

ПРО НЕОБХІДНІСТЬ ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ДИНАМІКИ ПРИВОДУ ТА КАНАТНОЇ СИСТЕМИ НА НОРМАТИВНЕ ЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ВАГОНІВ ПІДВІСНОЇ КАНАТНОЇ ДОРОГИ

Вступ

Підвісні канатні дороги (ПКД) будь-якого конструктивного виконання та призначення відносяться до об'єктів підвищеної небезпеки, тому ретельний вибір та обґрунтування їх параметрів є вкрай важливим. При цьому слід враховувати якомога більше факторів як на етапі проектування, так і під час експлуатації.

Одним із параметрів, які впливають на безпеку перевезень, є швидкість руху вагонів, яка може бути постійною (для вантажних ПКД кільцевого типу) або змінюватися впродовж одного циклу транспортування (усі ПКД маятникового типу та пасажирські ПКД кільцевого типу). Значення цієї величини обмежуються Правилами будови та безпечної експлуатації (ПУБЕ), які враховують певну кількість факторів, що можуть призвести до виникнення аварійно небезпечних ситуацій. Розширення та доповнення переліку таких впливів може висвітлити необхідність встановлення більш жорстких обмежень на проектні та експлуатаційні характеристики ПКД, що сприятиме підвищенню рівня безпеки даних транспортних засобів. Тому задачі формування підходів до встановлення обмежень проектних та експлуатаційних характеристик ПКД на основі врахування багатьох факторів є актуальними.

Аналіз публікацій

Основними нормативними документами, які встановлюють обмеження швидкості руху вагонів, є Правила [1, 2]. Ці обмеження накладаються з метою попередження взаємного ударення вагонів паралельних напрямків руху та їх ударення по металоконструкціям опор і станцій, причиною яких є вітрові навантаження. Також враховується рух вагонів по опорних башмаках, які мають певну кривизну робочої поверхні, що спричинює появу додаткових навантажень, які сприяють сходженню вагонів з опори з відповідним зміщенням несучого каната (для двоканатних ПКД будь-якого типу). Однак у жодному випадку нормативні документи не враховують динамічні впливи з боку приводу та канатної системи.

Моделюванню та аналізу динаміки приводу та канатної системи ПКД присвячено чимало робіт. У публікаціях [3–5] наведено результати досліджень динамічного стану окремих підсистем ПКД різних типів та отримано залежності для визначення навантаженості елементів канатної системи. Вплив руху вагонів на динаміку канатної системи ПКД розглянуто в роботах [6, 7]. Результати ґрунтовних досліджень, викладені в роботі [8], підтверджують необхідність врахування динамічних навантажень, які виникають в елементах ПКД; автор вказує на доцільність проведення додаткових досліджень ПКД як динамічної системи з метою виявлення резонансних явищ.

Методика дослідження ПКД як динамічної системи, викладена в роботі [9], є найбільш близькою до такої, що буде розглянуто далі. Однак її особливістю є представлення тягового каната як системи послідовно з'єднаних невагомих пружин постійної жорсткості, що зумовлює суттєві похибки під час моделювання ПКД значної довжини.

Мета роботи.

Метою даної роботи є обґрунтування необхідності врахування динаміки приводу та канатної системи під час встановлення нормативних значень швидкості руху вагонів підвісної канатної дороги.

Методика досліджень

Обмеження нормативних значень швидкості руху вагонів встановлюємо з урахуванням необхідності попередження та локалізації резонансних явищ. Для цього представляємо тяговий контур ПКД, як динамічну систему (рис. 1), яка складається з кількох зосереджених мас, з'єднаних між собою елементами з розподіленими параметрами. До зосереджених мас відносимо:

- приводний шків, до якого приведено моменти інерції всіх обертальних мас приводу;
- вагони;
- натяжний пристрій тягового каната, маса якого є еквівалентом його робочого зусилля.

Елементами з розподіленими параметрами вважаємо ділянки тягового каната, які з'єднують зосереджені маси.

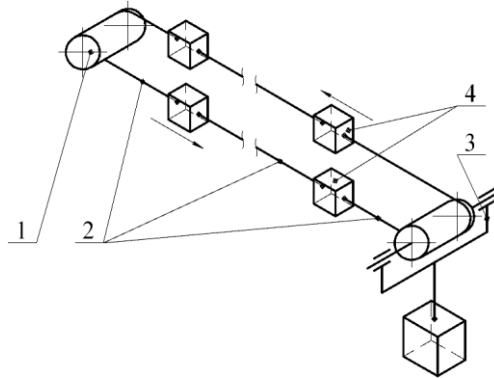


Рис. 1 – Тяговий контур ПКД:

1 – приводний шків; 2 – ділянки тягового каната; 3 – натяжний пристрій тягового каната; 4 – вагони

Для подальшого аналізу складаємо схему заміщення тягового контуру у замкненому та розрізаному виглядах (рис. 2).

