі фактори, що визначені моделлю, та вказує на загальне значення важливості вагона, враховуючи всі вагони на станції, що підлягають переробці.

Використання цих двох параметрів робить нашу модель більш ефективною та гнучкою у вирішенні завдань пріоритетного сортування вагонів. Класифікація на кілька категорій допомагає операторам швидше та зручніше керувати потоками вагонів, визначаючи їх важливість. Величина абсолютного пріоритету надає точну кількісну оцінку, що полегшує прогнозування та планування робіт на технічній станції.

Важливо відзначити, що не дивлячись на те, що модель може визначати абсолютний пріоритет для кожного вагона, розширення функціоналу до класифікації на категорії пріоритетності виявилось корисним і обґрунтованим.

По-перше, класифікація вагонів на кілька категорій відображає принцип роботи нейромережі, яка спеціалізується на розподілі об'єктів в конкретні класи в залежності від їх характеристик. Це створює більш нюансовану систему оцінки та керування пріоритетами, що відображає різноманітність факторів впливу на обробку вагонів.

По-друге, класифікація сприяє зручності та наглядності. Вона дозволяє операторам технічних станцій швидко розподіляти вагони за категоріями, що полегшує прийняття оперативних рішень. Маневровим диспетчерам стає легше взаємодіяти з системою, визначаючи пріоритети на основі важливості та певних параметрів, які визначаються мережею.

Отже, вибір використання двох параметрів – класу пріоритетності та абсолютного пріоритету – збільшує функціональність моделі та робить її більш ефективною для потреб сучасних технічних станцій.

Ця модель відіграє важливу роль у контексті подальшої автоматизації управління залізничними технічними станціями. Її впровадження вже на цьому етапі розвитку

забезпечить можливість розробки високоякісних систем підтримки прийняття рішень (СППР) для оперативного управління персоналу.

Модель нейромережі дозволяє здійснювати автоматичний аналіз та класифікацію вагонів за пріоритетами, що робить процес управління більш ефективним і швидким. Таким чином, модель забезпечує можливість оперативному керівному персоналу станцій легко аналізувати, інтерпретувати та використовувати дані, які надає в режимі реального часу система АСК ВП УЗ Є, для прийняття швидких та обґрунтованих управлінських рішень.

Модель також має за мету зменшення ступеня невизначеності при прийнятті рішень щодо порядку обробки вагонів та составів на станції. Справжня складність полягає в тому, що точно не відомо, які саме вагони з терміновою доставкою, у разі зміни порядку обробки, зможуть "наздогнати" графік та уникнути нарахування штрафів. Однак саме нейромережева модель дозволяє максимально точно прогнозувати ці події.

Застосування моделі робить процес управління станцією менш випадковим та забезпечує працівникам більше інформації для прийняття обґрунтованих рішень. Максимально точні прогнози забезпечують надійну основу для управлінських рішень, що, в свою чергу, сприяє ефективній роботі станції та уникненню можливих штрафів за порушення графіку доставки вантажів.

Отже, сформована модель є важливим кроком у розвитку технологій для залізничної галузі, оскільки вона допомагає покращити оперативні процеси та зменшити залежність від ручного втручання. Її впровадження в системи управління станціями відкриває перспективи для подальших досліджень та розвитку інтегрованих автоматизованих рішень для галузі залізничного транспорту.

Висновки.

Отримані результати визначення пріоритетності обробки вагонів свідчать про важливість оптимізації цього процесу у галузі вантажних залізничних перевезень. У контексті підвищення ефективності та своєчасності доставки вантажів, використання математичної моделі на основі нейронної мережі для визначення пріоритету вагонів виявилось важливим кроком у забезпеченні оптимального управління.

Результати аналізу підтверджують, що оптимізація процесу обробки вагонів, зокрема з урахуванням факторів, які визначають пріоритет, може призвести до зменшення затримок та підвищення загальної ефективності системи залізничних перевезень. Застосування подібної моделі стає важливим інструментом для автоматизації та удосконалення сортування вантажів.

Такий підхід до визначення пріоритетності може мати вагомий вплив на забезпечення якісних та своєчасних перевезень в рамках залізничної логістики. Подальший аналіз та впровадження результатів дослідження може сприяти оптимізації логістичних процесів та поліпшенню обслуговування вантажоперевезень.

Таким чином, сформована математична модель може бути застосована у якості основи при побудові СППР оперативного планування роботи залізничних технічних станцій.

1. Shuib A., Alwaddood Z. A Railway Rescheduling Model with Priority Setting. *Pertanika Journal of Science & Technology*. 2017. 25(2). P. 649–660.
2. McCartney S., Stittle J. 'Failing to deliver'—the privatized British rail freight industry. *Public Money & Management*. 2013. 33(5). P. 321–328. <https://doi.org/10.1080/09540962.2013.817115>
3. Guo C., Li S. Optimizing operation of delivering and fetching wagons at a railway station with mixed-shaped goods operation sites. *PLoS ONE*. 2022. 17(1): e0263029. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263029>
4. Guo C.J. Multi-objective optimization model and algorithm for scheme of placing-in and taking-out of wagons in branch-shaped freight operation sites. *China Railway Science*. 2017. 38(1). P. 138–143.
5. Guo C.J. Research on optimization of formulation for shunting operation plan of placing-in and taking out wagons based on phase plan. *Journal of the China Railway Society*. 2019. 41(10). P. 10–16.
6. Wolpert D.H. Stacked generalization. *Neural Networks*. 1992. 5(2). P.241–259.

Parkhomenko L.O., Prokhorov V.M., Kalashnikova T.Yu., Ovsianikov D.O. Development of a Model for Managing Priority in Wagon Processing at Technical Stations under Conditions of Uncertainty.

Ensuring timely cargo delivery is a crucial aspect of the transportation process, with railway technical stations playing a decisive role in handling wagon flows. The complexity of addressing this issue lies in various uncertainty factors that may potentially impact decision-making processes. However, traditional management technologies struggle to accurately assess and incorporate these factors into decision-making. This article addresses the identification of key decision-making factors, proposing a model for determining the priority of wagon processing at railway technical stations, aiming to further automate the management process.

Both uncertainty factors complicating wagon processing, formation, and their movement through the railway network, as well as wagon parameters suitable for determining processing priority to ensure timely cargo delivery and reduce losses for railway carriers, were analyzed. The article proposes a solution in the

form of a neural network model specifically designed to determine wagon processing priority.

The main functional blocks of the model include an input layer considering various factors such as delay, residual time, penalty magnitude, etc. Hidden layers compute the interaction of these factors, while the output layer generates priority estimates for each wagon. The model classifies wagons into four priority classes: ordinary, medium, high, and exceptional, determining the magnitude of absolute priority. This approach allows for accurate forecasting of the sensitivity of the wagon processing process to control actions to ensure that a maximum number of wagons can catch up with the schedule and avoid penalty sanctions.

The article's conclusion emphasizes the importance of the developed model for further automating the management process of technical stations to avoid delays in cargo delivery and penalty sanctions.

Keywords: on-time cargo delivery, wagon processing priority, automation of technical station management, uncertainty, neural network model.

Пархоменко Лариса Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Калашнікова Тетяна Юрійівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>. E-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Овсянніков Денис Олександрович, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-8944-3490>. E-mail: darkviz228@gmail.com.

Parkhomenko Larysa, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Prokhorov Viktor, Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Kalashnikova Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway

Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>. E-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Ovsiannikov Denys, master student, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-8944-3490>. E-mail: darkviz228@gmail.com.

Vladyslav Kholiev, Olesia Barkovska

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

MODEL OF THE SPEAKER IDENTIFICATION AND VERIFICATION SUBSYSTEM

Abstract. The paper is focused on the pressing **problem** of authentication and verification of speakers based on voice information, which plays an important role, for example, in online or remote communication and information exchange in all spheres of life, including scientific communication. The **aim** of this paper is to create a model of a speaker identification and verification subsystem. To achieve this goal, the following **tasks** were accomplished: the connection of the modules of the proposed model was explained, the voice information analysis module was explored, while ensuring the scalability of the system with a significant increase in the number of users, and the results were analyzed. The developed pseudo-ensemble-based neural network module was tested on a dataset prepared on the basis of the LibriSpeech corpus, an open English speech corpus based on the LibriVox project of voluntarily provided audio books. The result of applying the developed module on the selected dataset is demonstrated, demonstrating that in order to implement the subsystem in a neural network training system, the proposed pseudo-ensemble should be trained on at least 120 epochs using noise reduction methods at the stage of audio sequence preprocessing.

Key words: machine learning; speaker diarization; classification; pseudo-ensemble; sinenet; librispeech; librivox.

Introduction

Paper [1] presented a system of scientific communication and knowledge sharing for young scientists. The system operates in several modes: data storage, data processing, and voice information access. These modes of operation are enabled by a number of subsystems.

The data processing mode operates on the basis of the following subsystems:

- subsystem of speakers' identification and verification
- subsystem for vectorization of scientific papers
- subsystem for clustering vectorized scientific papers by research topics using the method of textual proximity

The functional diagram of the proposed system of knowledge exchange of young scientists is shown in the figure 1.

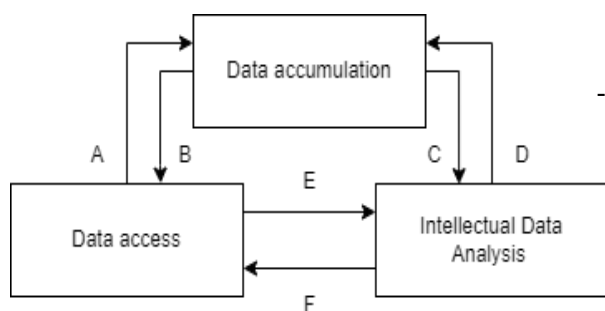


Figure 1 – Functional diagram of the proposed system of knowledge exchange of young scientists. © Vladyslav Kholiev, Olesia Barkovska 2024

When considering the functionality of the system in each mode, it is important to understand what the inputs and outputs of each mode are:

marker A: data is accumulated in the form of user voice data for further training, as well as in the form of electronic documents of scientific papers for vectorization and further clustering of papers similar in topic.

marker B: the repository subsystem receives various requests: for access to scientific papers in various forms, for user data and metadata (for example, for the subsystem that provides social rooms), as well as requests for verification and identification of users.

marker C: the relevant modules receive voice data for training, or classification and research documents for further vectorization and clustering.

marker D: as a result of the analysis mode, neural network models are trained on the basis of voice data and their weights are saved to the repository, and based on the uploaded research documents, their vectorized representation is formed and saved, and the documents themselves are assigned to a group with similar topics.

marker E: if there is a need to identify or verify users, requests are sent with the relevant data (user ID(s) and/or conference IDs, etc.);

marker F: in response to the queries, either individual neural networks or a pseudo-ensemble module is deployed based on the stored weights of the trained networks.

This paper proposes a solution, the results of which can be used in subsystems that maintain virtual conference rooms and security, performing the following functions:

- diarization of a virtual conference by means of speaker identification.
- user authentication by verifying the speaker.

Пропозиція рішення описана у вигляді модуля на основі розподілених нейромережових моделей, які використовують архітектуру SincNet [2].

An important aspect of modern life, present in an increasingly large part of it, is the authenticity of an individual and the ability to verify it. If earlier it was possible to uniquely identify a user by simple data such as email and password, nowadays, with computing power that is many times greater and allows to bypass more and more complex methods of personal identification, such data is not sufficient. For this reason, methods of identity identification and verification based on biometric data, such as fingerprints, retinas, face, and voice, are gaining popularity [3]. Among them, the voice identification method stands out due to its accessibility and convenience for the user.

Audio information plays one of the most widespread and important roles, as it is primarily used for communication and information exchange in all aspects of life, including scientific communication, or rather, inward-facing communication [4-5]. Scientific conferences, symposia, forums, etc. are mostly held in the format of audio reports or discussions accompanied by visual material, usually presentations. However, the accompanying visual material is mostly optional, and the participants' presentations are often designed to be listened to, so all the necessary information is contained in the report.

Diarization is an audio signal processing and transformation process that results in segmentation and labeling of the audio signal according to the sources of sound. In other words, diarization answers the question "who speaks when?" or "what sounds when?". This process generally consists of several stages, such as pre-processing the input audio to improve the quality and accuracy of the result, detecting and splitting the audio stream into segments when an audio event occurs, encoding (embedding) signal characteristics, and further clustering or classification depending on the task [6].

