

УДК 519.47:656.222

В.В. Скалозуб, В.В. Великодний, М.С. Чередниченко

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ВАНТАЖНИМИ
ПЕРЕВЕЗНЯМИ ЗА УМОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРИТЕТУ
ВИПЛАТ МІЖ ВЛАСНИКАМИ ВАГОННИХ ПАРКІВ**

**Особливості економіко-математичного моделювання процесів
залізничних перевезень вантажів багатьма власниками вагонних
парків при забезпеченні паритетних розрахунків за використання
вагонів**

В роботі [1] побудовано математичні моделі, призначені для оптимального планування перевезень, в яких ураховуються індивідуальні властивості засобів перевезень. У них транспортні засоби являються неоднорідними, мають різноманітні відмінності між собою, зокрема, відносини власності. Класичні математичні моделі оптимального планування, наприклад, з використанням моделей транспортної задачі, більшість інших відомих розподільчих моделей планування [2], вважають засоби перевезень (елементи потоків, тощо) однорідними. Умова неоднорідності носіїв транспортних потоків приводить до суттєвих ускладнень задач планування і управління, розширює сферу застосування моделей і методів компромісно-оптимального вибору.

Значною проблемою організації залізничних вантажних перевезень є використання вагонних парків іноземних власників (іновагонів - ІВ). Їх експлуатація розширює ресурс для перевезень, але потребує додаткових коштів, тому що встановлено нерівномірний тариф за використання ІВ на полігонах іноземних держав. Між залізничними адміністраціями різних країн щомісяця ведуться розрахунки за експлуатацію "чужих" вагонів на своїх залізничних полігонах. Одним із базових принципів планування і організації вантажних перевезень являється забезпечення паритету при взаєморозрахунках залізничних адміністрацій. Створенню математичних моделей для реалізації паритетного управління вантажними перевезеннями і присвячена розробка.

Задача управління вантажними перевезеннями за умови забезпечення паритету плати між залізничними адміністраціями

Комплексне завдання із визначення стратегії і забезпечення управління вантажними вагонними парками, яке забезпечує виконання умов паритету плати між залізничними адміністраціями (завдання ППЗА) за використання вагонів власності інших країн за встановлений період, являє одну з першочергових проблем організації перевезень на залізницях України. В загальному вигляді постановка завдання щодо забезпечення паритету плати, ППЗА, складається з наступного. На початку планового періоду вважаються визначеними погоджені щодобові завдання з експорту ($Ex(t)$) та імпорту ($Imp(t)$) вантажів, t – етап планування, доба. У завданнях-планах перевезень для періодів t також встановлено кількість і род вантажів, відповідно і вагонів, станція надходження вагонів за кордон - на полігон залізничної адміністрації, станція призначення вантажів. Умови експлуатації вагонів іноземних власників і вимоги щодо розрахунків за їх використання відповідають [3]. На основі графіків функцій завдань на перевезення при відомих (нормативних) середньо добових переміщеннях навантажених і порожніх вантажних вагонів на залізницях, а також відомих термінах операцій вивантаження, однозначно визначених стикових станціях повернення вагонів до країни-власника, для кожного вагону можливо розрахувати очікуваний термін перебування на полігоні кожної залізничної адміністрації. На підставі цих розрахунків визначаються очікувані для завдань ($Ex(t)$, $Imp(t)$) показники плати за використання вагонів іноземних власників, а також сальдо $S_D(t) = V(Ex(t)) - V(Imp(t))$. Регулювання за умов забезпечення паритету повинно бути таким, щоб отримати $\sum_t S_D(t) = \sum_t (V(Ex(t)) - V(Imp(t))) = \sum_t V(Ex(t)) - \sum_t V(Imp(t)) \approx 0$. Через $V(*)$ позначено функцію плати за використання ІВ, яка відповідає правилам [3].

При постановках задачі управління найбільш суттєвим є визначання параметрів керування, за рахунок вибору значень яких саме і відбувається переведення керованої системи до потрібного стану. У нашому випадку системою являються вагонні парки інших залізничних адміністрацій, а стан системи визначається кількістю ІВ різного роду у період t та середнім терміном експлуатації вагонів на

власному полігоні. Для більш повної характеристики параметрів регулювання також необхідно визначати період дії того чи іншого керування, в продовж якого значення показників (кількість вагонів різного роду, середній термін, квота, їх утримання на різних залізницях) залишаються незмінними.

