

УДК 656.212.5:681.3

# АНАЛІЗ ВПЛИВУ СПЕЦІАЛІЗАЦІЇ СОРТУВАЛЬНИХ КОЛІЙ НА ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ РОЗФОРМУВАННЯ СОСТАВІВ

Д.М. Козаченко \*

Завідувач кафедри «Управління експлуатаційною роботою»

М.І. Березовий \*

Старший викладач кафедри «Станції і вузли»

О.І. Таранець \*

Студентка 5 курсу факультету «Управління процесами перевезень»

\* Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна

*На підставі імітаційного моделювання процесу розформування потоку составів виконано дослідження впливу спеціалізації сортувальних колій на величину розділових інтервалів на стрілках та енергетичних витрат, що пов'язані з гальмуванням відцепів в процесі скочування*

## 1. Вступ

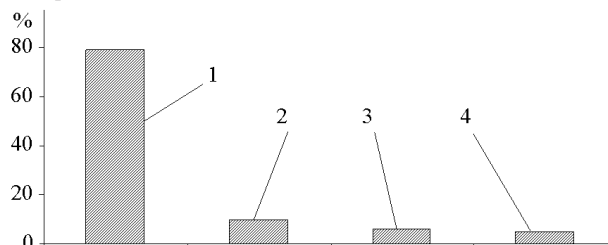
Одним із основних процесів, що виконуються на сортувальних станціях, є розформування составів на гірках. При цьому організація сортувального процесу повинна забезпечувати мінімальні витрати на розформування составів при беззаперечному дотриманні вимог інтервального і прицільного регулювання швидкості скочування відцепів. В [1, 2] в якості методу підвищення ефективності процесу розформування пропонується оптимізувати спеціалізацію колій сортувального парку таким чином, щоб забезпечити розділення відцепів на стрілках, розташованих якомога ближче до горба гірки. На жаль вказаний критерій не відображає зв'язку між спеціалізацією колій сортувального парку та експлуатаційними показниками роботи гірки. Результати імітаційних експериментів [3] показали, що розділові стрілки та їх співвідношення суттєво впливають на величину інтервалів в розрахунковій групі з трьох відцепів, в якій режими гальмування крайніх відцепів фіксовані. В той же час при розформуванні состава режими гальмування крайніх відцепів кожної розрахункової групи не є фіксованими, а тому інтервали на стрілках є взаємопов'язаними. Тому метою даної статті є дослідження впливу спеціалізації сортувальних колій на величину розділових інтервалів на стрілках та енергетичних витрат, пов'язаних з гальмуванням відцепів при розформуванні потоку составів. Рішення вказаної задачі може бути отримано на підставі імітаційного моделювання.

## 2. Статистичне моделювання характеристик відцепів составу

Для врахування впливу випадкових параметрів составів і відцепів на процес розпуску перед початком його імітації виконується статистичне моделювання характеристик окремих вагонів.

Як показує аналіз, параметри окремих вагонів не можна розглядати як незалежні випадкові величини. Дійсно, вірогідність появи у составі однорідного від-

чепа, що складається з вагонів одного типу з близькою вагою, значно вище величини  $p^n$ , де  $p$  – вірогідність появи одного такого вагону. Вказане явище можна пояснити наявністю достатньо великої кількості випадків масового навантаження одним відправником певного вантажу на адресу однієї станції, який слідує потім однією групою. Для ілюстрації на рис. 1 наведені статистичні дані по складу багатовагонних відцепів, що отримані на станції Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці.



**Рисунок 1.** Розподіл кількості багатовагонних відцепів:  
1 - відцепи з однорідних вагонів однієї вагової категорії;  
2- відцепи з однорідних вагонів різних вагових категорій;  
3- відцепи з різнорідних вагонів однієї вагової категорії;  
4 - відцепи з різнорідних вагонів різних вагових категорій

Для того, щоб врахувати цей факт, вибір призначення кожного вагона базується на представленні випадкового числа вагонів у відцепі  $m$  від  $n$  за допомогою геометричного розподілу, що відповідає характеру потоку відцепів на діючих гірках [4]. Приклад матриці ймовірностей залежних подій призначень вагонів для гірки з шістьма сортувальними коліями наведено у табл. 1. Як видно з даної таблиці, ймовірності того, що наступний вагон має те ж призначення, що і попередній, суттєво перевищують інші значення у кожному з рядків.

На підставі аналізу сортувальних листків можуть бути складені аналогічні таблиці для вагових категорій та типів вагонів в составах (див. табл. 2, 3).