Over the years, algorithms and approaches to individual stages, or even to the process as a whole, have been changing and improving. Modern approaches to diarization include the so-called end-to-end neural diarization, where individual submodules of the traditional speaker diarization system mentioned above can be replaced by one or more neural networks [7-10]. With the rapid development of deep learning and ensemble approaches, this strategy is gaining popularity [11-13]. This paper focuses on the stages of audio classification and labeling.

Diarization is used to solve a variety of applications, such as speaker recognition, audio analysis and segmentation, and others (fig. 2):

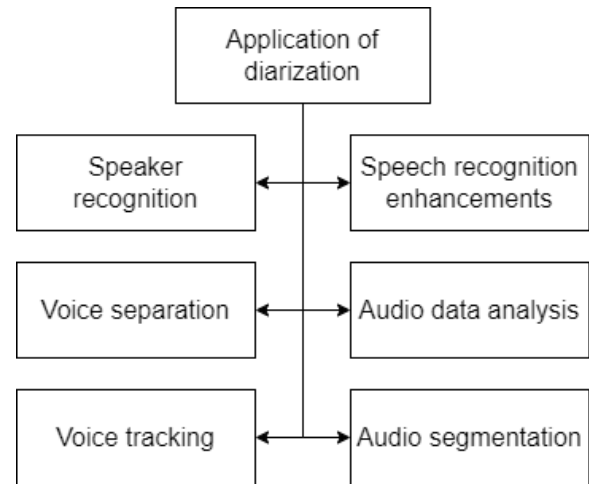


Figure 2 – Applications of diarization.

1. Speaker recognition: Identifying the voices of specific people in an audio recording.
2. Voice separation: Distinguishing between different voice sources in audio data.
3. Voice tracking: Tracking voice sources over time, useful in analyzing dynamic scenarios.
4. Speech recognition enhancement: Improving the accuracy of speech recognition systems by taking into account individual voice characteristics.
5. Audio data analysis: Identification of the time intervals in which speech occurs, as well as pauses and background sounds.
6. Audio segmentation: Dividing an audio recording into segments with homogeneous sound sources.

The aim of the work is to create a model of a speaker identification and verification subsystem. To achieve this goal, the following tasks must be done:

- To substantiate the interconnection of the modules of the proposed model;
- To investigate the module of voice information analysis, taking care to ensure the scalability of the system with a significant increase in the number of users;
- To analyze the obtained results

To accomplish these tasks, we propose a method of analyzing voice information based on artificial neural networks represented by a neural network pseudo-ensemble using the convolutional network SincNet. This method is a component of the voice information analysis module of the proposed model of the speaker identification and verification subsystem.

Materials and methods

The speaker identification and verification subsystem consists of the following modules:

- voice information analysis module;
- authentication module;

- module for interaction with social and conference rooms; models that receive the same input signal in waveform format in combination with a decision-making algorithm based on a

The paper proposes the analysis of voice information based on a distributed neural network pseudo-ensemble, which is a collection of individual, independent neural network

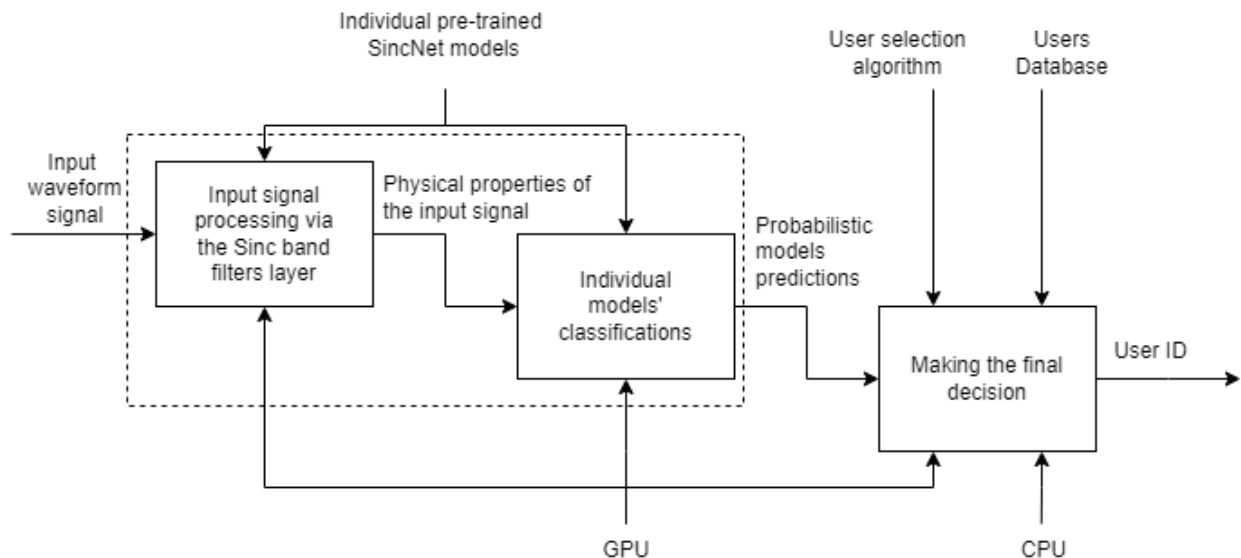


Figure 3 – Generalized block diagram of the speaker identification and verification module.

The function block (FB) processes the input signal through a layer of filters based on the mathematical filtering function sinc works on the basis of pre-trained SincNet networks [2]. SincNet is a CNN architecture in which the first layer is replaced by a convolution with sinc filters (fig. 4).

Unlike similar approaches, the SincNet network receives the signal in its original form, and bandpass filters are used as convolutions, the parameters of which are determined by the network during training. For each filter, only 2 parameters are trained - the high and low frequencies. Thus, the network learns data in the context of only certain frequency ranges, while working with the original signal, which reduces the necessary preprocessing.

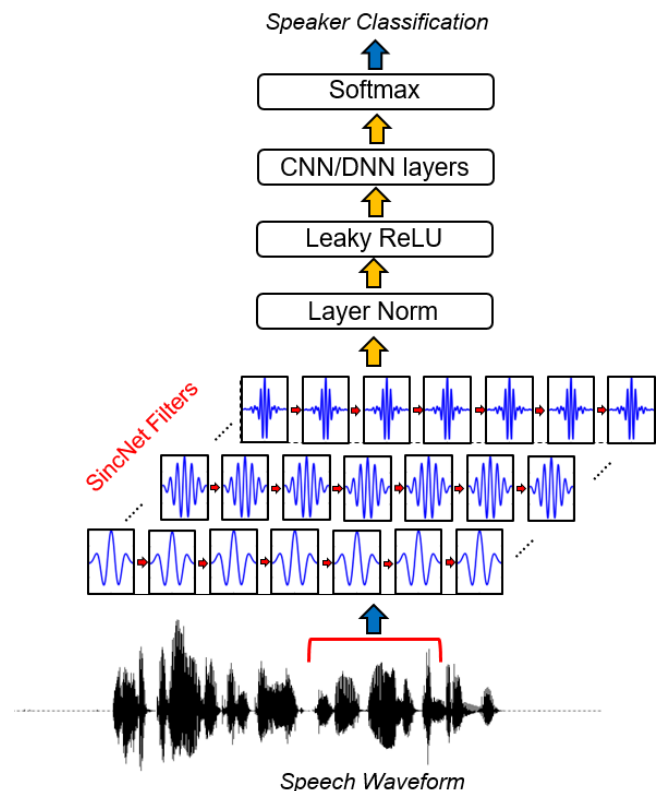


Figure 4 – SincNet model architecture [2, p.2]

Bandpass filters themselves are represented as the difference of two low-pass filters, and when translated into the time domain, the filter is the difference of two sine functions. Multiplying the original signal by the resulting convolution is equivalent to selecting a signal of a certain frequency band.

Thus, at the first level, SincNet learns filters with physical content based on the input signal in the audio waveform format. This approach provides SincNet with a number of advantages over conventional CNNs, such as

faster convergence, fewer parameters, and less noisy filters (fig. 5).

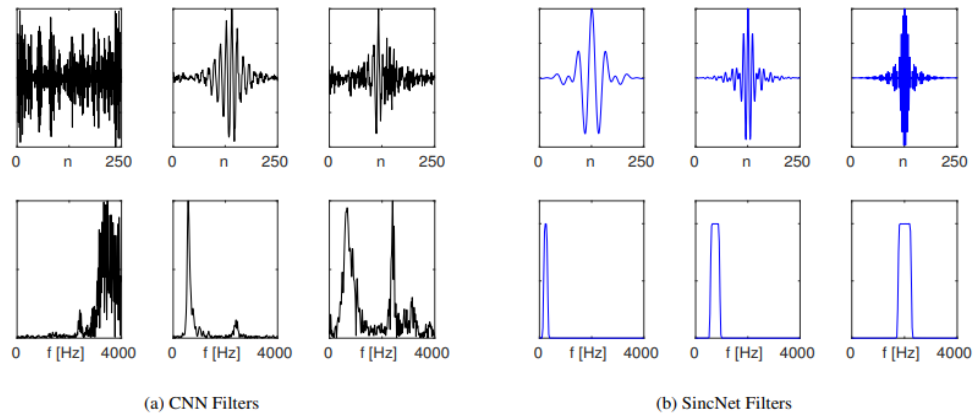


Figure 5 – Examples of filters learned by standard CNN and SincNet (using the Librispeech corpus). The first row shows the performance of the filters in the time domain, and the second line shows their amplitude-frequency response [2, p.4].

The final decision-making FB works as follows: each of the models in the system is fed the same audio stream as input, after which each of the models performs a binary classification (despite the basic capabilities of SincNet to perform multi-class classification). Each neural network trained to recognize a single speaker gives a numerical probability value of the speaker's belonging to the neural network class (user ID). After that, the probabilistic assumptions of individual models are collected into a collection and a decision is made at the third stage of the module (fig. 6). When interpreting the result, the weighted voting method is used, i.e., the class is determined by the number of the neural network that showed the maximum value at the output.

$$Id = \max([p_1, p_2, \dots, p_n]), \quad (1)$$

where Id – internal identifier of the neural network, which corresponds to the internal identifier of the user,

p_x – probabilistic score of an individual neural network obtained as a result of classification,

$n[1, x]$ – the number of neural networks (corresponding to the number of users) in the pseudo-ensemble at a particular point in time.

This algorithm is dictated by both the system concept and the intended generalized use case – only one model should identify the user, while the others should demonstrate low scores.

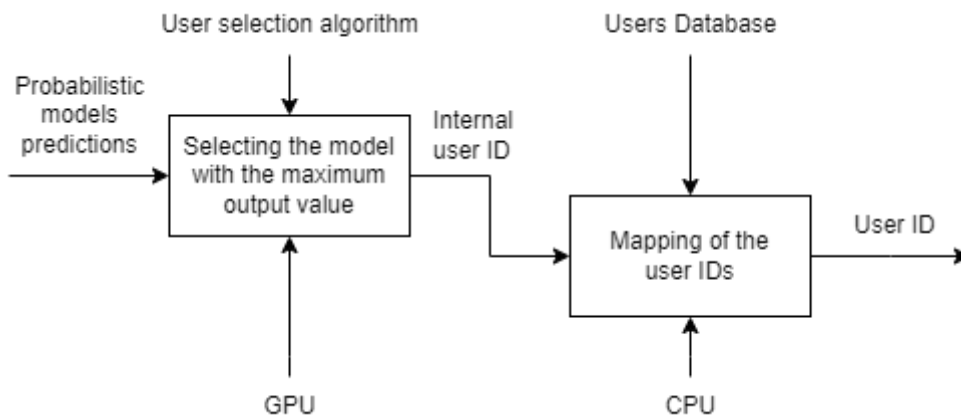


Figure 6 – Decision-making algorithm at the module level.

This approach provides flexibility and supports the idea of system modularity, as well as ensures that the system responds with a low degree of error in the event that more than one neural network has given a high probability of the input signal belonging to their user class (for example, if there are people with similar voices among users).

Experiments

As a dataset, we chose a dataset that was independently generated on the basis of the LibriSpeech

corpus [14], which, in turn, was generated on the basis of the LibriVox audiobook project [15], which is in the public domain, or rather its segments in English.

The corpus is divided into several parts, available separately: a test sample in a single archive, as well as a

training sample in three archives – 100-, 300-, and 500-hour archives. In total, the corpus includes 982 hours from 2338 speakers.

