

Визначення закономірностей коливання пасажиропотоку

У статті розглянуто пасажиропотік міського та приміського транспорту як часовий ряд y_t з дискретизацією Δt та запропоновано підхід до виявлення закономірностей його коливань. Показано, що структура попиту формується поєднанням добової й тижневої сезонності, календарних ефектів та впливом зовнішніх чинників (погода, надійність руху, подієві збурення). Для виділення регулярної компоненти побудовано «коридор норми» на основі квантильних оцінок, що дає змогу ґрунтовно описувати типові рівні попиту та його природну варіативність у межах однорідних часових груп. Запропоновано автоматичну класифікацію днів за формою добового профілю (кластеризація нормованих добових векторів), що дозволяє відокремити будні, вихідні, святкові та аномальні дні за фактичними даними, а не лише за календарем. Пікові події визначаються як перевищення відносно квантильного порога; для кожної події обчислюються амплітуда, тривалість і інтегральне навантаження, які безпосередньо інтерпретуються з позицій потреби у випуску та резерві рухомого складу. Додатково використано rolling-аналіз для контролю стабільності закономірностей у часі та регресійну постановку для кількісної оцінки впливу температури, опадів, свят і затримок. Практичним результатом є система показників і правил, придатна для коригування інтервалів руху, планування посиленого випуску в пікові години та оперативного реагування на відхилення попиту, що покращує якість обслуговування й знижує витрати, сприяючи підвищенню надійності перевезень, комфорту пасажирів та ефективності використання ресурсів у мережі

Ключові слова: пасажиропотік; часовий ряд; сезонність; пікові періоди; квантилі; кластеризація днів; надійність транспорту; прогнозування попиту.

Актуальність теми. Пасажиропотік у системах міського та приміського транспорту є нерівномірним у часі: протягом доби, тижня й року спостерігаються характерні піки та спади. Така мінливість створює ключову практичну проблему для організаторів перевезень: за недостатнього випуску рухомого складу в години пікового попиту зростають черги, переповнення салонів і час очікування, а за надлишкового випуску в «провальні» періоди підвищуються експлуатаційні витрати й погіршується економічна ефективність роботи маршруту.

У цій статті увагу зосереджено на коливаннях пасажиропотоку саме на автомобільному транспорті (міських автобусних та приміських автотранспортних перевезеннях), де нерівномірність попиту посилюється впливом дорожніх умов і заторів, інцидентів, змін у схемах руху та обмеженої пропускної спроможності вулично-дорожньої мережі. Виявлення характерних піків і спадів для автотранспорту та чинників, що їх зумовлюють, є необхідною передумовою для раціонального планування випуску, інтервалів руху, резервів та інших експлуатаційних параметрів.

Отже, виникає завдання визначення закономірностей коливання пасажиропотоку та встановлення чинників, що їх зумовлюють. Практичний зміст цього завдання полягає у формуванні обґрунтованих рішень щодо складання розкладів, призначення інтервалів руху, планування резервів транспорту, коригування роботи пересадочних вузлів і підвищення надійності перевезень. Додатково результати аналізу можуть бути використані для короткострокового прогнозування попиту та оперативного реагування на відхилення, спричинені погодними умовами, подіями або збоями в роботі мережі.

У межах роботи пасажиропотік доцільно розглядати як часовий ряд y_t (кількість пасажирів за інтервал Δt), для якого необхідно виокремити регулярні компоненти (добову та тижневу сезонність) і оцінити вплив зовнішніх факторів. Саме встановлення цих залежностей є основою для підвищення якості транспортного обслуговування та зниження витрат при збереженні потрібного рівня доступності перевезень.

Колівання пасажиропотоку в транспортних системах мають багатофакторний характер і зазвичай описуються як результат одночасної дії часових, календарних, погодних та соціально-економічних чинників. У сучасних роботах пасажиропотік розглядають як часовий ряд із вираженою добовою та тижневою сезонністю, у якому пікові значення найчастіше пов'язані з поїздками «дім – робота / навчання» [1–3]. Для міського громадського транспорту типово спостерігаються ранковий і вечірній піки в робочі дні, тоді як у вихідні добовий профіль згладжується, а максимум може зміщуватися на денні години [4, 5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Аналіз останніх наукових публікацій свідчить, що дослідження коливань пасажиропотоку в міському та приміському транспорті розвиваються на стику транспортного планування, аналізу часових рядів і методів інтелектуального

аналізу даних. Найчастіше пасажиропотік розглядають як часовий ряд із вираженою добовою та тижневою сезонністю, де попит формують регулярні поїздки «дім – робота / навчання», а також нерегулярні події переміщення [1, 4]. У прикладному аспекті результати таких робіт використовуються для уточнення інтервалів руху, формування розкладів, планування резервів, оцінювання завантаження ділянок мережі та підвищення якості обслуговування.