Слід урахувати можливість існування таких завдань на перевезення ($Ex(t)$, $Imp(t)$), а також внутрішніх потреб щодо перевезень у період планування, які не дозволяють забезпечити бажану умову ефективності регулювання – $\sum_t S_D(t) \approx 0$. Тому більш коректною є постановка завдання по регулюванню вагонними парками відповідно до якого необхідно встановити послідовність керувань (визначати кількість вагонів різних родів, термін їх утримання, період дії керування) за період t що забезпечує мінімальне значення абсолютної величини сальдо $\sum_t abs(S_D(t)) \rightarrow \min$.

При реалізації постановок завдань щодо регулювання за умови дотримання паритету, ППЗА, виділяються дві складові, два етапи рішення:

- визначення значень параметрів керування,
- розв'язання завдання щодо реалізації оптимального керування.

Перший етап реалізується методами оптимального регулювання, за рахунок побудови відповідної моделі регулятора. Для реалізації наступного етапу і розрахунку фактичного плану перевезень на полігоні декількох залізниць, який дає змогу забезпечити відповідне оптимальне керування, пропонується використовувати постановку завдань із планування перевезень на основі модифікованої за рахунок уведення додаткових обмежень моделі транспортної задачі.

Обмеження, які додаються до завдання оптимального планування перевезення вантажів власним вагонним парком та іновагонами, поданого нижче, забезпечують побудову плану з встановленим діапазоном плати країні власнику за використання її вагонів.

У зв'язку з відмінністю характеристик реального процесу перевезень від нормативних або середніх значень, що визначаються на підставі аналізу даних моніторингу з використанням автоматизованих систем, фактичні величини параметрів керування будуть відрізнятися від попередньо запланованих. Саме тому постановка завдання щодо забезпечення паритету ППЗА передбачає

необхідність постійного контролю за кількістю і термінами використання вагонів власності України за кордоном, а також визначення тенденцій і прогнозування цих показників. Відповідно [3] при регулюванні парками інованів із умов забезпечення паритету виплат при щомісячних розрахунках ураховується наступне: для вагонів – закінчення рейсів, для контейнерів – загальний період перебування. При цьому на підставі даних автоматизованих систем перевізного процесу необхідно виконувати прогнозні розрахунки таких характеристик: середній термін експлуатації вагонів Укрзалізниці (УЗ) на полігоні Росії (РЖД), прогноз нев'язок (відхилень) системи паритетних параметрів на момент закінчення розрахункового періоду, аналіз тенденцій використання вагонів УЗ на полігоні залізниць РЖД. На рис. 1, рис. 2 представлено графіки реалізації деяких процесів використання вагонів власності УЗ на полігоні залізниць РЖД і навпаки, які дають уяву про складність їх математичного моделювання і прогнозування.