Table 1. – *Data subsets in LibriSpeech*

subset	hours	per-speaker minutes	female speaker	male speaker	total speaker
dev-clean	5.4	8	20	20	40
test-clean	5.4	8	20	20	40
dev-other	5.3	10	16	17	33
test-other	5.1	10	17	16	33
train-clean-100	100	25	125	126	251
train-clean-360	363	25	439	482	921
train-other-500	496	30	564	602	1166

The authors of the corpus have created several annotation files: matching speakers and their characteristics with the subsets to which they are assigned, matching speakers and chapters of books whose records were taken for the corpus, and matching the books themselves with their identifiers used in other annotation files.

From these parts, subsets of 100 and 300 hours were taken, totaling 464.2 hours and 1172 speakers, which is approximately half of the total volume.

Initially, the corpus was created for the task of speech recognition, as well as identification and/or classification of certain characteristics of speakers (age, gender, etc.). To create the corpus, two stages of alignment were first performed using a variety of tools and speech models [9], which were aimed at dividing the recordings into

fragments and removing recordings that contained discrepancies with the text due to human error (inclusions, substitutions, deletions, and permutations). These alignment steps resulted in approximately 1200 hours of recordings up to 35 seconds long, after which the data was segmented into smaller fragments based on pauses of at least 0.3 seconds. The test data was segmented similarly to the training data, but with the additional condition of splitting fragments only at sentence boundaries to better model language usage.

Due to additional pre- and post-processing stages, the balance of speakers' genders was ensured, and cases of recordings with multiple speakers were eliminated (by filtering individual recordings as well as certain genres that by their nature lend themselves to multi-speaker recordings).

ID	SEX	SUBSET	MINUTES	NAME
14	F	train-clean-360	25.03	Kristin LeMoine
16	F	train-clean-360	25.11	Alys AtteWater
17	M	train-clean-360	25.04	Gord Mackenzie
20	F	train-other-500	30.07	Gesine
23	F	train-clean-360	25.23	Anita Roy Dobbs
25	M	train-other-500	30.16	John Gonzalez
26	M	train-clean-100	25.08	Denny Sayers
27	M	train-clean-100	20.14	Sean McKinley
28	F	train-clean-360	25.03	Kristin Hughes
29	M	train-other-500	30.10	Linton
31	M	train-other-500	23.79	Martin Clifton
32	F	train-clean-100	24.01	Betsie Bush
36	M	train-other-500	25.85	Chip
...				
8824	M	train-clean-360	25.21	Mark Johnston
8825	F	train-clean-360	23.93	Erin Schellhase
8838	M	train-clean-100	25.06	Kevin Owens
8855	M	train-clean-360	25.01	Eric Metzler
8975	F	train-clean-100	25.11	Daisy Flaim
9022	F	train-clean-360	25.17	Claire M
9023	F	train-clean-360	25.19	P. J. Morgan
9026	F	train-clean-360	21.75	Tammy Porter

Listing. 1. – A fragment of one of the annotation files

As mentioned in Section 3.3, each of the models in the system is fed the same audio stream. This is done in the

same way as in [2], i.e., each audio recording with a speaker is divided into short fragments (up to 200 ms) to

ensure that only one speaker is present in one audio fragment, and fed to the inputs of individual models. Other parameters and initialization values are also used similar to those presented in the original work, as they are good baseline values, namely: 80 filters of length 251 were used for the band pass filter layer, with the Xavier initialization method.

As a result, a vector of predictions from individual models is obtained for each fragment and the class with the highest probability is selected. Based on the classes, most

fragments are assigned a speaker class for recording. For example, if the output of the module is a vector of output values [0.2, 0.6, 0.4], the second component of the vector has the maximum value. So, the class to which this example belongs will be 2.

Results

The results of the tests are provided in Table 2.

Table 2. – Багатофакторна матриця планування тестів

Test	Number of speakers	Number of epochs	Levels of additional noise, dB	Average accuracy
1	2	60	0	94.02
2			25	92.13
3			50	74.14
4		80	0	95.16
5			25	93.67
6			50	91.17
7		120	0	98.70
8			25	96.36
9			50	93.60
10	5	60	0	93.45
11			25	92.07
12			50	71.34
13		80	0	94.80
14			25	92.15
15			50	89.92
16		120	0	98.55
17			25	96.03
18			50	93.77
19	10	60	0	93.33
20			25	91.21
21			50	71.04
22		80	0	94.32
23			25	92.58
24			50	89.27
25		120	0	98.47
26			25	96.63
27			50	93.89

As shown in the multifactorial planning table, 27 tests were conducted, which differed in the following factors:

- number of speakers (varies from two to ten);
- number of epochs (60, 80, 120) during which the neural networks were trained;
- three levels of additional noise (no noise, 25dB, and 50dB).

The accuracy of the entire pseudo-ensemble is calculated using the arithmetic mean formula:

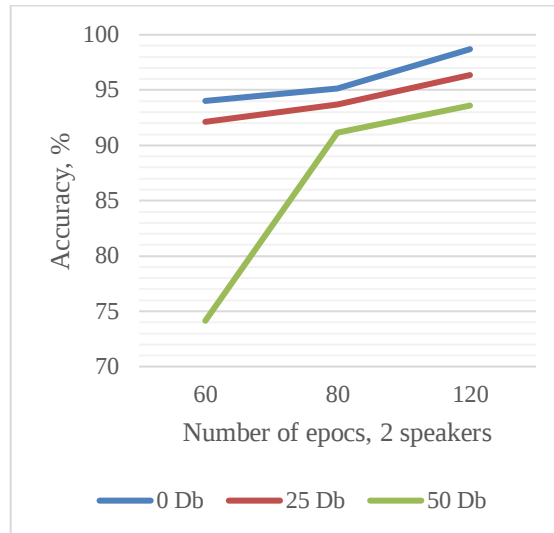
$$Acc_{avg} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K Acc_i, \quad (2)$$

where Acc_{avg} is arithmetic mean of the accuracy of individual neural networks,

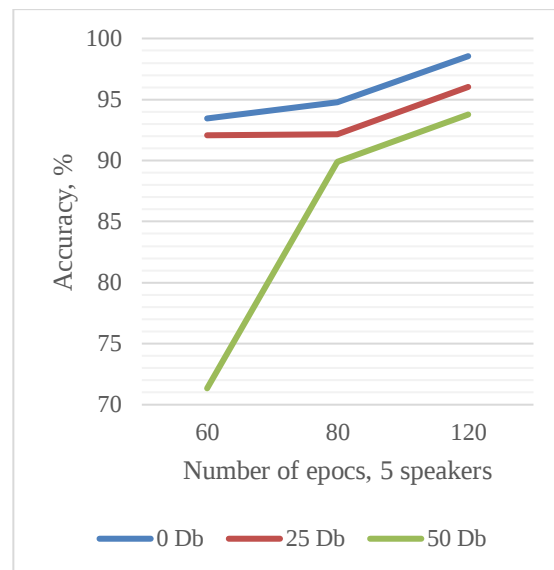
Acc_x – accuracy index of an individual neural network,

$\overline{K[1, x]}$ – the number of neural networks (corresponding to the number of users) in the pseudo-ensemble at a particular time.

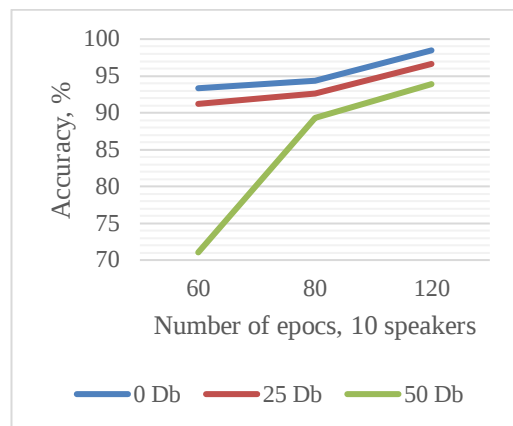
It is apparent that there is a correlation between accuracy, noise level, number of epochs, and number of speakers, especially in the effect of noise level, which suggests the need to pay more attention to noise reduction and isolation of the speaker's audio.



(a) 2 speakers



(б) 5 speakers



(в) 10 speakers

Figure 7 – Graphs of accuracy versus noise level for different number of epochs

With an increase in epochs, the accuracy rate increases by an average of 10.3%, which is logically consistent with the principles of deep learning, according to which longer training time leads to better learning of features, which in turn results in a better accuracy rate.

At the same time, as the level of speakers increases, the accuracy slightly decreases by 0.91% on average, as more networks lead to more errors.

The effect of noise level on accuracy is negative. As the noise level increases, the accuracy drops by 10.2% on average, regardless of the number of epochs and speakers.

Conclusions

In this paper, a model of the voice information analysis module of the speaker identification and verification subsystem was proposed, which will be used in the virtual conference room and security subsystems to perform diarization and authentication functions. This will ensure the scalability of the subsystem with an increased number of users, thanks to the proposed method of analyzing voice information based on artificial neural networks, represented by a neural network pseudo-ensemble using the convolutional network SincNet, which is capable of replacing individual neural network models in its composition, which in turn eliminates the need to re-train a single neural network model for each new user (assuming that the volume of users to be added is calculated in hundreds), as well as greater reliability and robustness.

The obtained results show the negative impact of noise on the quality of speaker classification (on average by 10.2% when the noise increases from 0dB to 50dB), which is partially compensated for by increasing the training epochs of the neural networks that make up the proposed pseudo-ensemble (on average by 10.3% when the number of training epochs increases from 60 to 120). This allows us to conclude that in order to implement the subsystem in the system, training of neural networks as part of the proposed pseudo-ensemble should be performed at least on 120 epochs, using noise reduction methods at the stage of audio pre-processing.

Since the main focus of the work was on the classification stage itself, future improvements will be focused on the decision-making unit, and more specifically on the ability to support simultaneous speech by multiple speakers, as well as combining the proposed module with audio signal pre-processing approaches to ensure the best performance of the module.

References

1. Холєв В., Барковська О. COMPARATIVE ANALYSIS OF NEURAL NETWORK MODELS FOR THE PROBLEM OF SPEAKER RECOGNITION //СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОМИСЛОВОСТІ. – 2023. – №. 2 (24). – С. 172-178.
2. Ravanelli, M., Bengio, Y. (2018), "Speaker Recognition from Raw Waveform with SincNet", 2018 IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT), Athens, Greece, P. 1021–1028. DOI: <https://doi.org/10.1109/SLT.2018.8639585>
3. Olesia, B., Iana, M., Nataliia, Y., Oleksii, L., & Danyil, T. (2019). System of individual multidimensional biometric authentication. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 7(12), 812-817.
4. Illingworth, S.; Allen, G. (2020), "Introduction", Effective science communication: a practical guide to surviving as a scientist (2nd ed.), Bristol, UK; Philadelphia: IOP Publishing. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-2520-2ch1>
5. Côté, I., Darling, E. (2018), "Scientists on Twitter: Preaching to the choir or singing from the rooftops?", FACETS, 3. P. 682–694. DOI: <https://doi.org/10.1139/facets-2018-0002>
6. Mane, A., Bhopale, J., Motghare, R., & Chimurkar, P. An Overview of Speaker Recognition and Implementation of Speaker Diarization with Transcription. International Journal of Computer Applications, 975, 8887.
7. Kahn, J., Lee, A., & Hannun, A. (2020, May). Self-training for end-to-end speech recognition. In ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 7084-7088). IEEE.
8. Fujita, Y., Kanda, N., Horiguchi, S., Xue, Y., Nagamatsu, K., & Watanabe, S. (2019, December). End-to-end neural speaker diarization with self-attention. In 2019 IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU) (pp. 296-303). IEEE.
9. Fujita, Y., Kanda, N., Horiguchi, S., Nagamatsu, K., & Watanabe, S. (2019). End-to-end neural speaker diarization with permutation-free objectives. arXiv preprint arXiv:1909.05952.
10. Horiguchi, S., Fujita, Y., Watanabe, S., Xue, Y., & Nagamatsu, K. (2020). End-to-end speaker diarization for an unknown number of speakers with encoder-decoder based attractors. arXiv preprint arXiv:2005.09921.

11. Park T. J. et al. A review of speaker diarization: Recent advances with deep learning //Computer Speech & Language. – 2022. – Т. 72. – С. 101317.
12. Dhanjal, A. S., & Singh, W. (2023). A comprehensive survey on automatic speech recognition using neural networks. Multimedia Tools and Applications, 1-46.
13. Alharbi, S., Alrazgan, M., Alrashed, A., Alnomasi, T., Almojel, R., Alharbi, R., ... & Almojil, M. (2021). Automatic speech recognition: Systematic literature review. IEEE Access, 9, 131858-131876.
14. Kholiev, V., Barkovska, O. (2023), "Analysis of the of training and test data distribution for audio series classification", Information and control systems at railway transport, No. 1, P. 38-43. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v28i1.276343>
15. V. Panayotov, G. Chen, D. Povey and S. Khudanpur, "Librispeech: An ASR corpus based on public domain audio books," 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2015, pp. 5206-5210, doi: 10.1109/ICASSP.2015.7178964.