Вага відцепів та основний питомий опір для кожного вагона можуть бути промодельовані як випадкові величини, що залежать від вагової категорії відчепа [5].

**Таблиця 1**  
Умовні ймовірності слідування вагонів на окремі  
призначення

		Призначення					
		1	2	3	4	5	6
Перший вагон		0,364	0,114	0,136	0,023	0,341	0,023
Призначення	1	0,693	0,041	0,078	0,009	0,174	0,005
	2	0,101	0,841	0	0,014	0,043	0
	3	0,179	0	0,522	0,030	0,254	0,015
	4	0,400	0,100	0	0,500	0	0
	5	0,080	0,008	0,042	0,002	0,867	0,002
	6	0,111	0	0	0	0,222	0,667

Оцінка адекватності методів моделювання составів виконана на основі статистичного аналізу випадкових величин інтервалів між відчепами, отриманих за даними сортувальних листків і в результаті моделювання. При цьому розглянуті наступні методи:

1. Призначення, вагова категорія та рід вагонів моделюються на підставі ймовірностей матриць залежних подій.

2. Призначення, вагова категорія та рід вагонів моделюються як незалежні випадкові події.

**Таблиця 2**  
Умовні ймовірності вагових категорій вагонів у складах

		Вагова категорія вагона					
		Пор	Л	СЛ	С	СТ	Т
Перший вагон		0,421	0,009	0,032	0,063	0,113	0,362
Вагова категорія вагона	Пор	0,883	0,002	0,009	0,013	0,024	0,069
	Л	0,143	0,556	0,175	0	0,048	0,079
	СЛ	0,155	0,039	0,625	0,063	0,036	0,082
	С	0,16	0	0,044	0,488	0,164	0,144
	СТ	0,214	0,003	0,01	0,081	0,434	0,258
	Т	0,151	0,001	0,01	0,019	0,059	0,759

**Таблиця 3**  
Умовні ймовірності типу вагонів у складах

		Тип вагона					
		Критий	Платф.	Піввагон	Цистерна	Зерновоз	8-в. цис.
Перший вагон		0,124	0,034	0,648	0,069	0,097	0,028
Тип вагона	Критий	0,57	0,022	0,276	0,079	0,035	0,018
	Платф.	0,071	0,665	0,183	0,066	0,01	0,005
	Піввагон	0,051	0,004	0,899	0,029	0,011	0,006
	Цистерна	0,088	0,015	0,251	0,62	0,015	0,011
	Зерновоз	0,061	0,007	0,081	0,037	0,81	0,004
	8-в. цис.	0,102	0,009	0,185	0,157	0	0,546

Визначення режимів гальмування відчепів здійснюється на основі ітераційного методу [6] за критерієм максимуму мінімального інтервалу між відчепами у составі

$$\min_{i=1}^{k-1} (\delta t_i (h_i, h_{i+1})) \rightarrow \max, \quad (1)$$

де  $k$  – кількість відчепів у составі;

$\delta t_i$  – інтервал між  $i$ -м та  $i+1$ -м відчепами на розділовій стрілці;

$h_i, h_{i+1}$  – режими гальмування відповідно  $i$ -го та  $i+1$ -го відчепів.

### 3. Оцінка адекватності методів моделювання составів

Для оцінки адекватності методів моделювання використано параметричний критерій Уїлкоксона [7].

Значення критерію Уїлкоксона визначаються за допомогою виразів

$$u_{\delta t} = R_{\delta t} - \frac{n_{\delta t}(n_{\delta t} + 1)}{2}, \quad (2)$$

$$u_{\delta \tau} = R_{\delta \tau} - \frac{n_{\delta \tau}(n_{\delta \tau} + 1)}{2}$$

де  $R_{\delta t}, R_{\delta \tau}$  – сума рангів, що відповідають елементам вибірок  $\delta t_i (i=1, \dots, n_{\delta t})$  та  $\delta \tau_j (j=1, \dots, n_{\delta \tau})$ .

Ранги  $r_i (r_j)$  являють собою номери елементів обох вибірок, розташованих у порядку зростання ( $r \in [1, n_{\delta t} + n_{\delta \tau}]$ ).