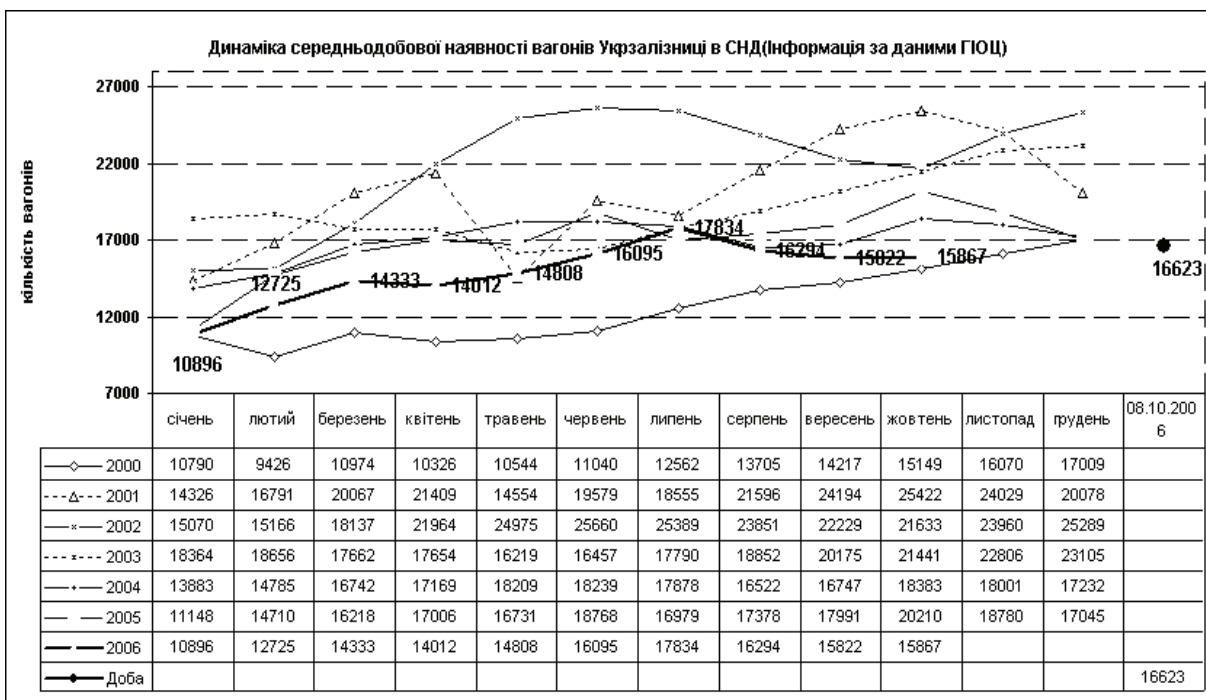


Рисунок 1 - Графіки використання вагонів різними залізничними адміністраціями

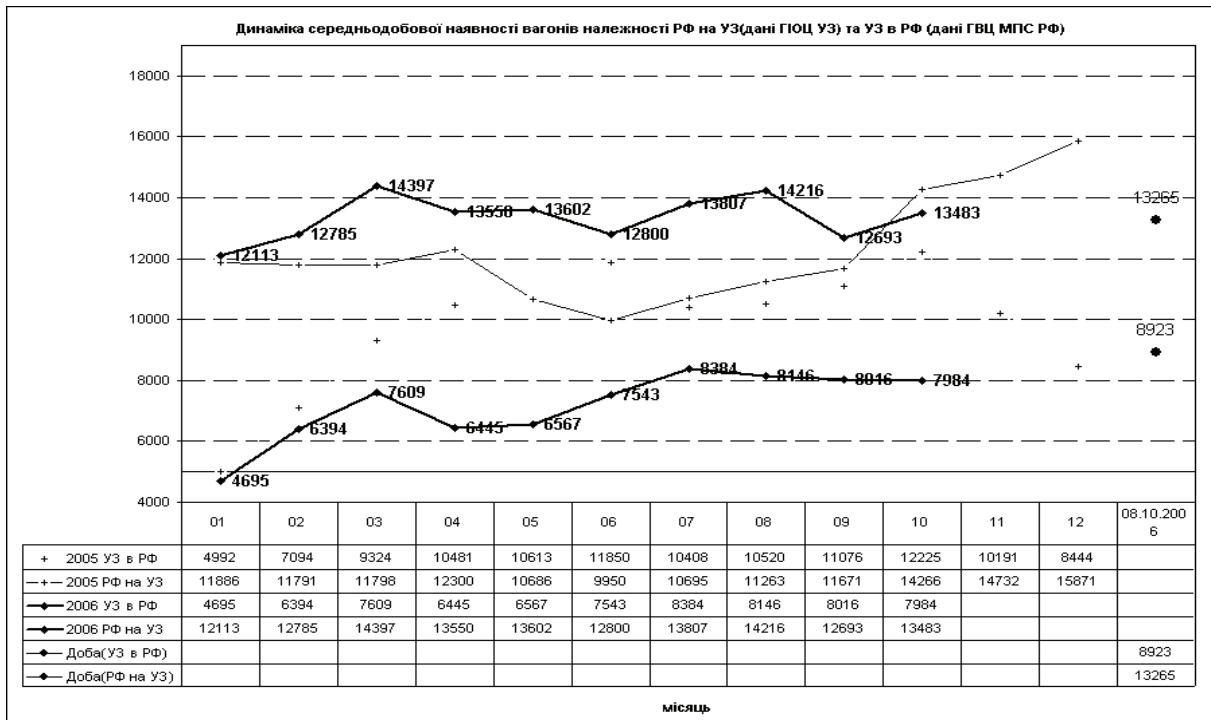


Рисунок 2 - Графік наявності вагонів належності Росії на залізницях України

Математичні моделі задачі управління вагонними парками за умови паритету взаємних виплат між залізничними адміністраціями