Барковська Олеся Ю'ївна – кандидатка технічних наук, доцентка кафедри “Електронно обчислювальних машин”, Національний університет радіоелектроніки «ХНУРЕ», Харків, Україна;

Vladyslav Kholiev – Professor Assistant at Electronic Computers Department, Kharkiv National University of Radio Electronics "NURE", Kharkiv, Ukraine.

e-mail: vladyslav.kholiev@nure.ua;

ORCID

ID: <https://orcid.org/0000-0002-9148-1561>.

Olesia Barkovska - Assoc. Professor at Electronic Computers Department, Kharkiv National University of Radio Electronics "NURE", Kharkiv, Ukraine.

e-mail: olesia.barkovska@nure.ua; ORCID

ID: <https://orcid.org/0000-0001-7496-4353>

Received (Надійшла) 15.12.2023.

Модель підсистеми ідентифікації та верифікації спікерів

Vladyslav Kholiev, Olesia Barkovska

Анотація. Робота присвячена актуальній **проблемі** автентифікації та верифікації спікерів за голосовою інформацією, що відіграє важливу роль, наприклад, при онлайн чи дистанційному спілкуванні та обміні інформацією в усіх сферах життя, включаючи наукову комунікацію. **Метою** даної роботи є створення моделі підсистеми ідентифікації та верифікації спікерів. Для досягнення цієї мети були виконані наступні **задачі**: обґрунтовано зв'язок модулів запропонованої моделі, досліджено модуль аналізу голосової інформації, з дотриманням забезпечення масштабування системи при значному збільшенні кількості користувачів та проаналізовано отримані результати. Розроблений нейромережвий модуль на основі псевдо-ансамблю був протестований на наборі даних, що був підготовлений на основі корпусу LibriSpeech – відкритого корпусу англійського мовлення, заснованого на проекті добровільно наданих аудіокниг LibriVox. Продемонстрований результат застосування розробленого модуля на обраному наборі даних, який показує що для імплементації підсистеми в систему навчання нейронних мереж у складі запропонованого псевдо ансамблю повинно виконуватися не менш ніж на 120 епохах, використовуючи методи шумопригнічення на етапі попередньої обробки аудіоряду.

Ключові слова: machine learning; speaker diarization; classification; pseudo-ensemble; sincnet; librispeech; librivox

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Холєв Владислав Олександрович – асистент кафедри “Електронно обчислювальних машин”, Національний університет радіоелектроніки «ХНУРЕ», Харків, Україна;

УДК 656.2:004.738.5.01

DOI: 10.18664/ikszt.v29i1.300979

ГОЛОВКО Т. В., к.т.н., доцент, Український державний університет залізничного транспорту

ДЕМЧЕНКО І. С., аспірант, Український державний університет залізничного транспорту

Теоретико-методологічні засади організації системи інтермодальних перевезень в умовах інтероперабельності

Анотація. У статті автори дослідили теоретичні та методологічні засади організації інтермодальних перевезень вантажів в Україні відповідно до європейських стандартів. Шляхом ретельного аналізу літератури було виявлено шість різних підходів, які акцентують увагу на принципах координації, інтеграції технологій і планування організації системи інтермодальних перевезень. На підставі цих уявлень автори запропонували новий фреймворк, адаптований до викликів, визначених у «Національній транспортній стратегії до 2030 року». Цей підхід відповідає стратегічним завданням і гармонійно інтегрується з загальноєвропейською системою інтермодальних перевезень вантажів. Авторська система фокусується на ключових принципах — ефективності, сталості, економічності, зручності, безпеці та інтероперабельності — і підтримується високотехнологічним інструментарієм. Потенційні результати включають підвищення ефективності системи та поліпшення ефективності взаємодії.

Ключові слова: інтермодальні перевезення, інтероперабельність, система організації інтермодальних перевезень, принципи інтермодальних перевезень.

Вступ.

У постійно змінному світі глобальної торгівлі і транспорту ефективність логістики вантажів набуває великого значення. Україна, розташована на перехресті основних міжнародних транспортних маршрутів, наразі зіткнулася з завданням оптимізації своєї системи перевезень вантажів. Інтермодальні перевезення, незважаючи на свій значний потенціал, становлять лише маргінальну частину транспортного ринку України. На сьогодні вони складають менше 0,5 % загального обсягу перевезень, відстаючи від країн-членів ЄС та інших розвинених держав [1].

Актуальність вирішення цього розриву підкреслюється в затвердженні «Національної транспортної стратегії України до 2030 року» [1], де визначено конкретні цілі щодо частки перевезення вантажів із використанням інтермодальних транспортних одиниць. Амбіційним завданням є досягти обсягів не менше 10 % до 2025 року та 20 % до 2030 року загальних перевезень.

У статті ми опрацюємо формування теоретичних і методологічних основ для організації системи інтермодальних перевезень вантажів в Україні. Структурований аналіз буде ретельно розглядати наявні теоретичні підходи, зосереджуючись на ключових принципах, таких як інтероперабельність.

Крім того, ми розглянемо графовий метод [2], спеціально розроблений для технології контейнеризації в системі інтермодальних перевезень вантажів.

Запропонована теоретична концепція має на меті не лише вирішити проблему неефективності поточної системи, але й відповідати стратегічним цілям, визначеним у Національній транспортній стратегії. Підвищення ефективності всієї транспортної мережі та спрямування на покращення взаємодії – це ключові аспекти запропонованого підходу.

Важливість цього зусилля зумовлена поточними проблемами української системи інтермодальних перевезень вантажів. Незважаючи на те, що Україна межує з Транс'європейською транспортною мережею (TEN-T), спостерігається низький рівень її інтероперабельності та загальне технологічне відставання від TEN-T.

Мета статті.

Проведений аналіз і теоретико-методологічні засади для організації системи інтермодальних перевезень вантажів мають на меті стати стратегічним планом для оптимізації транспортної системи України.

Акцентуючи увагу на нинішніх проблемах і використовуючи визначені можливості, запропонований підхід допоможе в реалізації сформульованих завдань у Національній транспортній стратегії.

Метод дослідження.

Для огляду літератури ми використовуємо метод критичного інтерпретативного синтезу (CIS) [3], щоб ретельно оцінити різні теоретичні підходи до системи інтермодальних перевезень вантажів. Метод CIS впливає з його здатності надавати всебічну оцінку переваг і обмежень різноманітних теоретичних рамок. Обробка літератури з критичною увагою, питання базових припущень і взаємодія між доказами і теорією роблять CIS міцним інструментом для аналізу, який дає змогу перетворити його на дієвий інсайт для розроблення авторських теоретико-методологічних засад удосконалення системи інтермодальних перевезень вантажів.

Огляд літератури.

Під час дослідження теоретико-методологічних засад системи інтермодальних перевезень вантажів ми проаналізували різні теоретичні підходи [1, 4—12]. Цей синтез базується на працях як українських, так і зарубіжних учених, що є ключовим аспектом, оскільки Україна адаптується до європейської системи інтермодальних перевезень вантажів. Нижче наведено деякі авторські підходи, на основі яких здійснювалося формування авторських теоретико-методологічних засад щодо формування системи організації інтермодальних перевезень.

Підхід 1. Принципи, викладені в *National Urban Freight Planning Principles* [9], підкреслюють стратегічне планування, захист інфраструктури, ідентифікацію об'єктів, ефективну експлуатацію, доступний дизайн, надання зручностей і гнучке адаптування. Підхід є всеосяжним і передбачає висновковий теоретичний каркас. Проте успішна реалізація потребує вирішення складнощів координації, конфліктів використання землі, викликів розподілу ресурсів і можливого опору до адаптації.

Підхід 2. Цей підхід [4] передбачає принципи планування вантажоперевезень у містах, зосереджуючись на стратегічному плануванні, захисті інфраструктури, ідентифікації об'єктів, ефективній експлуатації, доступному дизайні, наданні зручностей і гнучкому адаптуванню, акцент зроблено на довгостроковому баченні – позиціонується як цінний для сталого управління вантажоперевезеннями у містах.

Підхід 3. Документ [1] висвітлює проблеми транспортної системи України, включаючи низький технологічний розвиток, обмежену конкурентоспроможність на світових ринках і низький відсоток інтермодальних і мультимодальних перевезень. У документі запропоновано масову контейнеризацію, інтероперабельності та вдосконаленні технологій.

Підхід 4. Цей теоретичний підхід [11] описує правила, засновані на «принципі мережі», які визначають юридичний захист перевізників від ризиків під час інтермодальних перевезень; але цей підхід не надає практичних інструментів для вирішення цього питання. Для комплексного аналізу цієї рекомендації потрібен додатковий контекст чи деталі.

Підхід 5. У підході [12] наголошено на розробленні національних програм мультимодальних

перевезень, фінансовому реалізмі, ефективному використанні коштів ЄС та залученні приватного сектора. Серед викликів — координація, фінансова стійкість і участь приватного сектора. Успішно впроваджений, він може сприяти міцній транспортній інфраструктурі.

Підхід 6. Український автор [13] наводить принципи, акцентуючи на єдиному комерційно-правовому режимі, покращеному перевезенні вантажів, спрощених митних процедурах і розробленні комплексної тарифної політики. Рекомендує координацію, технологічні досягнення та співпрацю для здобуття конкурентної переваги.

Загалом підходи відрізняються в акцентуванні на принципах та інструментах, але спільні теми включають необхідність координації, інтеграції технологій та участі приватного сектора для успішної системи інтермодальних вантажоперевезень. Складнощі впровадження підкреслюють важливість вирішення логістичних проблем, фінансової стійкості та опору до адаптації. Усе це підкреслює важливість формування індивідуального підходу до теоретичних і методологічних засад організації системи інтермодальних вантажоперевезень із такими невід'ємними складовими, як принципи, інструменти для їхньої підтримки та можливі результати.

Здійснивши ретельний аналіз теоретичних підходів щодо організації інтермодальних перевезень вантажів, ми визначили ключові принципи, що становлять основу ефективної системи. Ці принципи включають ефективність, сталість, економічність, гнучкість, безпеку, а також критичний акцент на інтероперабельності.

Інсайти, отримані з різних теоретичних підходів, дають змогу нам сформувати пропозицію власної структури, яка відповідає унікальним викликам і цілям, визначеним у «Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року». Наш підхід не лише відповідає стратегічним завданням, визначеним у документі, але й інтегрується з загальноєвропейською системою інтермодальних перевезень вантажів.

Цей індивідуально розроблений підхід фокусується на двох важливих складових: принципах та інструментах, необхідних для їхнього сталого застосування. Базові принципи організації системи інтермодальних перевезень в умовах інтероперабельності, які ми пропонуємо, — ефективність для покращення продуктивності (efficiency), сталість для відповідальності перед середовищем (sustainability), економічність для економічної життєздатності (cost-effectiveness), гнучкість для адаптації до динамічних сценаріїв (flexibility), невідмовна увага до безпеки (safety and security), що базується на безперервній взаємодії (interoperability).

Під умовами інтероперабельності транспортних систем розуміють забезпечення того, що різні види транспорту (залізничний, дорожній, морський і повітряний) можуть безперешкодно з'єднуватися і обмінюватися вантажем без значних логістичних або технічних перешкод. Це може включати стандартизацію процедур обробки вантажу, сумісні системи контейнерів, сумісні технології відстеження і

трасування, а також координовані механізми планування маршрутів по різних мережах транспорту.

Для підтримання цих принципів **ми пропонуємо використовувати комплекс високотехнологічних інструментів**, таких як прогнозування аналітики (predictive analytics), стратегії розподілу ресурсів (resource allocation), алгоритми оптимізації маршруту (route optimization), механізми відстеження в реальному часі (real-time tracking) і моделювання графіків (graph modeling). Ці інструменти разом утворюють механізм, що сприяє потужності нашої системи та вирішенню виявлених проблем і прискорює досягнення визначених цілей.

Можливі результати використання цих принципів, підкріплених вправним застосуванням обраних нами інструментів, двоєдині — підвищення ефективності системи (increased system efficiency) і покращення

ефективності взаємодії (effectiveness of interoperability). Далі ми глибше розглянемо деталі кожного компонента, розкриваючи їхню важливість для перетворення ландшафту інтермодальних перевезень вантажів. Для візуалізації цього комплексного підходу ми використовуємо Y-shaped matrix [14] — потужний інструмент, який узагальнює взаємозв'язок наших принципів та інструментів, пропонуючи візуальний наратив для чіткого розуміння нашої інноваційної методології. Інтегруючи теоретичні інсайти з практичними методами, наш підхід може сприяти досягненню нового рівня ефективності та сталості національних вантажоперевезень, як показано на рисунку.