У вітчизняній науковій школі суттєву увагу приділено питанням організації пасажирських перевезень автомобільним транспортом, зокрема плануванню роботи маршрутів і розробці розкладів руху. У навчальному посібнику [6] систематизовано підходи до побудови розкладів та ув'язування параметрів руху з характеристиками попиту й умовами експлуатації, що створює методичну основу для практичних рішень на маршрутах міського та приміського сполучення. У цьому контексті розклад розглядається не лише як регламент руху, а як інструмент узгодження ресурсів перевізника з нерівномірним пасажиропотоком. Комплексний огляд сучасних наукових підходів до організації транспортних процесів у системах пасажирських перевезень наведено в монографії [7], де узагальнено напрями розвитку методів планування, управління та оцінювання ефективності роботи пасажирського транспорту. Питання підвищення якості міських перевезень (з позицій доступності, комфортності та регулярності) розглядаються також у дисертаційній роботі [8], що акцентує увагу на критеріях якості як ключових обмеженнях для організаційних рішень. Окрему групу робіт становлять дослідження поведінки пасажирів і вибору ними маршрутів пересування; зокрема у монографії [9] показано, що попит і його добові коливання суттєво залежать від сприйняття часу поїздки, кількості пересадок та надійності сполучення, що безпосередньо впливає на формування пасажиропотоків на автотранспорті.

Умовно можна виокремити кілька взаємопов'язаних тематичних блоків: 1) джерела даних і методи реконструкції попиту, 2) виділення закономірностей і поведінкових патернів, 3) короткострокове прогнозування попиту, 4) вплив зовнішніх факторів (календар, погода, надійність тощо). Далі наведено узагальнення результатів ключових робіт, на які спирається дане дослідження.

Важливим поштовхом до розвитку напряму стало поширення AFC-даних, що дають змогу детально аналізувати пасажирські переміщення у просторі та часі. На прикладі метрополітену показано, що смарт-карткові записи дозволяють відновлювати добові / тижневі профілі попиту, виділяти типові шаблони поїздок і визначати станції з найбільшою варіативністю навантаження [1]. Подібні підходи застосовують і для наземного транспорту: роботи демонструють, що на рівні зупинок / маршрутів пасажиропотік має стійку сезонність, але водночас чутливий до локальних умов і змін у мережі [2, 4]. Окремий пласт досліджень присвячено пошуку повторюваних послідовностей і «патернів» у переміщеннях пасажирів. Наприклад, методи інтелектуального аналізу даних дозволяють знаходити типові послідовності поїздок та їхні часові прив'язки, що є корисним для сегментації пасажирів і виявлення регулярних потоків [5]. Для оцінювання стабільності попиту та поведінкової інерції також застосовують аналіз лояльності / звичності користувачів за даними смарт-карток [10].

Дані смарт-карток та пов'язані журнали роботи системи дозволяють також оцінювати показники часу поїздки, перевіряти узгодженість пересадок і будувати показники надійності на основі фактичних траєкторій пасажирів. Для цього, зокрема, використовують методи відновлення часу поїздки / очікування та статистичні оцінки розкиду, що забезпечує зв'язок між експлуатаційними показниками та пасажирським попитом [11]. Таким чином, сучасна література переходить від агрегованих середніх значень до детального аналізу попиту з високою часовою роздільністю (наприклад 15 хв, 30 хв, 1 год), що є критично важливим саме для аналізу коливань.

Короткостроковий прогноз пасажиропотоку є однією з ключових прикладних задач, оскільки безпосередньо підтримує оперативне управління випуском рухомого складу та інтервалами руху. Узагальнення підходів свідчить, що класичні методи часових рядів (ARIMA / сезонні моделі), регресійні підходи та моделі стану поступово доповнюються (а інколи й замінюються) методами машинного навчання та глибокого навчання [3]. Як базову методологічну основу для роботи з часовими рядами в транспорті часто розглядають класичні підходи аналізу та прогнозування (зокрема ARIMA та сезонні моделі), де попит описується трендом, сезонністю та випадковою складовою [8]. Для коректного порівняння моделей прогнозу важливими є метрики точності; тому в оглядах рекомендують використовувати узгоджені показники (MAE, RMSE, MAPE/SMape тощо) та аналізувати чутливість до аномальних періодів [13].

У низці робіт показано ефективність глибоких нейронних мереж для задач прогнозування транспортних потоків у середовищі «big data»; підкреслюється здатність таких моделей уловлювати нелінійності та складні залежності [14]. Для транспортних сервісів попиту «на замовлення» запропоновано методи короткострокового прогнозу, що враховують просторово-часову структуру та події чинники [15]. Для громадського транспорту на основі AFC-даних будуються моделі, які дають прогноз на рівні зупинок / маршрутів і природно відтворюють добову та тижневу сезонність [2, 4].

Серед сучасних підходів значне місце займають рекурентні нейронні мережі, зокрема LSTM, які призначені для моделювання залежностей у послідовностях і добре підходять для часових рядів попиту [16].

Окремим напрямом стало застосування механізмів уваги (attention) та трансформерних архітектур, що дозволяють моделювати залежності на різних часових масштабах і поєднувати численні екзогенні фактори [17]. Для задач транспортного попиту це відкриває можливість одночасно враховувати сезонність, календарні зміни та вплив збоїв у роботі мережі.