При регулюванні вагонними парками за умови дотримання паритету, виділяються два етапи: визначення значень параметрів керування та розв'язання завдання по реалізації оптимального керування. Математичні моделі що використовуються при цьому суттєво відмінні. Для спрощення розглядається задача забезпечення умови паритету взаємних виплат між двома залізничними адміністраціями (в першу чергу між РЖД та Уз). Перехід до математичних моделей загального випадку оснований на попарному аналізі виплат для усіх адміністрацій. Вважаються заданими погоджені щодобові завдання на вантажні перевезення на кожний етап (доба) планового періоду t_j , $j=1,2,\dots,n_t$, які визначені у вагонах. У завданнях для етапів t_j , встановлено кількість і род вагонів, станція надходження вагонів на полігон залізничної адміністрації, станція призначення вантажів. Будемо визначати завдання на перевезення за допомогою окремих вагонів v_k :

$$v_k(t_{k(j)}^1, p_k, g_k, s_k^c, s_k^n, t_{k(j)}^2, t_k^*), \quad k=1,2,\dots,n_v(j), \quad (1)$$

де

- $n_v(j)$ – кількість вагонів завдання етапу (добі) t_j , - $t_{k(j)}^1$ – дата (етап плану) надходження вагону v_k на полігон залізничної адміністрації, - $t_{k(j)}^2$ – прогнозована дата (етап плану) повернення вагону v_k до країни-власника, або очікуваний термін перебування вагону за кордоном, - t_k^* – фактична дата повернення вагону v_k до країни-власника, - p_k – род вагону v_k , - g_k – род вантажу v_k , - s_k^c – стикова станція переходу вагону на полігон іншої залізничної адміністрації, s_k^n – станція призначення.

З урахуванням (1) шляхом узагальнення (визначення суми) по $k=1,2,\dots,n_v(j)$ розраховуються функції завдання на перевезення з експорту ($Ex(t_j)$) та імпорту ($Imp(t_j)$) для кожного періоду t_j , $j=1,2,\dots,n_t$. При плануванні ураховуються відстані і нормативні терміни руху між станціями s_k^c , s_k^n , а також час виконання операцій розвантаження, тощо. При плануванні ураховується, що для кожного вагону можливо розрахувати очікуваний термін перебування на полігоні кожної залізничної адміністрації на підставі нормативних середньо добових переміщень навантажених і порожніх вантажних вагонів на залізницях, а також відомих термінах операцій вивантаження, однозначно визначених стикових станціях повернення вагонів до країни-власника.

Для завдань на перевезення ($Ex(t_j)$, $Imp(t_j)$), що сформовані на основі даних, які відповідають (1) за рахунок групування і підсумовування, визначаються очікувані показники плати за використання вагонів іноземних власників, а також для кожного етапу планування розраховується різниця, сальдо $S_D(t) = V(Ex(t_j)) - V(Imp(t_j))$, якщо $V(*)$ - функція плати за використання іновагонів, яка відповідає правилам експлуатації вагонів [3].

Будемо вважати системою сукупність вагонних парків залізничних адміністрацій (ЗА), що використовуються для перевезень. Стан системи $Q(t_j) = \{Q_q(t_j), \bar{U}(t_j)\}_{n_q}$ визначається як кількість іновагонів різного роду (p) у період t_j , які знаходяться на полігонах різних залізничних адміністрацій (n_Q - загальна кількість

адміністрацій що розглядаються у задачі планування), $\bar{U}(t_j)$ - вектор параметрів керування. Зміна станів відповідає послідовності планових періодів організації перевезень t_j , $j=1,2,\dots,n_t$. Визначимо параметри керування $\bar{U}(t_j)$, які забезпечують переведення керованої системи $Q(t_j)$ до потрібного стану $Q(t_{j+h})$ на наступних етапах t_{j+h} , $h > 0$. Будемо характеризувати керування на етапі t_j такими параметрами:

- додатковий (до встановленого нормативного) середній термін експлуатації іновагонів різного роду (р) на власному полігоні $u_p^\tau = \tau_p(t_j)$,

- початок періоду застосування управління $u_p^\tau = \tau_p(t_j) - u_p^T(t_j)$,

- період $u_p^D(t_j)$ дії керування $u_p^\tau = \tau_p(t_j)$, в продовж якого значення показників (середній термін утримання вагонів різного роду на різних залізницях відповідної адміністрації) залишаються незмінними.