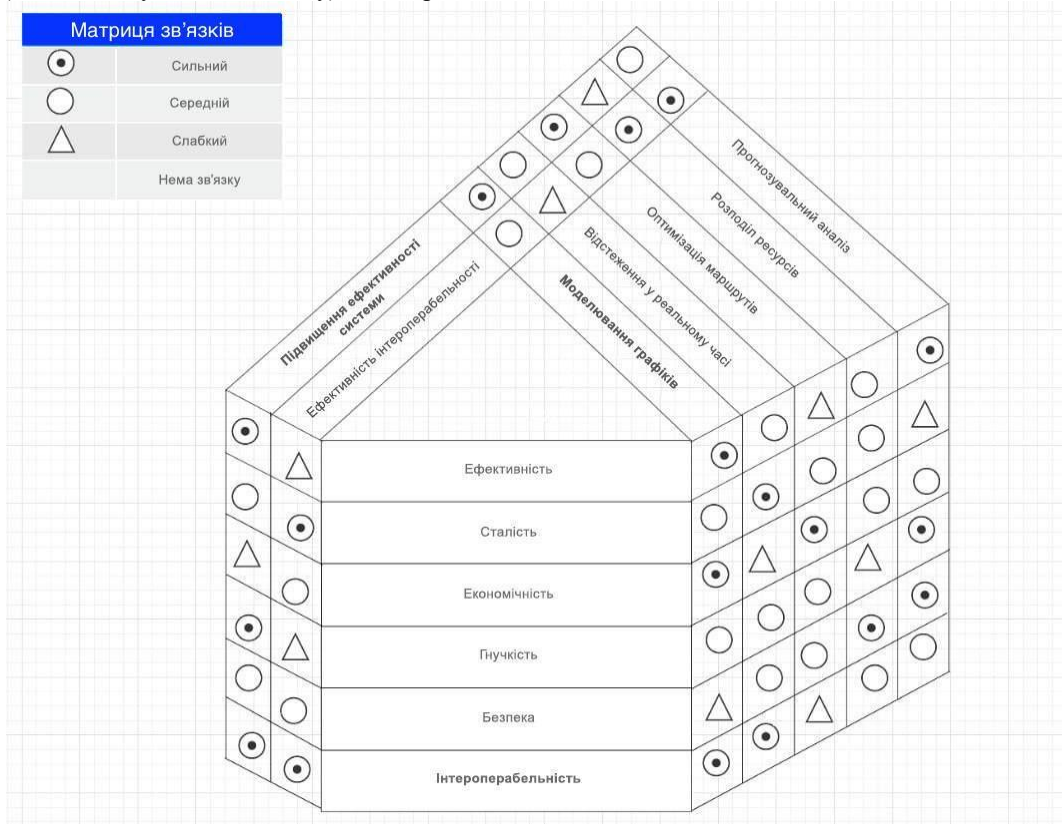


Рис.1- Авторський підхід до організації системи інтермодальних перевезень в умовах інтероперабельності

Цей інструмент служить не лише візуалізацією нашого комплексного підходу, але й ілюстрацією рівня взаємозв'язків між різними складовими: принципами, інструментами та результатами. Ці зв'язки можуть бути сильними (strong), середніми (medium) або слабкими (weak), відображуючи ступінь взаємодії між основними складовими нашої методології.

Оцінювання міцності зв'язку між різними складовими системи базується на існуючих теоретичних підходах, зазначених вище. Одним із показників, який суттєво вплинув на нашу експертну думку при встановленні рівня зв'язку, є частота використання певного інструменту для підтримання того чи іншого принципу та досягнення бажаного результату. Наприклад, для аналізу зв'язку між принципом інтероперабельності та інструментом моделювання графіка є частота використання цього інструменту для оптимізації маршрутів і планування перевезень у світовій і національній транспортній галузі. З огляду на те, що логістичні маршрути повсюдно плануються за допомогою цього методу, можна стверджувати, що зв'язок є сильним.

Ця важлива характеристика дає додаткове розуміння того, як складові співвідносяться та взаємодіють, сприяючи узгодженню і розгортанню нашого підходу в практиці.

Існує міцний зв'язок між принципом «інтероперабельності» та «відстеженням у реальному часі». Особливий акцент на технології відстеження в реальному часі дає змогу системі ефективно взаємодіяти з рухомим вантажем, що підсилює безпеку, і оперативно реагувати на будь-які зміни чи проблеми, що виникли.

Застосування інструменту «оптимальних транспортних маршрутів» сприяє покращенню прогнозування доставлень і оптимізації витрат ресурсів.

Зв'язок між принципом «інтермодальності» і інструментом «розподіл ресурсів» полягає в тому, що принцип «інтермодальності» спрямований на оптимізацію використання різних видів транспорту для ефективного переміщення вантажів. Це передбачає інтеграцію різних транспортних систем і координацію їхньої роботи. Інструмент «розподіл ресурсів» застосовується для ефективного використання обмежених ресурсів (час, гроші, праця тощо) для досягнення цілей. Можливими критеріями для оцінювання оптимального використання ресурсів і поліпшення узгодженості вантажних процесів є витрати на транспортування, час доставлення, ступінь навантаження, надійність тощо.

Інструмент «прогнозувальний аналіз» використовують для аналізу даних і встановлення тенденцій, що допомагає прогнозувати попит на транспортні послуги та оптимізувати маршрути доставлення. Отже, прогнозувальний аналіз допомагає реалізувати принцип інтермодальності шляхом забезпечення точних та ефективних виборів транспортних маршрутів на основі передбачень майбутнього попиту і умов.

Цей підхід сприяє не лише підвищенню продуктивності взаємодії, але й забезпечує гнучкість

управління та адаптації до змінних умов і вимог. Такий комплексний підхід до моделювання і відстеження в реальному часі може визначати стратегії і технології контейнеризації, що підвищують рівень ефективності та ефективності системи взаємодії вантажоперевезень.

Висновки.

Дослідження ґрунтується на теоретичних засадах і стратегіях організації інтермодальних вантажних перевезень в Україні відповідно до європейських стандартів. Огляд літератури розглядає різні теоретичні підходи та визначає ключові принципи і виклики. Запропонований нами підхід полягає в комплексному поєднанні теоретичних принципів із практичними методами, спеціально розробленими для вирішення викликів сучасних інтермодальних вантажних перевезень. На відміну від існуючих, наш підхід підкреслює не лише теоретичні концепції, а й використання передових технологічних інструментів для моніторингу в реальному часі, прогностичного аналізу і розподілу ресурсів, візуально поданих у вигляді Y-shaped matrix. Це сприяє розумінню взаємозв'язків між принципами, інструментами і результатами системи інтермодальних перевезень в умовах інтероперабельності.

Список використаних джерел

1. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 р. № 430-р : станом на 3 трав. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> (дата звернення 04.01.2024).
2. Mates W. C., Frazzon E. M., Ehm J. A Graph Model for the Integrated Scheduling of Intermodal Transport Operations in Global Supply Chains. *Dynamics in Logistics*. 2013. P. 301–311.
3. Critical interpretive synthesis: what it is and why it is needed | Colloquium Abstracts. Home | Colloquium Abstracts. URL: <https://abstracts.cochrane.org/2006-dublin/critical-interpretive-synthesis-what-it-and-why-it-needed> (дата звернення: 04.01.2024).
4. Crainic T. G. Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*. 2000. Т. 122, № 2. Р. 272–288. URL: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00233-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00233-7) (дата звернення 04.01.2024).
5. Special report 08/2023: Intermodal freight transport: EU still far from getting freight off the road. Publications office of the European Union. 2023. 69 с.
6. Integration of Traffic Management and Traveller Information Systems: Basic Principles and Case Study in Intermodal Transport System Management / H. Ezzedine та ін. *International Journal of Computers Communications & Control*. 2008. Т. 3, № 3. С. 281. URL: <https://doi.org/10.15837/ijccc.2008.3.2396> (дата звернення 04.01.2024).

7. KOTLUBAI O. M., LYPYNSKA O. A. THE WAYS OF MULTIMODAL AND INTERMODAL SHIPMENT STATE POLICY DEVELOPMENT IN UKRAINE. *Economic innovations*. 2018. Т. 20, № 2(67). С. 77–87. URL: [https://doi.org/10.31520/ei.2018.20.2\(67\).77-87](https://doi.org/10.31520/ei.2018.20.2(67).77-87) (дата звернення 04.01.2024).

8. Monios J., Bergqvist R. *Intermodal Freight Transport and Logistics* / J. Monios, R. Bergqvist. CRC Press. 2017. URL: <https://doi.org/10.1201/9781315177762> (дата звернення 04.01.2024).

9. National Urban Freight Planning Principles. URL: <https://www.freightaustralia.gov.au/sites/default/files/documents/urban-freight-planning-principles.pdf> (дата звернення 04.01.2024).

10. Акімов О. Особливості державного регулювання розвитку транспортного комплексу України. Державне управління: удосконалення та розвиток. 2009. Т. 4. URL: <http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=268> (дата звернення 04.01.2024).

11. Toward Improved Intermodal Freight Transport in Europe and the United States: Next Steps. 1998. URL: https://ops.fhwa.dot.gov/freight/documents/eu_us2.pdf (дата звернення 05.01.2024).

12. Орда О. О. Формування стратегій організації інтермодальних контейнерних перевезень в ланцюгах постачань на принципах кооперації учасників : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.01. Харків, 2019. 22 с. URL: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_Vchena_rada/VR_64_059_02/aref_OrdaA.A.pdf.

13. Піюренко І. О., Гаркуша О. М., Кухарчик О. Г. Сучасні аспекти формування системи мультимодальних перевезень на регіональному рівні. *Ukrainian Journal of Applied Economics*. 2018. Т. 3, № 4. С. 131–144.

14. <https://www.sixsigmadaily.com/matrix-diagram-y-shaped/>.

I. S. Demchenko, T. V. Golovko

Theoretical and methodological principles of the organization of the system of intermodal transportation in conditions of interoperability

Abstract. This article explores the theoretical foundations of intermodal freight transportation in Ukraine, aligning with European standards. The literature review analyzes diverse theoretical approaches, drawing from Ukrainian and international scholars. Six distinctive approaches emphasize

coordination, technology integration, and private sector involvement. Challenges underscore the need to address logistical complexities, financial stability, and resistance to adaptation. A tailored framework is proposed, aligning with Ukraine's challenges outlined in the "Approval of the National Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030." This approach integrates seamlessly with the European intermodal freight transportation system. It centers on principles (efficiency, sustainability, cost-effectiveness, flexibility, safety, and security) and a high-tech toolset (predictive analytics, resource allocation, route optimization, real-time tracking, and graph modeling) to address issues and expedite goal achievement. The outcomes include increased system efficiency and improved interoperability. Subsequent sections detail each component's significance, utilizing the Y-shaped matrix for clarity. Integrating theoretical insights with practical methods, our approach catalyzes a new era of efficiency, sustainability, and uniqueness in freight transportation. In conclusion, the study reviews literature and proposes an integrated framework tailored to Ukraine's challenges, aiming to transform intermodal freight transportation. The conclusion outlines next steps for further refinement and practical implementation.

Keywords: intermodal transportation, interoperability, system of organizing intermodal transport, principles of intermodal transportation.

Демченко Ілля Сергійович, аспірант кафедри Управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна. E-mail: ilya.dem4enko@gmail.com ORCID ID: 0009-0008-6708-9800. +380509388928

Illia Demchenko, post-graduate, Department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ilya.dem4enko@gmail.com <http://orcid.org/0009-0008-6708-9800> +380509388928

Головко Тетяна Владиславівна, к.т.н., доцент кафедри Управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна. E-mail: golovko_tv@kart.edu.ua

ORCID ID: 0000-0002-7977-9664. +380958389172
Tetiana Golovko, PhD (Tech), Department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: golovko_tv@kart.edu.ua +380958389172 <http://orcid.org/0000-0002-7977-9664>

Ковальов Д.Д., аспірант

(Український державний університет залізничного транспорту)

Використання генетичних алгоритмів при плануванні залізничних перевезень у міжнародному сполученні

Стаття розглядає проблеми і перспективи розвитку прикордонних терміналів України з країнами ЄС у воєнний та післявоєнний періоди. Проведено аналіз сучасного стану вантажних перевезень у європейському напрямку, проблеми та коротко- і довгострокові перспективи розвитку залізниць. Залізничний транспорт відіграє ключову сприяючу роль до інтеграції України у європейську транспортну систему. Це відкриває можливості до реалізації плану відбудови та розвитку залізниць.