Приблизне критичне значення критерію  $U_{n_{\delta t}, n_{\delta \tau}, \alpha}$  може бути визначене за формулою

$$U_{n_{\delta t}, n_{\delta \tau}, \alpha} \approx \frac{1}{2} n_{\delta t} n_{\delta \tau} - \lambda_q \sqrt{\frac{1}{12} n_{\delta t} n_{\delta \tau} (n_{\delta t} + n_{\delta \tau} + 1)}, \quad (3)$$

де  $\lambda_q$  квантиль порядку  $q$  нормального розподілу  $N(0,1)$ ;

$q = 1 - \frac{\alpha}{2}$ , де  $\alpha$  – рівень значимості (прийнято  $\alpha = 0,05$ ).

При перевірці гіпотези:  $F_{\delta t} = F_{\delta \tau}$  проти конкуруючої гіпотези:  $F_{\delta t} \neq F_{\delta \tau}$  приймається двостороння критична область; при цьому перша гіпотеза відкидається, якщо  $\min(u_{\delta t}, u_{\delta \tau}) < U_{n_{\delta t}, n_{\delta \tau}, \alpha}$ .

В рамках дослідження спочатку було порівняно дві вибірки інтервалів між відчепами на розділових елементах, отриманих в результаті моделювання скочування реальних составів. У результаті розрахунку зазначених статистик для вибірок  $n_{1\delta t}$  та  $n_{2\delta t}$  отримані значення  $R_{1\delta t} = 23670$ ,  $u_{1\delta t} = 11580$  та  $R_{2\delta t} = 22995$ ,  $u_{2\delta t} = 11670$ . Значення критерію для розглянутих вибірок  $U_{1\delta t, 2\delta t, \alpha} = 10115,83$ . Оскільки  $\min(u_{1\delta t}, u_{2\delta t}) = 11580 > 10115,83$ , то вибірки  $n_{1\delta t}$  та  $n_{2\delta t}$  належать до однієї генеральної сукупності. В подальшому вибірки  $n_{1\delta t}$  і  $n_{2\delta t}$  було об'єднано і отримано вибірку  $(\delta t_1, \delta t_2, \dots, \delta t_n)$ .

Наступним етапом є перевірка гіпотези про те, що сукупності інтервалів  $(\delta t_1, \delta t_2, \dots, \delta t_n) - F_{\delta t}$  і  $(\delta \tau_1, \delta \tau_2, \dots, \delta \tau_m) - F_{\delta \tau}$ , отриманих в результаті скочування змодельованих составів, є статистично схожими:  $F_{\delta t} = F_{\delta \tau}$ .

У результаті розрахунку для вибірок  $\delta t_i$  та  $\delta \tau_j$  отримані значення  $R_{\delta t} = 67127$ ,  $u_{\delta t} = 20462$  та  $R_{\delta \tau} = 35704$ ,  $u_{\delta \tau} = 24678$ . Значення критерію  $U_{n_{\delta t}, n_{\delta \tau}, \alpha} = 20008,62$ . Так як  $\min(u_{\delta t}, u_{\delta \tau}) = 20462 > 20008,62$ , основна гіпотеза про приналежність вибірок  $\delta t_i$  і  $\delta \tau_j$  до однієї генеральної сукупності може бути прийнята, тобто метод статистичного моделювання потоку составів на підставі ймовірностей матриць залежних подій є адекватним.

Паралельно була виконана оцінка адекватності методу моделювання, коли призначення, вагова категорія та рід вагонів моделюються як незалежні випадкові події. Результати розрахунків, отриманих при порівнянні сукупності інтервалів  $(\delta t_1, \delta t_2, \dots, \delta t_n) - F_{\delta t}$  і  $(\delta \tau_1, \delta \tau_2, \dots, \delta \tau_m) - F_{\delta \tau}$ , отриманих в результаті скочування змодельованих составів показали, що такий метод не є адекватним, так як були отримані наступні значення рангів і критеріїв:  $R_{\delta t} = 87904$ ,  $u_{\delta t} = 41239$ ;  $R_{\delta \tau} = 12672$ ,  $u_{\delta \tau} = 2376$ ;  $U_{n_{\delta t}, n_{\delta \tau}, \alpha} = 19303,16 > \min(u_{\delta t}, u_{\delta \tau}) = 2376$ .

У табл. 4 наведено характеристики випадкових величин інтервалів між відчепами составів, отриманих

на підставі аналізу сортувальних листків та різними методами моделювання.

Таблиця 4

Параметри розподілу вибірок інтервалів між відчепами

Вибірка	Математичне очікування інтервалу, с	Середньоквадратичне відхилення інтервалу, с
$n_{1\delta t}$	8,80	3,41
$n_{2\delta t}$	8,72	2,90
$n_{1\delta t} + n_{2\delta t}$	8,71	3,24
$n_{\delta t}$	8,91	2,78
$n_{\delta \zeta}$	3,8	1,53

#### 4. Вплив спеціалізації колій сортувального парку на показники розформування составів

Для перевірки впливу спеціалізації сортувальних колій на величину інтервалів на розділових стрілках було проведено серію імітаційних експериментів по скочуванню потоку составів з гірки, колійний розвиток якої наведено на рис. 2.