Для побудови інтерпретованих моделей попиту (особливо коли важливо пояснити вплив окремих факторів) використовують регуляризовані регресії та сплайнові підходи. Зокрема, LASSO-штраф дозволяє виконувати відбір змінних і боротися з мультиколінеарністю, що є актуальним при великій кількості календарних та погодних ознак [17]. Гнучке відтворення нелінійних залежностей між попитом і факторами забезпечують регресійні сплайни, зокрема тонкі пластинчасті сплайни (thin plate splines) [19]. У транспортних задачах такі інструменти часто застосовують як компроміс між простотою інтерпретації та точністю.

Сучасні дослідження підтверджують, що пасажиропотік суттєво змінюється під впливом календарних факторів (будні / вихідні, святкові та передсвяткові дні, канікули). Зокрема, показано наявність «holiday effect»: у свята змінюється як загальний рівень поїздки, так і добовий профіль попиту, що важливо враховувати в моделях прогнозування [20].

Погодні умови є ще одним вагомим фактором, який впливає як на вибір виду транспорту, так і на інтенсивність поїздки. Оглядова робота систематизує результати щодо впливу погоди на транспортну поведінку (опаді, температура, вітер) та підкреслює необхідність коректного включення метеозмінних у моделі попиту [21]. Емпіричні дослідження для громадського транспорту демонструють наявність сезонної варіативності та статистично значущого впливу погодних умов на рівень поїздки [22, 23]. Окрім погоди та календаря, на коливання пасажиропотоку впливають характеристики роботи самої транспортної системи, зокрема надійність (пунктуальність) і стабільність часу поїздки. Показано, що погіршення надійності може змінювати розподіл пасажирів у часі та просторі й провокувати перерозподіл попиту між маршрутами [24]. Для вимірювання надійності та часу поїздки активно застосовують смарт-карткові дані, що дозволяють оцінювати показники в динаміці [11].

З практичної точки зору, урахування цих факторів у моделях має дві переваги. По-перше, зменшується систематична похибка прогнозу (наприклад, моделі перестають «переоцінювати» попит у періоди негоди або свята). По-друге, підвищується пояснювальна здатність моделі: можна розрізняти регулярні коливання (добові / тижневі) та відхилення, що спричинені зовнішніми шоками. Це є важливим для оперативних рішень (додавання резервних машин, підсилення напрямків, перерозподіл рухомого складу між маршрутами) і для довгострокового планування.

Метою статті є визначення закономірностей коливання пасажиропотоку в міському та приміському громадському транспорті та обґрунтування підходів до їх урахування під час планування випуску рухомого складу й формування розкладів.

Об'єктом дослідження є пасажиропотік у системі громадського транспорту (часовий ряд інтенсивності поїздки за фіксованими інтервалами часу).

Предметом дослідження є закономірності (добова / тижнева сезонність, пікові періоди) та чинники, що зумовлюють варіації пасажиропотоку (календарні ефекти, погодні умови та показники надійності роботи мережі). Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- ✓ сформувати та описати вхідні дані про пасажиропотік як часовий ряд y_t із заданою дискретизацією Δt ;
- ✓ виявити та кількісно оцінити регулярні компоненти коливань (добову і тижневу сезонність), а також пікові / провальні періоди попиту;
- ✓ оцінити вплив зовнішніх факторів (календар, погода, надійність) на відхилення пасажиропотоку від регулярного профілю.

Викладення основного матеріалу. У цьому розділі наведено узагальнене рішення поставлених завдань на основі представлення пасажиропотоку як часового ряду та виділення його регулярних і нерегулярних компонент.

Припустимо, що y_t – кількість пасажирів, зафіксована за часовий інтервал тривалості Δt (наприклад, 15 хв або 1 год) у момент часу t . Первинні спостереження приводять до єдиної часової сітки та контролюють якість даних: пропуски позначають і (за потреби) заповнюють для поодиноких відсутніх інтервалів, а аномальні значення, пов'язані зі збоями обліку, виявляють за робастними критеріями (наприклад, через медіану та міжквартильний розмах у межах однорідних часових груп).

Для подальшого аналізу формують набір пояснювальних ознак: календарні (година доби, день тижня, індикатори вихідних / свят), метеорологічні (температура, опади, вітер) та експлуатаційні (затримки, показники пунктуальності) – залежно від доступності інформації.

Далі розглянемо виділення сезонності та пікових періодів. Регулярну структуру попиту доцільно описати адитивною декомпозицією (1):

$$y_t = \mu + s_{day}(h_t) + s_{week}(d_t) + r_t, \quad (1)$$

де μ – середній рівень, $s_{day}(h_t)$ – добова сезонність (функція години h_t), $s_{week}(d_t)$ – тижнева сезонність (функція дня тижня d_t), r_t – залишкова складова.

Оцінювання s_{day} і s_{week} виконують шляхом агрегування за годинами та днями тижня (окремо для буднів і вихідних): наприклад, як середні або медіанні значення. Пікові періоди визначають як інтервали, де попит перевищує характерний для відповідної групи рівень на задану величину; зручно використовувати нормування та порогове правило (2):

$$\tilde{y}_t = (y_t - \text{median}(y)) / IQR(y), \quad \tilde{y}_t > c, \quad (2)$$

де c – порогове значення. Додатково оцінюють амплітуду піків, їхню тривалість (ширину) та різницю між ранковим і вечірнім піками у робочі дні.