Ключові слова: залізнична інфраструктура, вантажні перевезення, контейнерні перевезення, генетичні алгоритми, оптимальний маршрут.

Вступ

Незважаючи на потенціал для швидкого розвитку, Україна знаходиться у досить вразливому економічному становищі. Основними проблемами у країні досі залишаються корупція, відкладання проведення реформ та з лютого 2022 року до цього додається війна проти РФ. Станом на осінь 2023 року повномасштабне вторгнення та ведення бойових дій РФ проти України залишається головним негативним чинником, який ускладнює та уповільнює усі економічні та політичні процеси у країні. Однак з іншої сторони теперішня ситуація зміцнює стосунки з країнами ЄС, створює передумови для інвестування у відбудову країни та модернізацію існуючої інфраструктури; оскільки залізничний транспорт України підпадає під дану категорію, доцільно освітити проблеми залізниці та шляхи їх вирішення.

Актуальність

АТ «Укрзалізниця» увійшла у воєнний період як найбільший роботодавець країни зі штатом у 231 тисячу працівників, прибутком у 17 мільйонів доларів у 2021 році, компанія забезпечила 82% вантажних і 50% пасажирських перевезень. На період 2022 з січня до квітня було здійснено перевезень на 65,9 млн тонн вантажів. Порівнюючи з минулим роком (2021), такий показник відповідає шістдесяти дев'яти відсоткам від усіх вантажів, транспортованих залізницею. Водночас у січні-квітні 2022 року залізницею перевезено 7,4 млн пасажирів, що на 1,5 млн пасажирів більше, ніж за відповідний період 2021 року. Найбільший приріст (64%) відбувся у березні 2022 року через евакуацію людей. Таке перевезення було безкоштовним. Водночас, після скорочення та поступового скасування руху евакуаційних поїздів, пасажиропотік суттєво зменшився, як наслідок – у квітні 2022 року було перевезено на 19% менше пасажирів, ніж за аналогічний період попереднього року. Від початку військових подій в Україні залізниця перевезла пасажирськими вагонами у східні регіони більш ніж сім тисяч тонн гуманітарної допомоги. Також розвивається напрямок вантажних перевезень – це понад тисяча чотириста вагонів за місяць з

гуманітарними вантажами із закордону до найбільших українських міст. Укрзалізниця здійснює евакуацію людей: у середньому 3 млн пасажирів на місяць, у тому числі 40 тис. пасажирів – до сусідніх країн. На всіх вузлових станціях пасажирам надається необхідна допомога, вивантажується гуманітарна допомога, здійснюється харчування та спорядження. Водночас через бойові дії відбулося значне падіння вантажопотоків (за 4 місяці 2022 року на 31% порівняно з відповідним періодом 2021 року). Фактично було перервано транзитне сполучення на міжнародних коридорах, що сполучають Азію – Європу. Транзитні перевезення залізницею за час війни (березень-квітень 2022 року) зменшилися проти рівня відповідного періоду 2021 року на 88,4%. Противник постійно завдає прицільних ракетних ударів по інфраструктурі Укрзалізниці. Станом на п'яте травня 2022р загальна сума збитків, завданих АТ «Укрзалізниця» через знищення активів Компанії внаслідок воєнної агресії становить 6,8 млрд грн.

Аналіз досліджень і публікацій

Інтерес adeptів транспорту до розвитку контейнерних перевезень стабільно зростає [5,8]. Це пов'язано з перевагами та особливостями, які контейнерні перевезення мають порівняно зі звичайними способами транспортування [6,7].

Також слід враховувати сучасну політичну ситуацію та процеси які відбуваються на прикордонних терміналах під час воєнного стану в країні [3, 4].

Мета дослідження

Мета дослідження полягає в удосконаленні процесів планування залізничних перевезень у міжнародному сполученні. Це можливо досягти пошуком шляхів перерозподілу вагонопотоку на прикордонних терміналах України. Оскільки задача носить оптимізаційний характер, доцільно порівняти певні математичні моделі, беручи до уваги трудомісткість завдання. Перспективним є використання генетичних алгоритмів, оскільки вони можуть бути ефективно застосовані у транспортній залізничній логістиці України.

© Ковальов Д.Д. 2024

Викладення основного матеріалу дослідження

Відповідно до проекту плану відновлення України (виданий у 2022р) виділяють 2 типи проблем, що потребують вирішення: термінові та довгострокові. Оскільки тема роботи присвячена залізниці розглядаються лише потреби пов'язані з цим видом транспорту.

Термінова потреба: усунення перешкод співпраці з ЄС

У 2021 році основний експорт України (80% за обсягом) і велика частка критичного імпорту (наприклад, вугілля) йшли через порти, які зараз заблоковані. Навіть якщо буде досягнуто припинення вогню/зняття блокади, диверсифікація логістики є важливою високий пріоритет.

Розширення пропускної спроможності на кордонах з ЄС:

- Будівництво додаткових залізниць до кордону ЄС і Дунаю для розширення мультимодальності із залізницями ЄС і дунайськими портами;

- Будівництво транскордонних сільськогосподарських транспортних засобів ЄС. сховищ і терміналів;

- Ремонт і модернізація залізничних сортувальних станцій на ключових маршрутах (зокрема експортних);

- Технічне обслуговування, обладнання для перебезування вантажних вагонів із колії 1520 на 1435 мм

- Модернізація існуючих автомобільних/залізничних пунктів пропуску на кордоні з ЄС та будівництво додаткових;

- Розвиток інфраструктури і пропускної здатності портів Дунаю.

Довгострокові цілі: оновити інфраструктуру та зміцнити взаємозв'язок.

У минулому транспортна інфраструктура була значно недоінвестована (наприклад, 94% локомотивів старше 25 років, а активна реконструкція доріг почалася лише в 2018 році). Крім того, є значні збитки від війни, Україна досить велика країна, і негативний вплив поганої інфраструктури посилюється.

1. Термінова відбудова та розвиток інфраструктури:

- Будівництва, відновлення та переобладнання колій (включно з пошкодженнями війни), забезпечення мультимодальності з українськими портами та залізницями ЄС;

- Будівництво, реконструкція та модернізація доріг та мостів (включаючи збитки від війни), забезпечення мультимодальності з українськими портами та залізницею;

2. Довготермінова відбудова та розвиток інфраструктури:

- Будівництва, відновлення та переобладнання колій (включаючи електрифікацію), забезпечення мультимодальності з українськими портами та залізницею ЄС;

- Оновлення залізничних вагонів і локомотивів;

- Будівництва, відновлення та переобладнання доріг, забезпечення мультимодальності з українськими портами та залізницею;

- Будівництво високошвидкісної залізниці Київ–Варшава. Це розширить мультимодальність із залізницями ЄС.

Виходячи з запропонованого західними партнерами ідей з модернізації прикордонних терміналів, можна дійти висновку, що подальша реконструкція станцій призведе до ще більших простоїв на них. Тому є доцільним розглянути перерозподіл вагонопотоків із найбільш навантажених станцій на менш зайняті. Така ідея передбачає доволі масивний граф з великою кількістю точок на мережі залізниць. Пропонується застосування математичних методів на етапі планування задля пошуку найоптимальнішого шляху.

Спектр застосування математичних моделей та підходів постійно розширюється в галузі транспортної логістики. Пошук оптимальних маршрутів слідування транспортних засобів є однією із задач, яку дуже легко сформулювати, але часом складно вирішити. Вона полягає у пошуку найкоротшого чи найдешевшого маршруту від початку до кінця, маючи безліч можливих шляхів слідування. Конкретний розв'язок задачі (аналіз довжин усіх можливих відрізків та обрати найкоротший варіант) зазвичай опиняється доволі трудомістким процесом. Маючи 15 точок на графі ми отримуємо 43 мільярди маршрутів та для 18 точок кількість зростає до 177 білйонів. Для прикладу уявімо, що ми маємо суперкомп'ютер, який видає результат для 30 точок за 60 хвилин; у такому випадку для 32 точок потрібно витратити більш ніж 1 місяць на пошук відповіді.

Алгоритми пошуку оптимальних маршрутів можна поділяють на 2 групи: точні та евристичні (неточні) методи.

Точні методи. Характерна особливість цих методів - гарантія знаходження оптимальних рішень при високій загальній трудомісткості процесу. Тому точні методи здебільшого застосовують при роботі з порівняно простими задачами, що не містять великої кількості даних для обробки. Незважаючи на це вони набувають широкого застосування, коли мова заходить про оптимізаційні процеси у галузі перевезень, промислового виробництва, управлінні матеріальними потоками тощо.

До точних методів відносять: метод повного перебору (Brute Force), метод гілок та меж (Branch and Bound), метод динамічного програмування (Dynamic Programming) тощо.

Метод повного перебору (Brute Force). Алгоритм повного перебору (метод грубої сили) проводить пошук усіх можливих варіантів вирішення завдання. Він є найбільш точним, але актуальний лише при невеликій кількості даних. Цей метод гарантує знаходження оптимального вирішення «задачі комівояжера», але через свою прямолінійність його не доцільно застосовувати при роботі з великими об'ємами даних; оскільки це призводить до значних часових витрат на пошук розв'язку.

Метод гілок та меж. Представлений точний метод є модернізацією методу грубої сили, але на

відміну від останнього він не враховує варіанти які заздалегідь не мають правильного вирішення. Метод гілок та меж зберігає усі переваги точних алгоритмів, однак при великих значеннях точок n його використовувати не доцільно. Для роботи та доцільності застосування методу необхідні 2 умови: розгалуження і знаходження оцінок (границь).

Перше описує процес утворення підмножин менших розмірів від початкової кількості допустимих значень змінної X . Отримані підмножини створюють умовне «дерево», його також називають деревом меж та гілок, або деревом пошуку. Гілками утвореного дерева вважають підмножини значень змінної X .

Головний недоліком цього методу – це необхідність повністю вирішувати задачі лінійного програмування, аналізуючи усі гіпотетично допустимі рішення. Громіздкі за об'ємом даних завдання роблять метод гілок і меж недоцільним у використанні, хоча він заслуговує повної довіри у вирішенні задач цілочисельного лінійного програмування.

Метод динамічного програмування (Dynamic Programming). Використовуючи динамічне програмування для пошуку серед усіх можливих варіантів шукають оптимальне рішення, тобто таке щоб досягти екстремального значення певної цільової функції. Оптимізація заданої задачі проводиться розподілом її на складові, більш прості задачі. Таким чином можна значно скоротити час роботи алгоритму порівняно з більш прямолінійними методами. Все зводиться до вирішення таких «підзадач» та об'єднання отриманих результатів разом для одержання остаточного (оптимального) рішення.

Загалом, застосування лише цих методів не є достатнім. Оскільки, витрати часу на пошук оптимуму не є прийнятними. Сильна сторона точних методів – це 100% вирішення задачі, за умови невеликих вхідних даних, чи відсутності потреби у терміновості отримання рішення.

Евристичні (неточні) методи. Для компенсації недоліків точних методів часто використовуються неточні, або евристичні алгоритми і методи. Однією із основних переваг є те, що вони мають надзвичайно швидкий час виконання операцій, порівняно з точними. Це стає можливим завдяки тому, що вони навіть не беруть до уваги непідходящі для обчислень дані. Такий підхід набирає широкого застосування для великих за кількістю даних задач оптимізації цільової функції.

Алгоритм Крістофідеса (Christofides' Algorithm). Представлений алгоритм є рішенням задачі комівояжера для випадків, де відстані утворюють метричний простір та виконуються симетричність і нерівності трикутника. Описано алгоритм «наближення», який гарантує, що отримане рішення буде на відстані не більше $3/2$ від довжини оптимального вирішення.

Алгоритм k -найближчих сусідів (NearestNeighbour). Класифікаційний підхід, який заснований на використанні, обчислених між об'єктами відстаней, для класифікації інших об'єктів у просторі їх властивостей. Об'єкти з найменшою до них відстанню утворюють окремий клас.

Метод k -найближчих сусідів (KNN) є метричним алгоритмом, який використовується для автоматичної класифікації об'єктів. Його головний принцип полягає в тому, що об'єкт переходить в клас, до якого належать найбільші за кількістю представники серед його сусідів.