Таким чином маємо наступне представлення для керування парками іновагонів

$$\bar{U}(t_j) = (\bar{u}_p^\tau, \bar{u}_p^T, \bar{u}_p^D) \quad (2)$$

Математична постановка задачі по регулюванню вагонними парками за умови забезпечення паритету виплат залізничних адміністрацій полягає у наступному. Необхідно розрахувати послідовність керувань (визначати кількість вагонів різних родів, термін їх утримання, період дії керування) за період t що забезпечує мінімальне значення абсолютної величини сальдо S_D

$$\text{abs}(S_D) = \text{abs}\left(\sum_j S_D(t_j)\right) \rightarrow \min_{U \in D_U}, \quad (3)$$

$$S_D = \sum_j S_D(t_j) \geq 0, \quad (4)$$

де

$$\sum_j S_D(t_j) = \sum_j (V(\text{Ex}(t_j)) - V(\text{Imp}(t_j))) = \sum_j V(\text{Ex}(t_j)) - \sum_j V(\text{Imp}(t_j)),$$

D_U – допустимі значення керувань $\bar{U}(t_j)$ виду (2).

Обмеження (4) забезпечує позитивне сальдо для УЗ при плануванні.

При реалізації постановок задач із регулювання вагонними парками за умови дотримання паритету виділяються два етапи

рішення: визначення значень параметрів керування на етапах планування $\bar{U}(t_j)$, розв'язання задачі щодо реалізації оптимального керування. Перший етап реалізується методами оптимального регулювання, за рахунок побудови відповідної моделі регулятора. У найпростішому вигляді можна запропонувати наступну процедури розрахунку головної компоненти вектору (2) $u_p^r = \tau_p(t_j)$.

На основі планів (Ex(t_j)) та імпорту (Imp(t_j)) для кожного періоду t_j , $j=1,2,\dots,n_t$, відомих відстаней між станціями надходження вагонів із за кордону, станцій призначення та нормативних термінів щодобового пересування завантажених і порожніх вагонів, а також термінів операцій переробки вантажів, визначаються прогнозовані терміни експлуатації вагонів, нарешті - відповідні суми виплат за їх використання. Щодобове визначення (за рахунок автоматизованих систем Укрзалізниці) і накопичення різниць між відповідними виплатами дозволяє розрахувати графік поточного порушення балансу виплат. Відомі виплати за добове використання вагонів різного роду (криті, цистерни, інші), а також відомі терміни знаходження вагонів на полігоні іншої держави, дають змогу для заданої необхідної кількості вагонів розрахувати значення додаткового терміну використання іновагонів на полігоні залізниць, щоб зменшити різниці $\Delta_s(t_j)$.

Таким чином, головними результатами першого етапу організації управління парками ІВ являється розрахунок $\Delta_s(t_j)$ і відповідних значень додаткового терміну використання цих вагонів. Для реалізації наступного етапу оптимального регулювання будемо використовувати постановку завдань із планування перевезень, подібних до роботи [4], яку для забезпечення паритету виплат між адміністраціями модифікуємо за рахунок уведення додаткових обмежень. Детальні елементи постановки задачі наведено у [5]. Саме вони забезпечують побудову плану з встановленим діапазоном плати країні власнику за використання її вагонів. Щоб сформулювати необхідні додаткові обмеження для задачі оптимального планування представимо різницю виплат $\Delta_s(t_j)$ етапу t_j наступним чином. Нехай нормативний сумарний час перебування кожного вагону з характеристиками (1) на маршруті у іноземній країні визначається