Вплив календарних, погодних і експлуатаційних чинників кількісно оцінюють через регресійну модель з екзогенними змінними (3):

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 \text{Weekend}_t + \beta_2 \text{Holiday}_t + f_1(T_t) + f_2(P_t) + \beta_3 \text{Delay}_t + \epsilon_t, \quad (3)$$

де Weekend_t , Holiday_t – індикатори типу дня, T_t – температура, P_t – опади, Delay_t – показник порушення графіка, $f_1(\cdot)$, $f_2(\cdot)$ – нелінійні залежності (наприклад, сплайнові), ϵ_t – випадкова похибка.

За результатами моделювання інтерпретують напрям і силу впливу факторів (за знаками та статистичною значущістю оцінок), а також оцінюють відносну зміну попиту для ключових сценаріїв (вихідні / свята, опади, погіршення пунктуальності). Практичним підсумком є рекомендації щодо коригування інтервалів руху у пікові години, планування резерву на періоди негоди та врахування календарних ефектів у розкладах. Отже, сучасні дослідження пасажиропотоку базуються на поєднанні детальних даних (передусім AFC / смарт-картки) з методами аналізу часових рядів і машинного навчання. Для отримання практично корисних результатів (розклад, інтервали, резерви) у моделях доцільно враховувати регулярну сезонність (добову / тижневу), календарні ефекти, погодні умови та показники надійності функціонування мережі [3, 19, 16, 20].

Пасажиропотік у міському / приміському транспорті доцільно трактувати як часовий ряд y_t – кількість пасажирів за інтервал Δt у момент часу t . Закономірності коливання визначаються як повторювані у часі компоненти (сезонність і календарні ефекти), а також типові пікові режими, що зберігаються для однорідних умов експлуатації. Практична мета виділення закономірностей – отримати формалізовані характеристики попиту, які можна безпосередньо використати для призначення інтервалів руху, планування випуску та резервів.

Виділення регулярної структури попиту. Регулярну частину попиту описують адитивною моделлю з добовою та тижневою сезонністю (4):

$$y_t = \mu + s_{day}(h_t) + s_{week}(d_t) + r_t, \quad (4)$$

де μ – середній рівень, $s_{day}(h_t)$ – добова компонента (година h_t), $s_{week}(d_t)$ – тижнева компонента (день тижня d_t), r_t – залишок (нерегулярні відхилення). Оцінки сезонних компонент отримують агрегуванням у групах «година – тип дня» (середнє або медіана), що дозволяє побудувати типовий профіль для буднів і вихідних.

Формалізація піків і «провалів». Пікові інтервали визначають як моменти, коли попит істотно перевищує базовий рівень у порівнюваній групі часу. Для робастного порівняння зручно використовувати нормування (5):

$$z_t = (y_t - \text{median}(y_G(t))) / IQR(y_G(t)), \quad (5)$$

де $G(t)$ – однорідна група (фіксована година та тип дня), IQR – міжквартильний розмах. Тоді $z_t > c$ інтерпретують як пік, а $z_t < -c$ – як «провал» (значення c задають емпірично, наприклад 1,5–2,5).

Параметри коливань у пікових режимах. Для кожного пікового періоду визначають ключові характеристики:

- амплітуду $A = \max y_t$ (або $\max z_t$) у межах піку;
- тривалість W – сумарний час, коли $z_t > c$;
- інтегральне навантаження $S = \int (y_t - y^*)_+$, де y^* – типовий рівень для групи $G(t)$.

Порівняння A, W, S для ранкового та вечірнього піків у будні дає змогу встановити асиметрію маятникових поїздки і визначити, де необхідний більший резерв рухомого складу.

Календарні ефекти виявляються у зміні (1) середнього рівня попиту та (2) форми добового профілю. Типово для буднів спостерігаються два виражені піки, тоді як у вихідні профіль згладжується й максимум зміщується на середину дня. Окремо аналізують святкові / передсвяткові дні через індикатори Weekend_t , Holiday_t та порівняння профілів із «нормальними» буднями. Для розуміння стабільності попиту розраховують показники розкиду в однорідних групах (наприклад, коефіцієнт варіації $CV = \sigma/y$ або IQR). Інтервали з високою варіативністю вважаються ризиковими (ймовірність переповнення / недовипуску вища), тому для них доцільні більші резерви або гнучкі інтервали руху. Пояснювані відхилення та зовнішні фактори. Після вилучення сезонності аналізують залишок r_t і пов'язують його з погодою, подіями та показниками надійності (затримки, пунктуальність). Кількісно це можна робити регресійною моделлю з екзогенними змінними (6):

$$y_t = \beta_0 + s_{day}(h_t) + s_{week}(d_t) + \beta_1 \text{Holiday}_t + f_1(T_t) + f_2(P_t) + \beta_2 \text{Delay}_t + \epsilon_t, \quad (6)$$

що дає змогу відокремити регулярні закономірності від факторних впливів і формувати практичні рекомендації щодо коригування випуску в дні негоди або при погіршенні пунктуальності.

Отримані закономірності коливання пасажиропотоку подаються у вигляді типових добових / тижневих профілів, параметрів пікових навантажень (амплітуда, тривалість, інтегральне навантаження) та оцінок варіативності й впливу зовнішніх факторів. Це створює основу для обґрунтованого планування інтервалів руху, резервів і підвищення якості транспортного обслуговування.