Жадібний алгоритм (Greedy). Жадібний алгоритм – це простий і прямолінійний евристичний алгоритм, який засновується на виборі найкращого варіанту на кожному кроці та не звертає уваги на можливі наслідки. Його мета – отримати оптимальне рішення в кінці процесу, виходячи з наявних даних на певному етапі. Оптимізація маршруту зазвичай може бути вирішена за допомогою жадібного алгоритму, який є простим у виконанні і часто дуже швидким. Навіть якщо і існують задачі, які не можуть бути повністю розв'язані за його допомогою, використання жадібної стратегії все ж може дати задовільний результат.

Порівнюючи роботу жадібного алгоритму із методом динамічного програмування, можна зазначити, що жадібна стратегія працює згори донизу, здійснюючи послідовні жадібні вибори, у той час як динамічне програмування розв'язує задачу знизу догори. Жадібний підхід обіцяє знаходити не лише розв'язок, але й оптимальне рішення, шляхом скорочення великої задачі до менших підзадач.

Табу-пошук (TabuSearch). Алгоритм табу-пошуку (ТП) – це евристичний алгоритм, що використовує локальний пошук, щоб уникнути западання в передчасні локальні оптимуми шляхом заборони рухів, які приводять до повторення попередніх рішень та циклічної роботи. ТП починається з початкового рішення. На кожній ітерації генерується набір рішень, і найкраще з цього набору обирається як нове рішення. Певні атрибути попередніх рішень зберігаються у "табу-списку", який оновлюється в кінці кожної ітерації. Вибір найкращого рішення із набору здійснюється з урахуванням заборонених атрибутів. Найкраще допустиме рішення в даний момент оновлюється, якщо нове поточне рішення є кращим. Процес триває до досягнення одного з двох критеріїв завершення: максимальна кількість виконаних ітерацій або максимальна кількість ітерацій без поліпшення рішення.

Мурашиний алгоритм (Ant Colony Optimization). Один із найефективніших поліноміальних алгоритмів для приближеного розв'язання оптимізаційних задач та пошуку маршрутів на графах – це підхід, який використовує модель поведінки мурашок, які шукають шляхи від колонії до джерела їжі. Робота алгоритму починається з розміщення мурашок у вершинах графа, і далі мурашки рухаються по графу випадковим чином, керуючись ймовірнісним методом.

Вихідний результат може бути неточним, однак повторення алгоритму може призвести до (достатньо) точного результату через ймовірність рішення.

Генетичний алгоритм. Відображає процес природної селекції, де найкращі особини відбираються для відтворення наступних поколінь. Особливістю генетичного алгоритму є акцент на використанні оператора «схрещення», який виконує операцію рекомбінації рішень-кандидатів, роль якої аналогічна ролі схрещення в живій природі. На ряду з

мурашиним алгоритмом, генетичний вважається найбільш ефективним та широко застосовується на практиці. Оскільки, за порівняно короткий час гарантують максимально близьке оптимуму рішення.

Було створено безліч програм, для вирішення даної проблеми, які мають за основу певні алгоритми, методи та математичні моделі. Одним із лідерів у даній галузі є генетичні алгоритми; цей програмний продукт дозволяє скоротити час на пошук найвигіднішого варіанту перевезень і уникнути додаткових витрат. Він добре себе зарекомендував та широко застосовується навіть за межами транспортної галузі. Оскільки алгоритм є досить гнучким і дає змогу оперувати з великими об'ємами даних пропонується його використання.

За принципом своєї роботи, алгоритм, що нагадує процес Дарвінівської еволюції, відрізняється випадковістю та ітераційністю. Еволюція зазвичай розпочинається зі спільноти випадково утворених осіб, які становлять покоління на кожній ітерації. Кожна особа у популяції оцінюється за своєю придатністю, яка зазвичай визначається значенням цільової функції в оптимізаційній задачі, що вирішується. Найбільш придатні особини, стохастично відібрані, і геном кожної особи видозмінюється (еволюціонує), щоб утворити нове покоління. Нове покоління фенотипів далі бере участь у подальших ітераціях алгоритму. Алгоритм закінчується, за умови якщо відібрано, або максимальну кількість поколінь, або досягнуто задовільного рівня придатності особин.

Таким чином, весь процес роботи можна розподілити на 3 основні етапи:

1. Формування стартової популяції;
2. Аналіз функції адаптивності для кожної особи;
3. Ітерація до моменту задоволення умов пошуку:

- Селекція осіб із популяції;
- Мутація або/та схрещування;
- Аналіз функції адаптивності для всіх осіб;
- Створення нової популяції (нове покоління).

Усі операції виконуються поступово в строгому порядку. Схематично це виглядає наступним чином:

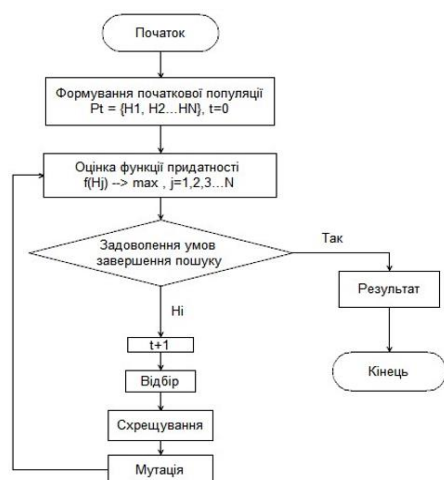


Рис. 1. Принцип роботи типового генетичного алгоритму

Створення початкової популяції. Цей етап залежить від природи завдання, зазвичай типова задача має близько декількох сотень, або навіть тисяч можливих рішень. Перша популяція створюється випадково, оскільки не має сенсу намагатися відтворити надто пристосованих осіб з самого початку. За умов неконкурентоздатності популяції, генетичний алгоритм перетворить її в придатну для життя популяцію. Наслідком першого кроку є популяція P, що налічує N осіб.

Відбір. У процесі створення нового покоління, кожен наступний цикл призводить до відбору певної частини наявної популяції. Індивідуальні рішення вибираються за допомогою Fitness-based процесу. В даному випадку показник Fitness характеризує значення пристосованості кожної особи. «Виживають» ті індивіди які мають найбільше значення функції Fitness. Вона визначається генетичним представленням і визначає якість представленого рішення. Функція Fitness завжди залежить від проблеми.

Доля Fitness осіб являє собою параметр генетичного алгоритму, його задають заздалегідь під час створення програми, або дають змогу регулювати під час роботи з алгоритмом.

Схрещування (Розмноження, кросинговер). Схрещування – це оператор, який використовується для комбінації генетичної інформації двох чи більше батьків з подальшим відтворенням цієї інформації у нащадка. Основна умова для розмноження полягає у забезпеченні нащадків здатністю успадковувати характеристики від усіх батьків.

Традиційні генетичні алгоритми зберігають генетичну інформацію в хромосомі, представлений бітовим масивом. Кросинговер бітових масивів є популярними і наочним прикладом генетичної рекомбінації.

Мутація. Мутації набувають такого ж значення, як і процес розмноження: у генетичному алгоритмі існує параметр m, який представляє кількість «мутантів», і на кроці мутацій необхідно вибрати mN осіб, які потребують зміни, використовуючи задані операції мутації.

Математична основа генетичного алгоритму. Оскільки ідея генетичного алгоритму заснована на еволюційній моделі Дарвіна, має сенс розглядати математичне обґрунтування кожного етапу еволюційного процесу.

Стандартне представлення кожного кандидата - це масив бітів. Масиви інших типів та структур можна використовувати так само. Однією з головних переваг генетичних уявлень є їх зручна виправність, оскільки їх компоненти легко упорядковуються завдяки сталому розміру, що спрощує проведення кросинговера. Після того, як генетичне представлення та фітнес-функція визначені, генетичний алгоритм переходить до ініціалізації популяції, а потім для вдосконалення її шляхом повторного застосування операторів мутації, кросинговера та селекції.

Ініціалізація. Перед початком виконання роботи треба задати параметри алгоритму, такі як: довжина хромосоми (розмір масиву даних) та розмір популяції.

Конкретно для завдання оптимізації перевезень, потрібно також враховувати швидкість транспортного засобу, відстані між станціями, або містами, якість та завантаженість маршрутів тощо. Для цього вводяться додаткові константи, або змінні величини. Для підвищення швидкості розрахунків шляхи які задалегідь не використовуються доцільно ліквідувати.

Формування початкової популяції. В комп'ютерному програмуванні формування початкової популяції зазвичай це представляється масивом даних:

$$Pt = \{H1, H2 \dots Hn\}, \quad t = 0, \quad (1)$$

де P – популяція;

H – ген;

t – номер популяції. t приймається 0, адже ми маємо випадково згенеровані дані.

Оцінка індивідів за функцією придатності. Рядок $f(H_j) \rightarrow \min, j = 1, 2, 3 \dots N$ демонструє здійснення мінімізації даних. Відбір фокусується на особах з найменшим значеннями. Залежно від завдання може використовуватися, або операція мінімізації, або максимізації функції придатності.

Максимізація функції придатності fitness k:

$$fitness_k = \begin{cases} \frac{f(x_k) - I^{min}}{I^{max} - I^{min}} & \text{якщо } I^{max} \neq I^{min} \\ 1, & \text{якщо } I^{max} = I^{min} \end{cases} \quad (2)$$

$$I^{min} = \min_{x \in Yf(x)}$$

$$I^{max} = \max_{x \in Yf(x)}$$

де I – набір (індивіди) значень цільової функції в даному поколінні;

$f(X_k)$ - значення заданої цільової функції;

x – фенотип;

k = номер присвоєний фенотипу.

Мінімізація функції придатності fitness k:

$$fitness_k = \begin{cases} \frac{I^{max} - f(x_k)}{I^{max} - I^{min}} & \text{якщо } I^{max} \neq I^{min} \\ 1, & \text{якщо } I^{max} = I^{min} \end{cases}, \quad (3)$$

Перевірка даних. Наступний крок має суто перевірочний характер. А саме чи задовольняють існуючі дані умови задачі, якщо так то робота програми припиняється і результат виводиться на екран. В іншому випадку починається цикл операцій відбору – схрещування – мутації, який повторюватиметься встановлену кількість поколінь, або до тих пір доки користувач не отримає задовільний результат.

Відбір. Відбір - оператор випадкового вибору одного індивіда з популяції. Оператор селекції ґрунтується на значеннях функції придатності всіх індивідів поточної популяції для використання обраного індивіда в операторі схрещування. При цьому ймовірність вибору у індивідів з більш високою придатністю вище, ніж у індивідів з більш низькою придатністю.

Пропорційна селекція. Можливість вибору елемента пропорційна значенню придатності індивіда. Даний вид селекції може працювати тільки з позитивними значеннями придатності.

Пропорційна селекція визначається за формулою:

$$p_k = \frac{fitness_k}{\sum_{j=1}^N fitness_j}, \quad (4)$$

Для вибору особи необхідно за випадковим числом обрати індивіда на якого воно вказує:

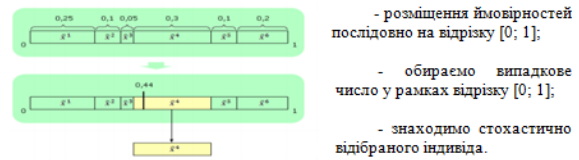


Рис. 2. Процес вибору особи

Схрещування (Кросингвер). Схрещування відповідає біологічному процесу рекомбінації хромосом. Генетична рекомбінація - це обмін генетичним матеріалом між різними організмами, що призводить до отримання потомства з комбінацією ознак, що відрізняються від ознак, які знаходяться у будь-якого з батьків.

Кросингвер з однією точкою (Single-point crossover). Точка на хромосомах обох батьків вибирається випадковим чином і позначається «перехресною точкою» (crossover point). Біти праворуч від цієї точки розміщуються між двома батьківськими хромосомами. Це призводить до двох нащадків, кожен з яких має певну генетичну інформацію від обох батьків.



Рис. 3. Приклад кросингвера з однією точкою

Кросингвер з двома, чи більше точками (Two-point and n-point crossover). У кросингвері з двома точками дві хромосоми вибираються випадковим чином із батьківських хромосом. Блоки між двома точками обмінюються між організмами нащадків. Кросингвер з двома точками рівнозначний виконанню двох кросингверів з однією перехресною точкою у різних місцях масиву. Ця стратегія може бути виконана до n-точкового кросингвера для будь-якого додатного цілого n, вибираючи n перехресних точок.



Рис. 4. Приклад кросинговера з двома точками

Мутація. Мутація - оператор, що відповідає за генетичне різноманіття починаючи від першого покоління хромосом алгоритму до наступного. Це аналог біологічної мутації і зазвичай ці зміни незначні. Мутація видозмінює декілька або навіть одне значення гена від початкового стану. При виконанні операції, кожний ген з тією чи іншою ймовірністю видозмінюється, тобто отримує протилежне значення.