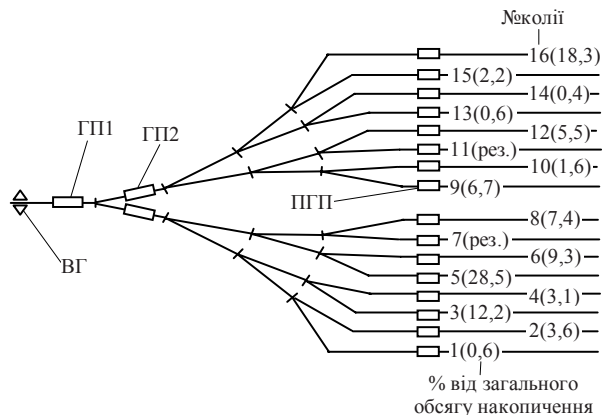


Рисунок 2. Принципова схема колійного розвитку сортувальної гірки парної системи станції Нижньодніпровськ-Вузол

В рамках дослідження виконано моделювання скочування потоку составів при 100 варіантах спеціалізації.

Аналіз отриманих вибірок інтервалів на розділових стрілках при різних варіантах спеціалізації показав, що розкид математичного очікування інтервалів між відчепами  $\delta t$ , не перевищує 1,5%; середнього квадратичного відхилення  $s_{\delta t}$  – 4,2%.

Порівняння вибірок інтервалів між відчепами при різних варіантах спеціалізації за критерієм Уїлкоксона показало їх належність до однієї генеральної сукуп-

ності. В якості прикладу нижче приведені значення рангів і критеріїв для двох характерних варіантів спеціалізації:  $R_{\delta t_i} = 24090$ ,  $u_{\delta t_i} = 12000$ ;  $R_{\delta t_j} = 24115$ ,  $u_{\delta t_j} = 12025$ ;  $U_{n_{\delta t_i}, n_{\delta t_j}, \alpha} = 10465,40 < \min(u_{\delta t_i}, u_{\delta t_j}) = 12000$ .

Різниця витрат повітря на гальмування по розглянутих варіантах становить 4,7%. Було також встановлено, що перерозподіл роботи по гальмуванню відцепів між першою та другою гальмівними позиціями при різних варіантах спеціалізації може сягати 12%. В той же час різниця сумарної погашеної енергетичної висоти м. ен. в. на першій та другій гальмівних позиціях не перевищує 1,5%. Для прикладу в табл. 5 наведені показники сортувального процесу при 4-х варіантах спеціалізації. В останніх двох рядках цієї таблиці наведено показники сортувального процесу при скочуванні составів, змодельованих 2-м методом. Це ще раз підтверджує, що такий метод моделювання составів не є адекватним.

Таблиця 5

Показники сортувального процесу в залежності від зміни спеціалізації сортувальних колій

Вар-т спеціалізації	Кількість включень уповільнювачів В та витрата повітря Р, м³						
	ГП1		ГП2		ПП		ΣР
	В <sub>1</sub>	Р <sub>1</sub>	В <sub>2</sub>	Р <sub>2</sub>	В <sub>3</sub>	Р <sub>П</sub>	
1	0,584	0,876	0,223	0,335	0,248	0,05	1,261
	1,577	2,366	0,601	0,902	0,669	0,134	3,402
2	0,53	0,795	0,3	0,45	0,248	0,05	1,295
	1,429	2,144	0,81	1,215	0,669	0,134	3,493
3	0,584	0,876	0,223	0,335	0,259	0,052	1,263
	1,577	2,366	0,601	0,902	0,699	0,14	3,408
4	0,509	0,764	0,284	0,426	0,216	0,043	1,233
	1,374	2,061	0,767	1,151	0,583	0,117	3,329
5	0,786	1,179	0,339	0,509	0,429	0,086	1,773
	1,048	1,571	0,452	0,679	0,571	0,114	2,364

\*в першому рядку вказано кількість включень уповільнювачів та витрату повітря на 1 розформований вагон, в другому те ж на 1 відцеп.