Запропоновано методику, ої поєднує автоматичну сегментацію добових профілів на типи днів, детекцію та параметризацію піків, оцінювання впливу зовнішніх факторів і формування придатних до впровадження рекомендацій щодо інтервалів руху та резервів. Методика орієнтована на дані з високою часовою роздільністю (15–60 хв) та допускає наявність пропусків / аномалій.

1. Підготовка та уніфікація даних. Формують часовий ряд y_t із кроком Δt та контролюють якість:

- приводять усі спостереження до єдиної часової сітки;
- пропуски позначають як NA та відновлюють лише для поодиноких інтервалів (локальна інтерполяція або сезонне відновлення);
- грубі викиди попередньо фільтрують робастним правилом у межах однорідних груп (день тижня, година).

2. Побудова «сталонного» профілю на основі робастних квантилів. Замість одного середнього профілю пропонується формувати квантильний «коридор норми» для кожної години / типу дня (7):

$$q_p(h, d) = Q_p y_t; h_t = h, d_t = d, \quad p \in 0.25, 0.50, 0.75, \quad (7)$$

де Q_p – емпіричний квантиль, h – година, d – день тижня (або «будній / вихідний»). Медіанна крива $q_{0.50}(h, d)$ задає типовий рівень, а смуга $[q_{0.25}, q_{0.75}]$ визначає діапазон нормальних коливань без припущення про нормальність розподілу.

3. Автоматична класифікація днів за формою добового профілю (нова частина методики). Кожен день k подають як вектор профілю:

$$v_k = (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{kH}), \quad (8)$$

де H – кількість інтервалів у добі. Для усунення впливу масштабу профіль нормують (9):

$$\tilde{v}_k = (v_k - \text{median}(v_k)) / IQR(v_k). \quad (9)$$

Далі виконують кластеризацію днів (наприклад, k -means або ієрархічну) за відстанню між \tilde{v}_k (за потреби з DTW для зсувів у часі). У результаті отримують типи днів:

- «звичайний будній з двома піками»;
- «будній зі зсувом піків»;
- «вихідний / святковий згладжений»;
- «аномальний / подієвий».

Це дозволяє описувати закономірності не лише календарем, а й фактичною поведінкою попиту.

4. Детекція піків як подій над квантильним коридором. Пікові періоди визначають відносно коридору норми (10):

$$Peak(t) = \begin{cases} 1, & \bar{y}_t > q_{0.75}(h_t, d_t) + \lambda \cdot (q_{0.75}(h_t, d_t) - q_{0.25}(h_t, d_t)), \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (10)$$

де $\lambda > 0$ – параметр чутливості (рекомендовано $\lambda \in [0.5; 1.5]$). Суміжні інтервали з $Peak(t) = 1$ об'єднують у пікові події.

5. Параметризація пікових подій. Для кожної пікової події e (на інтервалі $t \in [t_s, t_f]$) обчислюють (11):

$$A_e = \max_{(t \in e)} y_t, \quad W_e = (t_f - t_s + \Delta t), \quad S_e = \sum_{(t \in e)} (y_t - q_{0.50}(h_t, d_t))_+. \quad (11)$$

Також фіксують час початку / піку / завершення для аналізу зсувів у часі.

6. Оцінювання стабільності закономірностей у часі (rolling-аналіз). Щоб перевірити, чи закономірності не змінюються, застосовують ковзне вікно (наприклад, 4–8 тижнів) і для кожного вікна повторюють кроки 2–5, після чого оцінюють дрейф профілів (12):

$$D(w) = \sum_h |q_{0.50}^{(w)}(h) - q_{0.50}^{(w-1)}(h)|. \quad (12)$$

Великі значення $D(w)$ сигналізують про структурні зміни (ремonti, зміни маршрутів, тарифів тощо).

7. Вплив зовнішніх факторів та пояснення відхилень. Для кількісної оцінки факторів використовують модель з екзогенними змінними (13):

$$y_t = q_{0.50}(h_t, d_t, cluster_t) + \beta_1 Holiday_t + f_1(T_t) + f_2(P_t) + \beta_2 Delay_t + \epsilon_t, \quad (13)$$

де $q_{0.50}(h_t, d_t, cluster_t)$ – базовий рівень з урахуванням типу дня, а f_1, f_2 – нелінійні ефекти (сплайни). Так відокремлюють регулярні закономірності від погодних / експлуатаційних впливів.

8. Практичні виходи методики (для розкладу та випуску). На основі результатів формують:

- ✓ таблиці інтервалів руху за типами днів (кластер → рекомендований інтервал);
- ✓ правила резерву: якщо прогнозований S_e перевищує поріг, додають n рейсів у вікно піку;

✓ тригери оперативного реагування: при Delay, вище порогу або при опадах P_t – коригування випуску / перерозподіл рухомого складу.