рівняннями як сума термінів руху, розвантаження, формування поїзду [4], або подібними більш детальними рівняннями, а вартість вагонодобі з урахуванням прогресуючої шкали виплати за використання вагону роду ("p_k") становить b(p_k), тоді сумарна вартість використання іновагонів k = 1, 2, ..., n_v(j), які надійшли на етапі t_j буде складати

$$W_{UZ}^{Poc}(t_j) = \left(\sum_{k=1}^{n_v(j)} (T_k^{(p)} b(p_k)) \right), \quad (5)$$

де

$$T_k^{(p)} = t_{k(j)}^2 - t_{k(j)}^1, \Delta_s(t_j) = W_{Poc}^{UZ}(t_j) - W_{UZ}^{Poc}(t_j).$$

Оцінка $W_{Poc}^{UZ}(t_j)$ розраховується як і (5).

Рівняння балансу, яке встановлює паритет виплат ЗА, має вид

$$\sum_i^{j-1} \Delta_s(t_i) + \sum_{k=1}^{n_{vPP}(j)} (T_k^{(p)} + \Delta_p) b(p_k) - \sum_{k=1}^{n_{vUZ}(j)} (T_k^{(p)}) b(p_k) = 0. \quad (6)$$

Рівняння (6) показує, що за рахунок вибору додаткового терміну Δ_p утримання іновагонів роду ("p_k") власності Росії, РФ, компенсується як накопичене сальдо (перший член) попередніх етапів планування, так і вартість перебування вагонів УЗ на полігоні залізниць РФ (останній член). У (6) позначено як n_{vPP}(j), n_{vUZ}(j) – кількості вагонів РФ на Укрзалізниці і Укрзалізниці на РФ, відповідно. З рівняння (6) можливо розрахувати необхідну додаткову кількість діб Δ_p , що його забезпечує. Наприклад, для виконання (6) шляхом експлуатації вагонів лише одного роду (піввагони) необхідно забезпечити додаткове використання n_v^П іновагонів терміном (діб)

$$\Delta_k^П = \sum_{i=1}^j \Delta_s(t_i) / (b^П(p_k) n_v^П). \quad (7)$$

Для вибору управлінь щодо додаткового Δ_p утримання вагонів різного роду (p_k), кількість кожного з яких складає n_v^П, необхідно використовувати наступне рівняння

$$\sum_{i=1}^j \Delta_s(t_i) = \sum_{(p)} (\Delta_p b(p) n_v^П) \quad (8)$$

Відповідно до (8) різну кількість вагонів різних родів додатково можна використовувати різну кількість діб, щоб виконати цю умову.

Таким чином, на підставі даних про експлуатацію іновагонів і потреби у вантажних перевезеннях на основі (5) – (8) можна

визначити параметри керування (1) на поточному етапі t_j , необхідні для виконання умов паритету взаємних виплат. Саме ці величини використовуються при постановках завдань оптимального планування з урахуванням паритету виплат між залізничними адміністраціями.

Другий етап регулювання полягає у розрахунку завдання з оптимального планування, математична модель якого має наступний вид

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R \left(\tilde{c}_{ijr} x_{ijr} + \sum_{t=1}^{t_{ijr}^*} \tilde{c}_{ijrt} \bar{x}_{ijrt} \right) \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n \left(x_{ijr} + \sum_{t=1}^{t_{ijr}^*} \bar{x}_{ijrt} \right) = a_{ir} \quad i = 1, \dots, m; \quad r = 1, \dots, R; \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m \left(x_{ijr} + \sum_{t=1}^{t_{ijr}^*} \bar{x}_{ijrt} \right) = b_{jr} \quad j = 1, \dots, n; \quad r = 1, \dots, R; \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R a_{ir} = \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R b_{jr}. \quad (12)$$

$$\mathfrak{F}_k^{(p)} = \ddot{t}_{k(j)}^2 - t_{k(j)}^1 \leq t_{k(j)}^2 - t_{k(j)}^1 + \Delta_p, \quad k \in N_{IB}(j), \quad p \in P_B, \quad (13)$$

$$\sum_{k \in N_{IB}(j)} b(p_k) \mathfrak{F}_k^{(p)} = \Delta_S(t_j) \leq W_{Poc}^{UZ}(t_j) - W_{UZ}^{Poc}(t_j) \quad (14)$$