#### 5. Висновки

На основі виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

– спеціалізація сортувальних колій не впливає на величину інтервалів між відчепами на розділових елементах. Це пояснюється можливістю перерозподілу розділових інтервалів між відчепами завдяки інтервальному регулюванню швидкості їх скочування на 1-й та 2-й гальмівних позиціях;

– спеціалізація сортувальних колій незначною мірою впливає на величину енергетичних витрат на гальмування вагонів. У виконаних дослідженнях було отримане значення розсіву обсягів споживання повітря на гальмування при різних варіантах спеціалізації в межах 4,7%, що дає підставу знехтувати даними розходженнями.

#### Література

1. Типовой технологический процесс работы сортировочной станции. - М.: Транспорт, 1988. - 240 с.
2. А.А. Явна, Н.Н. Новгородов, Л.В. Пальчик, Е.Г. Шепилова. Совершенствование процедуры выбора специализации путей подгоровочного парка сортировочной станции// Вестник ВНИИЖТ. 1996. с. 22-28.
3. Дослідження впливу параметрів відцепів та умов їх скочування на величину інтервалів на розділових стрілках / Д.М. Козаченко, М.І. Березовий, Р.Г. Коробйова // Вісник Дніпр. нац. ун. зал. тр. імені академіка В. Лазаряна, – Д.: вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, – 2006. вип. 12. с. 78-82.

4. Бобровский В.И. Эргатические модели сортировочных горок // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2001.- №5.- с. 7 - 11.
5. Пособие по применению Правил и норм проектирования сортировочных устройств // Ю.А. Муха, Л.Б. Тишков, В.П. Шейкин и др. – М.: Транспорт, 1994. – 220 с.
6. Бобровский В.И., Рогов Н. В. Оптимизация режимов регулирования скорости отцепов при роспуске составов на горках // Вісник ДПТУ, Вип. 4. – Д.: ДПТ, 2004. – с. 174-182.
7. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. // Р. Шорм. – М.: Мир, 1970. – 368 с.

*Рассматривается задача оптимального оперативного планирования работы гидроэнергетической системы, состоящей из каскада водохранилищ и гидроэлектростанций. В качестве показателя эффективности используется критерий, учитывающий требования максимального приближения генерируемой мощности к графику нагрузок и поддержания заданного уровня воды в водохранилищах. С использованием методов оптимального дискретного управления получены алгоритмы оптимального динамического планирования*

УДК 621.22.01

## ОПТИМАЛЬНОЕ ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Л.М. Любчик**

Доктор технических наук, профессор, Лауреат  
Государственной премии Украины. Заведующий  
кафедрой компьютерной математики и математического  
моделирования Национального технического  
университета “Харьковский политехнический институт”  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 64002.

Контактный тел.: (057) 707 63 51  
e-mail: lyubchik@kpi.kharkov.ua

**Д.Н. Нурмахматов**

Заместитель генерального директора по техническим  
вопросам ПО «Цветмет», г. Москва

**С.А. Шпатенко**

Кандидат технических наук.  
Заместитель Генерального директора ООО  
«Харьковтурбоинжиниринг»

### 1. Введение

Важную роль в современной энергетике играют гидроэлектростанции (ГЭС), для которых характерна низкая себестоимость вырабатываемой электроэнергии, высокая маневренность в режимах переменных нагрузок, сравнительно малый ущерб от загрязнения окружающей среды. Наиболее эффективное использование водных и гидроэнергетических ресурсов достигается при создании и эксплуатации каскадов водохранилищ и ГЭС, образующих единый водохозяйственный комплекс. При этом возникает возможность эффективного перераспределения и регулирования стока и маневрирования вырабатываемой мощностью в неравномерных режимах работы ГЭС, обусловленных изменяющейся нагрузкой.

Повышение эффективности эксплуатации сложных гидроэнергетических систем в значительной мере связано с совершенствованием планирования и опера-

тивно-диспетчерского управления их работой [1]. При этом выработка краткосрочных плановых решений должна осуществляться с учетом ряда требований и ограничений. Наиболее существенными среди них являются условия обеспечения максимального приближения значений вырабатываемой мощности к заданному диспетчерскому графику нагрузок, в том числе и в пиковых режимах, и условия поддержания заданного уровня воды в водохранилищах в условиях нестационарного притока и стока с учетом различных технологических ограничений и требований безопасности.

Динамический характер процессов, протекающих в сложных гидроэнергетических системах, наличие взаимосвязей между водохранилищами каскада, необходимость оперативной корректировки планов-графиков выработки электроэнергии при изменяющихся условиях предопределяет необходимость использования при решении задач оперативного планирования