Переваги запропонованої методики. Методика (i) стійка до викидів, (ii) не вимагає припущення про нормальність попиту, (iii) автоматично виявляє типи днів за фактичним профілем, (iv) дає параметри піків, які безпосередньо використовуються в плануванні, (v) дозволяє контролювати зміну закономірностей у часі за допомогою rolling-аналізу.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі пасажиропотік розглянуто як часовий ряд y_t із дискретизацією Δt , що дало змогу формалізувати нерівномірність попиту та виокремити його регулярні й нерегулярні компоненти. Показано, що основні закономірності коливань визначаються добовою та тижневою сезонністю, а пікові навантаження мають стійкі часові межі, проте їх амплітуда й тривалість змінюються залежно від типу дня та умов функціонування мережі.

Запропоновано підхід до виявлення піків і «провалів» попиту на основі робастних (квантильних) оцінок та порогових правил, а також систему показників для параметризації пікових подій (амплітуда, тривалість, інтегральне навантаження). Оцінювання впливу зовнішніх факторів (календарних, погодних та експлуатаційних) дозволяє пояснювати відхилення від регулярного профілю та формувати сценарні рекомендації для планування інтервалів руху, випуску рухомого складу і резервів.

Перспективними напрямками подальших досліджень є: розширення набору даних (період спостережень, просторові рівні: зупинка / маршрут / коридор) та інтеграція різних джерел (AFC, AVL/GPS, події календарі); удосконалення моделей прогнозування з урахуванням просторово-часових залежностей і взаємозв'язків між маршрутами / лініями; побудова адаптивних правил керування інтервалами руху в реальному часі на основі індикаторів відхилень попиту та надійності; формалізація впливу нестандартних подій (масові заходи, аварії, перекриття) та розробка методів швидкої ідентифікації таких періодів; розробка метрик якості транспортного обслуговування, що безпосередньо пов'язують коливання попиту з часом очікування, переповненням і регулярністю руху.

Список використаної літератури:

1. A comparative study on hybrid linear and nonlinear modeling framework for air passenger traffic forecasting / *Y.Bao, D.Yi, T.Xiong and other* // *Advances in Information Sciences and Service Sciences*. – 2011. – Vol. 3, Issue 5. – P. 243–254. DOI: 10.4156/aiss.vol3.issue5.28.
2. *Rodríguez-Doncel V.* A model of air transport passenger incidents and rights / *V.Rodríguez-Doncel, C.Santos, P.Casanovas*. – 2014. – P. 22–41. DOI: 10.3233/978-1-61499-468-8-55.
3. *Marie-Sainte S.L.* Air passenger demand forecasting using particle swarm optimization and firefly algorithm / *S.L. Marie-Sainte, T.Saba, S.Alotaibi* // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. – 2019. – Vol. 16, No. 9. – P. 3735–3743. DOI: 10.1166/jctn.2019.8242.
4. *Dang Y.* Air passenger flow structure analysis with network view / *Y.Dang, W.Li* // *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. – 2010. – Vol. 10, Issue 5. – P. 167–174.
5. Air passengers' purchasing behavior of specialty products at airport: An empirical study / *J.Jing He, L.Xu, X.Ning Guo, Y.Hu* // Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series. – 2021. – P. 13–17. DOI: 10.1145/3503491.3503494.
6. *Давідич Ю.О.* Розробка розкладу руху транспортних засобів при організації пасажирських перевезень : навч. посіб. / *Ю.О. Давідич*. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 345 с.
7. *Доля К.В.* Аналіз сучасних наукових підходів до питання організації транспортних процесів в системах пасажирських перевезень : монографія / *К.В. Доля, О.С. Доля*. – Boston : Published by Primedia eLaunch, 2025. – 176 с.
8. *Глевська К.Ю.* Удосконалення організації перевезень пасажирів міським громадським транспортом за критеріями якості : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / *К.Ю. Глевська*. – Київ, 2017. – 20 с.
9. *Понкратов Д.П.* Вибір пасажирями шляху пересування у містах : монографія / *Д.П. Понкратов, Г.І. Фалецька*. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 164 с.
10. An analysis and decomposition ensemble prediction model for air passenger demand based on singular spectrum analysis / *X.Liang, Z.Guo, Q.Zhang and other* // *System Engineering Theory and Practice*. – 2020. – Vol. 40, Issue 7. – P. 1844–1855. DOI: 10.12011/1000-6788-2019-1010-12.
11. *Huang F.* Analyses of characteristics of air passenger group mobility behaviors / *F.Huang, J.Peng, M.You* // *Acta Physica Sinica*. – 2016. – Vol. 65, No. 22. DOI: 10.7498/aps.65.228901.
12. *Ida Y.* Changes of air passenger distribution patterns in japan / *Y.Ida* // *Journal of Human Geography*. – 1993. – Vol. 45, No. 3. – P. 221–243. DOI: 10.4200/jhg1948.45.221.
13. *Reyna O.S.S.* Complex networks of the air passenger traffic in Culiacan's airport / *O.S.S. Reyna, I.F. De La Mota* // Paper presented at the 30th European Modeling and Simulation Symposium (EMSS). – 2018. – P. 123–128.
14. COVID-19: Transforming air passengers' behaviour and reshaping their expectations towards the airline industry / *A.Afaq, L.Gaur, G.Singh, A.Dhir* // *Tourism Recreation Research*. – 2021. – Vol. 48. – P. 1–9. DOI: 10.1080/02508281.2021.200821.
15. Development of 8 kW charging generator for railway air-conditioned passenger car / *P.Zuo, H.Li, W.Liu, D.Liu* // *China Railway Science*. – 2010. – Vol. 31, Issue 2. – P. 137–140.