У поданій моделі планування дві складові у (9) - (11) визначають участь у планування як власних вагонів інвентарного парку, так і чужих вагонів, IB, а система додаткових обмежень (13), (14) ураховує умови забезпечення паритету виплат між залізничними адміністраціями. Рівняння (13) встановлюють оптимальний граничний термін використання кожного із $k \in N_{IB}(j)$ іновагонів $\mathfrak{F}_k^{(p)}$, що належать до родів $p \in P_B$, де $N_{IB}(j)$ – множина IB на етапі t_j , а P_B – множина родів вагонів. Інтегральне рівняння (14) показує, що розрахована у плані загальна плата за використання іновагонів не перевищує накопиченого сальдо за усі етапи планування $\Delta_S(t_j)$.

Крім того модель (9) - (14) також має відмінність у розрахунку матриці коефіцієнтів експлуатаційних витрат критерію (9), що виконується відповідно до рівнянь

$$\tilde{C}_{ij} = \tilde{e}_{ij1} + \tilde{e}_{j2} + \tilde{e}_{j3} + \tilde{e}_{j4} + \tilde{q}_{ij} + h_{ij} \quad (15)$$

де складові визначають:

\tilde{e}_{ij1} – експлуатаційні витрати по пересуванню порожнього вагону з пункту A_i до станції навантаження маршруту B_j ;

\tilde{e}_{j2} – експлуатаційні витрати по навантаженню вантажів у вагон;
 \tilde{e}_{j3} – експлуатаційні витрати по пересуванню навантаженого вагону від станції навантаження до станції вивантаження по маршруту B_j ;

\tilde{e}_{j4} – експлуатаційні витрати по вивантаженню вантажу;

\tilde{q}_{ij} – додаткові експлуатаційні витрати для іновагонів;

h_{ij} – додаткові штрафні виплати за використання іновагона забороненого роду, або із заданими номерами, не у попутному напрямку.

Наявність цих додаткових факторів позначається у відповідних коефіцієнтах знаком \tilde{f} , коли \tilde{f} – кожний із відмічених показників. Представлення складових \tilde{q}_{ij} , h_{ij} відповідає вимогам правил [3]. Для розв'язання задачі у формі (9) - (15) безпосередньо не можуть бути застосовані відомі методи, призначені для моделі транспортної задачі, що обумовлено обмеженнями (14) - (15).

Характеристики реального процесу перевезень зазвичай мають відмінність від нормативних або середніх значень, які використовуються при моделюванні процесів на етапі планування. Конкретні величина розрахункових параметрів повинні визначатися на підставі аналізу оперативних і накопичених даних моніторингу перевізного процесу з використанням автоматизованих систем. У загальному випадку фактичні величини параметрів керування також будуть відрізнятися від попередньо запланованих. Автоматизація планування перевезень за допомогою постановки задачі щодо забезпечення паритету виплат залізничних адміністрацій передбачає необхідність застосування постійного контролю за кількістю і термінами використання вагонів власності України за кордоном. Представлені у вигляді часових рядів спостережень ці дані становлять основу для визначення тенденцій і прогнозування показників щодо експлуатації вагонних парків власників України на полігонах залізниць РФ. Для забезпечення прийнятної якості регулювання вагонними парками необхідно на підставі зазначених даних спостережень будувати моделі для ідентифікації параметрів та прогнозування термінів утримання вагонів власності України, термінів руху вагонів за напрямками на різних полігонах залізниць.

Ці математичні моделі прогнозування складають важливу частину регулювання парками іновагонів на залізницях України.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скалозуб В.В., Землянов В.Б., О.В. Солтысюк, С.Ю. Цейтлин. Модели транспортной задачи для множества собственников вагонных парков // Системні технології, № 10 (28), 2004. С. 141 – 147.
2. Ермольев Ю.М., Ляшко И.И., Михалевич В.С., Тюття В.И. Математические методы исследования операций. – К.: Вища школа, 1979. – 312 с.
3. Правила эксплуатации, пономерного учета и расчетов за использование грузовых вагонов собственности других государств. – Киев. 1996. 82 с.
4. Тишкин Е.М. Информационно-управляющие технологии эксплуатации вагонного парка. Труды ВНИИАС, вып. 4. – Москва: 2004. – 184 с.

Получено 10.01.07 г.