У генетичному алгоритмі мутації обираються серед трьох варіантів: сильна, слабка та середня мутації.

$$p(mut) = \begin{cases} \frac{1}{3n}, & \text{якщо мутація слабка} \\ \frac{1}{n}, & \text{якщо мутація середня} \\ \min\left(\frac{3}{n}, 1\right), & \text{якщо мутація сильна} \end{cases}, \quad (5)$$

де n - довжина вектора бінарної задачі оптимізації.

Схематично це виглядає як просте змінення значення одного блоку масиву на протилежне:

До мутації

$n5$

1	1	1	0	0	0
---	---	---	---	---	---

Після мутації

$n5$

1	1	0	1	1	0
---	---	---	---	---	---

Рис. 5. Приклад мутації трьох генів

Переваги та недоліки генетичного алгоритму.

Переваги:

1. Генетичний алгоритм працюють з кодами, що представляють собою формалізований вигляд набору параметрів. В процесі роботи генетичного алгоритму маніпуляції з кодами відбуваються незалежно від їх змісту, тобто код розглядається просто як рядок бітів.

2. Це один із найшвидших за пошуком оптимального рішення алгоритм. В своїй роботі не використовує додаткової інформації, а працює з даними в області допустимих значень параметрів.

3. При реалізації процедури пошуку, генетичний алгоритм обробляє одночасно декілька точок пошукового простору, а не переходить послідовно від точки до точки, як в традиційних методах.

4. Використання двох механізмів рішень: детермінованого та ймовірнісного. Це дає змогу

отримати більш ефективні результати, аніж якщо б ми використовували один з цих механізмів.

5. Здатний працювати з великими об'ємами даних.

Недоліки:

1. Не завжди гарантує оптимальне рішення. Іноколи потребує другої спроби на пошук оптимуму.

2. Складний в реалізації. Лише професіонал в області генетичного програмування може реалізувати складні за своєю природою проекти.

3. Нестача різноманітності в індивідах. У популяції швидко відбувається виділення єдиного генотипу, що представляє собою максимальне локальне значення, і всі інші особини виявляються недостатньо конкурентоспроможними у відборі. Наслідком цього є поширення копій даної особи серед всієї популяції. Хоча вже існують методи боротьби з цією проблемою.

Математична модель на базі генетичних алгоритмів. Доцільно розглядати і використовувати декілька критеріїв, за якими ми отримуємо фінальний результат. Необхідно виділити n -кількість масивів даних, по одному для кожного з критеріїв. Транспортна логістика, у більшості випадків, стикається з питаннями строків доставки, безпеки та витрати на транспортування. Щоб мати вибір найбільш важливого критерію, слід запропонувати кілька найкращих варіантів, проте кінцеве рішення залишається за людиною. Розрахунки проводяться окремо, щоб уникнути конкуренції між даними цільової функції.

Цільова функція, що описує вартості доставки:

$$ЗС = MB + \sum C_i \rightarrow \min, \quad (6)$$

де MB - митна вартість;

C_i - собівартість перевезення i -го виду транспорту;

$ЗС$ - загальна вартість перевезення;

Як зазначено вище у статті, роль митних витрат важлива при визначенні базисних умов. Існує кілька методів розрахунку митних витрат, і для нашої роботи ми використовуємо метод додавання вартості. Оцінка митної вартості включає в себе розрахунок різних видів витрат та прибутку експортера.

Формула розрахунку митної вартості на основі додавання (MB) визначається:

$$MB = BV + ВД + НП + ВП + ЛП + ЧП, \quad (7)$$

де $ЧП$ - відповідна частина прибутку від подальшого перепродажу товарів, що накопичується у продавця;

$НП$ — прибуток експортера; $ВП$ — витрати покупця;

BV — вартість матеріалів і витрат, виробника при виробництві товарів;

$ВД$ — витрати на розвантаження, транспортування і страхування, навантаження в Україні;

ЛП — ліцензійні платежі за роботу з об'єктами інтелектуальної власності.

Цільова функція, що описує час доставки:

$$T_{\text{дост}} = T_p + T_{\text{п-к}} + T_{\text{п}} + T_{\text{б}} \rightarrow \min, \quad (8)$$

де $T_{\text{п-к}}$ — час витрачений на початково-кінцеві операції;

$T_{\text{б}}$ — буферний час;

$T_{\text{п}}$ — час простоїв;

T_p — час слідування.

Стохастична модель має певні обмеження цільової функції. У нашому випадку, ці обмеження визначаються введеними користувачем даними. Оскільки немає фіксованої величини, що обмежує вартість і час перевезення, ці значення повинні бути включені в алгоритм кожного разу. Наприклад, максимальний час перевезення встановлюється стороною і алгоритм не повинен його перевищувати. Це дозволяє виключити багато варіантів, які не відповідають умовам перевезення і вимогам клієнтів напередодні. Те ж саме стосується й вартості доставки. Учасники перевезення встановлюють максимальну суму, в межах якої проводиться пошук оптимального рішення.

Для прикладу було розглянуто перевезення залізничним транспортом з м. Харкова до м. Берлін. Одним із сервісів з відкритим доступом є Logistics explorer, який пропонує наступний маршрут з мінімальними витратами.

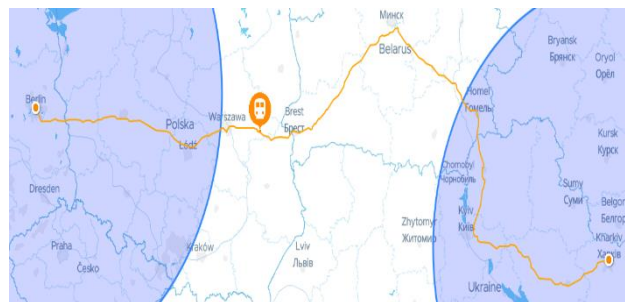


Рис. 6. Варіант перевезення через додаток Logistics explorer

Застосувавши метод пошуку ГА був знайдений наступний маршрут. На пошук оптимального маршруту програма витратила приблизно 22 секунди. Весь маршрут складає приблизно 1941 кілометра, для проходження якого потрібно 59.2 години (без урахування простою на технічних станціях).

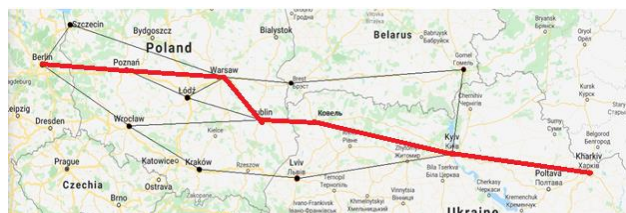


Рис. 7. Варіант перевезення з використанням методу ГА

Генетичний алгоритм пропонує більш дешеву та швидшу альтернативу деяким існуючим варіантам. За нашими розрахунками показники нового маршруту умовного перевезення залізничним транспортом за маршрутом Харків — Берлін більше задовольняють потреби перевідників. Результати для зручності наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння техніко-економічних показників

Фактори	ГА	Існуючий варіант
1. Середня технічна швидкість складу, км/год	16,28	14,42
2. Час слідування вантажу, год	119,2	142,9
3. Відстань перевезення, км	1941	2061
4. Собівартість перевезення, грн	124600	132350
5. Економічний ефект, грн	7750	-
6. Річний економічний ефект, млн. грн	22436,25	-

Висновки

Ринкова економіка та зростання обсягів міжнародної торгівлі спонукає перевізників до покращення та раціоналізації планування перевезення. Комп'ютеризація даного процесу дозволить:

1. Зменшити час пошуку найбільш ефективних рішень, враховуючи критерії швидкості та вартості;
2. Знизити ймовірність помилок і ризику виникнення негативних наслідків;
3. Брати до розрахунків правові норми та положення країн, що виконують роль імпортерів або експортерів.

Пропонується розглядати оптимізаційну систему невіддивно від існуючих АСУ на залізницях. Такий підхід сприяє інтеграції запропонованого методу на вже оперуючі системах управління. Під час проведення розрахунків економічного ефекту від ведення інновації, результат був позитивним та показав термін окупності складає 2 роки.

Створення автоматизованих систем позитивно сприятиме на транспортно-логістичну галузь в Україні. Наша країна має великі можливості для поліпшення перевізних послуг і створення сприятливих умов для покращення іміджу України у закордонних клієнтів. Запропонована інновація не потребує значних капіталовкладень і може приносити позитивний економічний ефект шляхом зниження собівартості впровадження високих технологій.

Список використаних джерел

1. The National Council for the Recovery of Ukraine from the Consequences of the War. Draft Ukraine Recovery Plan. URL: https://uploads-ssl.webflow.com/621f88db25fbf24758792dd8/62d815739a363800fd1cda5c_Recovery%20and%20development%20of%20infrastructure.pdf
2. National Recovery Council. Ukraine's National Recovery Plan. July 2022. URL: https://uploads-ssl.webflow.com/621f88db25fbf24758792dd8/62c166751fc41105380a733_NRC%20Ukraine%27s%20Recovery%20Plan%20blueprint_ENG.pdf
3. Лисий в. М., стебляк д. М. Вплив війни на розвиток транспортного перевезення в Україні// Науковий вісник Ужгородського національного університету. DOI: <https://doi.org/10.32782/2413-9971/2022-43-16>
4. Н. І. Антошишина. Інтеграційні процеси транспортної системи України в ЄС//Електронний журнал «Ефективна економіка» № 10, 2013. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2423>
5. В. О. Баланов Огляд раціональних шляхів розвитку залізничних перевезень міжнародними транспортними коридорами // Транспортные системы и технологии перевозок. 2013. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/oglyad-ratsionalnih-shlyahiv-rozvitku-zaliznichnih-perevezen-mizhnarodnimi-transportnimi-koridorami> (дата обращения: 15.10.2023).
6. В. О. Баланов Развитие контейнерных перевозок в Украине та досвід перевезень в європейських країнах //

Транспортные системы и технологии перевозок. 2012. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rozvitok-konteylernih-perevezen-v-ukrayini-ta-dosvid-perevezen-v-evropeyskih-krayinah> (дата обращения: 15.10.2023).

7. Ю. В. Кебал, с.м. кондратюк, с.с. мямлін. Вдосконалення конструкцій рухомого складу для перевезення контейнерів залізничним транспортом// Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. Вип. 15. 2018 р. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2018/150196>
8. Шраменко Н.Ю., Орда О.О. Формирование альтернативных вариантов транспортно-экспедиторского обслуживания грузовладельцев при интермодальных перевозках // Автомобильный транспорт. 2015. №37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-alternativnyh-variantov-transportno-ekspeditorskogo-obsluzhivaniya-gruzovladeltsev-pri-intermodalnyh-perevozках> (дата обращения: 15.10.2023).

Kovalov D.D. The use of genetic algorithms in the planning of rail transportation in the international connection

Abstract. The article explores challenges and opportunities related to the growth of Ukrainian border terminals with EU nations during both wartime and post-war periods. It conducts an analysis of the present condition of freight transportation towards Europe, addressing immediate issues as well as short- and long-term prospects for railway development. The pivotal role of railway transport in facilitating Ukraine's integration into the European transportation network is emphasized, presenting possibilities for realizing plans for railway reconstruction and advancement. 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 (there are 4 out of 10 existing pan-European transport corridors pass through the territory of Ukraine), has great potential for the development of its own railway transportation system. 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. Transport and logistics system of Ukraine is at a rather low level compared to other countries of the world. Therefore, this article studies the ways of optimizing the container movement from Ukraine to EU countries, using certain mathematical algorithms and methods. One of these methods described is genetic algorithm, which is considered to be one of the best mathematical algorithms for the task described above. It could play a crucial role in establishing a decent logistical railway system at the western border of Ukraine. Also, it could help to optimize the border crossings passage to implement and expand transport capabilities of Ukrainian railways. It could not only help to find the fastest or cheapest route but also shows the weak points of Ukrainian border terminals. Based on this information,

more ways of improvement could be proposed to modernize and expand border terminals and stations, with further integration into the European transport system.

Keywords: railway infrastructure, cargo transportation, container transportation, genetic algorithms, optimal route.

Ковальов Денис Дмитрович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: kovaliov59@kart.edu.ua

ORCID ID <https://orcid.org/0009-0003-3417-4113>.

Kovalov Denys Dmytrovich, Phd student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: kovaliov59@kart.edu.ua

ORCID ID <https://orcid.org/0009-0003-3417-4113>