16. Niu W. Intelligent air passenger transportation system utilizing integrated space-ground information network / *W.Niu* // *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*. – 2019. – Vol. 40, Issue 1. DOI: 10.7527/S1000-6893.2018.22415.
17. Dang Y. Invulnerability analysis of chinese air passenger flow network based on centrality / *Y.Dang, S.Song* // *Complex Systems and Complexity Science*. – 2013. – Vol. 10, Issue 1. – P. 75–82.
18. Sharma H.K. Short-term forecasting of air passengers based on the hybrid rough set and the double exponential smoothing model / *H.K. Sharma, K.Kumari, S.Kar* // *Intelligent Automation and Soft Computing*. – 2019. – Vol. 25, No. 1. – P. 1–14. DOI: 10.31209/2018.100000036.
19. Valutyte R. Striking a healthier balance between air passenger rights and air carriers' vital interests in the light of COVID-19 / *R.Valutyte* // *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. – 2020. – Vol. 8 (2). – P. 546–558. DOI: 10.9770/jesi.2020.8.2(33).
20. Bravo A. The boeing 737 maxreturn to service and competition: How passengers' preferences would change due to the latent fear of flying / *A.Bravo, D.R. Vieira, G.Ferrer* // *Journal of Modern Project Management*. – 2020. – Vol. 8 (3). – P. 113–123. DOI: 10.19255/JMPM02510.
21. Raheja D. The causal relationship between GDP and air passenger traffic: Evidence from singapore / *D.Raheja, Z.W. Zhong* // *International Journal of Transport Economics*. – 2018. – Vol. 145, No. 1. – P. 83–95. DOI: 10.19272/201806701005.
22. Fassiaux S. The difficult balance between the crisis of the aviation sector and air passenger rights in the era of covid-19 / *S.Fassiaux* // *Revista De Derecho Comunitario Europeo*. – 2021. – Vol. 68. – P. 185–225. DOI: 10.18042/cepc/rdce.68.06.
23. Cai J. The dynamic correlation between civil aviation passenger traffic volume and its influential factors based on DCC-GARCH model / *J.Cai, N.Zhang*. – 2020. – Vol. 2. – P. 35–46. DOI: 10.1007/978-981-13-9406-5_76.
24. Saifei N. The spatial and temporal dimensions of the interdependence between the air passenger industry and regional economy in the yangtze river delta / *N.Saifei, G.Renxu* // *Tropical Geography*. – 2021. – Vol. 41, Issue 2. – P. 340–350. DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003324.

References:

1. Bao, Y., Yi, D., Xiong, T. et al. (2011), «A comparative study on hybrid linear and nonlinear modeling framework for air passenger traffic forecasting», *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, Vol. 3, Issue 5, pp. 243–254, doi: 10.4156/aiss.vol3.issue5.28.
2. Rodríguez-Doncel, V., Santos, C. and Casanovas, P. (2014), «A model of air transport passenger incidents and rights», pp. 22–41, doi: 10.3233/978-1-61499-468-8-55.
3. Marie-Sainte, S.L., Saba, T. and Alotaibi, S. (2019), «Air passenger demand forecasting using particle swarm optimization and firefly algorithm», *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, Vol. 16, No. 9, pp. 3735–3743, doi: 10.1166/jctn.2019.8242.
4. Dang, Y. and Li, W. (2010), «Air passenger flow structure analysis with network view», *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol. 10, Issue 5, pp. 167–174.
5. Jing He, J., Xu, L., Ning Guo, X. and Hu, Y. (2021), «Air passengers' purchasing behavior of specialty products at airport: An empirical study», *Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series*, pp. 13–17, doi: 10.1145/3503491.3503494.
6. Davidich, Yu.O. (2010), *Rozrobka rozkladu rukhu transportnykh zasobiv pry orhanizatsii pasazhyrskykh perevezen*, navch. posib., KhNAMH, Kharkiv, 345 p.
7. Dolia, K.V. and Dolia, O.Ye. (2025), «Analiz suchasnykh naukovykh pidkhodiv do pyttannia orhanizatsii transportnykh protsesiv v systemakh pasazhyrskykh perevezen», monohrafiia, Published by Primedia eLaunch, Boston, 176 p.
8. Hilevska, K.Yu. (2017), «Udoskonalennia orhanizatsii perevezen pasazhyriv miskym hromadskym transportom za kryteriiamy yakosti», Abstract of Ph.D. dissertation, 05.22.01, Kyiv, 20 p.
9. Ponkratov, D.P. and Faletska, H.I. (2015), *Vybir pasazhyramy shliakhu peresuvannia u mistakh*, monohrafiia, KhNUMH im. O.M. Beketova, Kharkiv, 164 p.
10. Liang, X., Guo, Z., Zhang, Q. et al. (2020), «An analysis and decomposition ensemble prediction model for air passenger demand based on singular spectrum analysis», *System Engineering Theory and Practice*, Vol. 40, Issue 7, pp. 1844–1855, doi: 10.12011/1000-6788-2019-1010-12.
11. Huang, F., Peng, J. and You, M. (2016), «Analyses of characteristics of air passenger group mobility behaviors», *Acta Physica Sinica*, Vol. 65, No. 22, doi: 10.7498/aps.65.228901.
12. Ida, Y. (1993), «Changes of air passenger distribution patterns in japan», *Journal of Human Geography*, Vol. 45, No. 3, pp. 221–243, doi: 10.4200/jjhg1948.45.221.
13. Reyna, O.S.S. and De La Mota, I.F. (2018), «Complex networks of the air passenger traffic in Culiacan's airport», *Paper presented at the 30th European Modeling and Simulation Symposium (EMSS)*, pp. 123–128.
14. Afaq, A., Gaur, L., Singh, G. and Dhir, A. (2021), «COVID-19: Transforming air passengers' behaviour and reshaping their expectations towards the airline industry», *Tourism Recreation Research*, Vol. 48, pp. 1–9, doi: 10.1080/02508281.2021.200821.
15. Zuo, P., Li, H., Liu, W. and Liu, D. (2010), «Development of 8 kW charging generator for railway air-conditioned passenger car», *China Railway Science*, Vol. 31, Issue 2, pp. 137–140.
16. Niu, W. (2019), «Intelligent air passenger transportation system utilizing integrated space-ground information network», *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, Vol. 40, Issue 1, doi: 10.7527/S1000-6893.2018.22415.
17. Dang, Y. and Song, S. (2013), «Invulnerability analysis of chinese air passenger flow network based on centrality», *Complex Systems and Complexity Science*, Vol. 10, Issue 1, pp. 75–82.

18. Sharma, H.K., Kumari, K. and Kar, S. (2019), «Short-term forecasting of air passengers based on the hybrid rough set and the double exponential smoothing model», *Intelligent Automation and Soft Computing*, Vol. 25, No. 1, pp. 1–14, doi: 10.31209/2018.100000036.
19. Valutyte, R. (2020), «Striking a healthier balance between air passenger rights and air carriers' vital interests in the light of COVID-19», *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, Vol. 8 (2), pp. 546–558, doi: 10.9770/jesi.2020.8.2(33).
20. Bravo, A., Vieira, D.R. and Ferrer, G. (2020), «The boeing 737 maxreturn to service and competition: How passengers' preferences would change due to the latent fear of flying», *Journal of Modern Project Management*, Vol. 8 (3), pp. 113–123, doi: 10.19255/JMPM02510.
21. Raheja, D. and Zhong, Z.W. (2018), «The causal relationship between GDP and air passenger traffic: Evidence from singapore», *International Journal of Transport Economics*, Vol. 145, No. 1, pp. 83–95, doi: 10.19272/201806701005.
22. Fassiaux, S. (2021), «The difficult balance between the crisis of the aviation sector and air passenger rights in the era of covid-19», *Revista De Derecho Comunitario Europeo*, Vol. 68, pp. 185–225, doi: 10.18042/cepc/rdce.68.06.
23. Cai, J. and Zhang, N. (2020), «The dynamic correlation between civil aviation passenger traffic volume and its influential factors based on DCC-GARCH model», Vol. 2, pp. 35–46, doi: 10.1007/978-981-13-9406-5_76.
24. Saifei, N. and Renxu, G. (2021), «The spatial and temporal dimensions of the interdependence between the air passenger industry and regional economy in the yangtze river delta», *Tropical Geography*, Vol. 41, Issue 2, pp. 340–350, doi: 10.13284/j.cnki.rddl.003324.

Доля Костянтин Вікторович – доктор технічних наук, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

<https://orcid.org/0000-0002-4693-9158>.

Наукові інтереси:

– транспорт.

Dolia K.V.

Identifying patterns in passenger flow fluctuations

The article considers passenger traffic in urban and suburban transport as a time series y_t with discretization Δt and proposes an approach to identifying patterns in its fluctuations. It is shown that the structure of demand is formed by a combination of daily and weekly seasonality, calendar effects, and the influence of external factors (weather, traffic reliability, event disturbances). To isolate the regular component, a «norm corridor» is constructed based on quantile estimates, which allows for a thorough description of typical demand levels and their natural variability within homogeneous time groups. An automatic classification of days by daily profile (clustering of normalized daily vectors) is proposed, which allows separating weekdays, weekends, holidays, and abnormal days based on actual data, not just the calendar. Peak events are defined as exceeding a quantile threshold; for each event, the amplitude, duration, and integral load are calculated, which are directly interpreted from the perspective of the need for rolling stock production and reserves. In addition, rolling analysis is used to control the stability of patterns over time, and regression analysis is used to quantitatively assess the impact of temperature, precipitation, holidays, and delays. The practical result is a system of indicators and rules suitable for adjusting traffic intervals, planning increased output during peak hours, and responding quickly to demand fluctuations, which improves service quality and reduces costs, thereby increasing the reliability of transportation, passenger comfort, and the efficient use of resources in the network.

Keywords: passenger flow; time series; seasonality; peak periods; quantiles; day clustering; transport reliability; demand forecasting.

Стаття надійшла до редакції 17.12.2025.