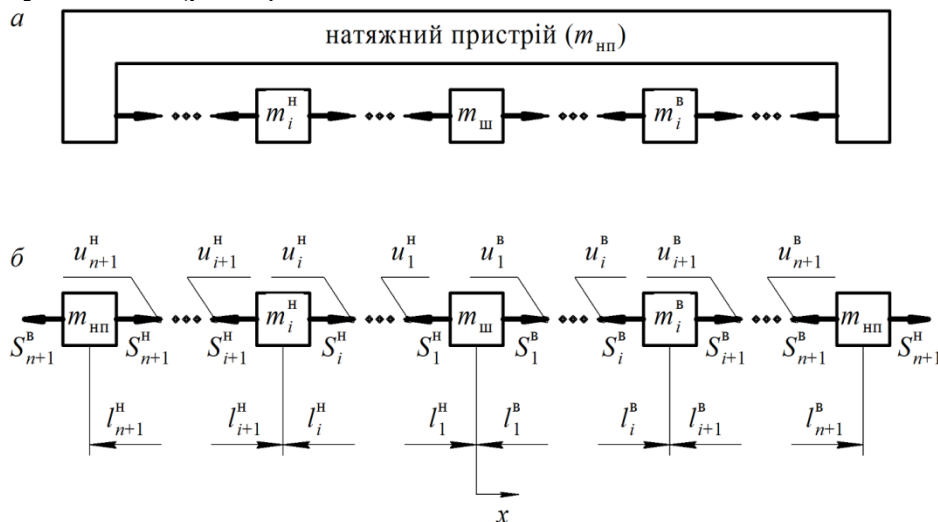


Рис. 2 – Схема заміщення тягового контуру ПКД:

а – в замкненому вигляді; б – в розрізаному вигляді.

На рис. 2 прийнято такі позначення:

$m_{ш}$, $m_{нп}$ – маса приводного шківів та натяжного пристрою відповідно;

m_i^B , m_i^H – маса i -ого вагона, який рухається від верхньої станції до нижньої («верхній напрямок руху»), та i -ого вагона, який рухається від нижньої станції до верхньої («нижній напрямок руху»); $i = \overline{1, n}$, де n – кількість вагонів на одному напрямку руху;

u_i^B, u_i^H – деформація i -ї ділянки тягового каната на верхньому та нижньому напрямках руху ($i = \overline{1, n+1}$);

S_i^B, S_i^H – пружні сили, зумовлені деформаціями u_i^B та u_i^H ($i = \overline{1, n+1}$).

Динаміка тягового контуру ПКД описується системою хвильових рівнянь у такому вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial t^2} U^H = a^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} U^H; \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} U^B = a^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} U^B, \end{cases} \quad (1)$$

де $U^H = \begin{bmatrix} u_i^H \end{bmatrix}$ – вектор деформацій ділянок тягового канату на нижньому напрямку руху;

$U^B = \begin{bmatrix} u_i^B \end{bmatrix}$ – вектор деформацій ділянок тягового канату на верхньому напрямку руху;

a – швидкість розповсюдження пружної хвилі у поздовжньому напрямку коливань.

Далі формулюються граничні умови до рівнянь системи (1), сукупне перетворення яких дозволяє визначити власні частоти тягового контуру ПКД [10]:

$$\omega = \frac{\lambda}{l} \sqrt{\frac{EF}{q}}, \quad (2)$$

де λ – власне число частотної функції;

l – довжина тягового каната на одному напрямку руху;

E, F, q – модуль пружності, площа перерізу та погонна маса тягового каната.

За відомими параметрами ПКД будують частотні діаграми, які відображають зміну власних частот тягового контуру під час руху вагонів. На основі аналізу таких діаграм встановлюємо обмеження частоти обертання приводного шківів та швидкості руху вагонів, які відповідають дорезонансному та міжрезонансним режимам роботи приводу. При цьому зазначені величини пов'язуємо залежністю

$$v = 0,5\omega D, \quad (3)$$

де v – швидкість руху вагонів;

ω – частота обертання шківів;

D – діаметр шківів.

Чисельний аналіз.

Особливості використання частотних діаграм з метою встановлення обмежень частоти обертання приводного шківів та швидкості руху вагонів приводу розглянемо на прикладах ПКД маятникового та кільцевого типів. Для спрощення процесу формування математичної моделі та подальших досліджень використовуємо систему комп'ютерної алгебри MathCAD, для якої нами було розроблено спеціальну програму, що здійснює формування математичної моделі, розрахунок власних чисел та власних частот в автоматичному режимі.

Розглянемо три варіанти сполучення вихідних даних:

- верхній та нижній вагони повністю завантажені ($m_1^B = m_1^H = m$);
- верхній вагон порожній, нижній завантажено повністю ($m_1^B = m_0$; $m_1^H = m$);
- верхній вагон завантажено повністю, нижній – порожній ($m_1^B = m$; $m_1^H = m_0$).

Приймаємо тяговий канат діаметром 21 мм за ГОСТ 2688-80 з наступними характеристиками: модуль пружності $E = 1,2 \cdot 10^5$ МПа [11]; погонна маса $q = 1,635$ кг/м; площа перерізу $F = 167,03$ мм².

Підвісна канатна дорога маятникового типу

Для ПКД маятникового типу приймаємо такі параметри:

- маса шківів $m_{ш} = 5\,000$ кг;
- маса натяжного пристрою $m_{нп} = 5\,650$ кг;
- довжина тягового канату на одному напрямку руху $l = 1\,340$ м;
- кількість вагонів на одному напрямку руху $n = 1$;
- маса завантаженого вагона $m = 5\,000$ кг;
- маса порожнього вагона $m_0 = 1\,800$ кг.

Для кожного з варіантів сполучення вихідних даних будуюмо частотні діаграми, вказуємо на них дорезонансну та міжрезонансні зони, а також обмеження швидкості руху вагонів (рис. 3, 4). Міжрезонансні зони додатково обмежені зверху частотою 7 с^{-1} , яка відповідає ліміту швидкості руху вагонів, встановленому Правилами [1] на рівні 10 м/с.

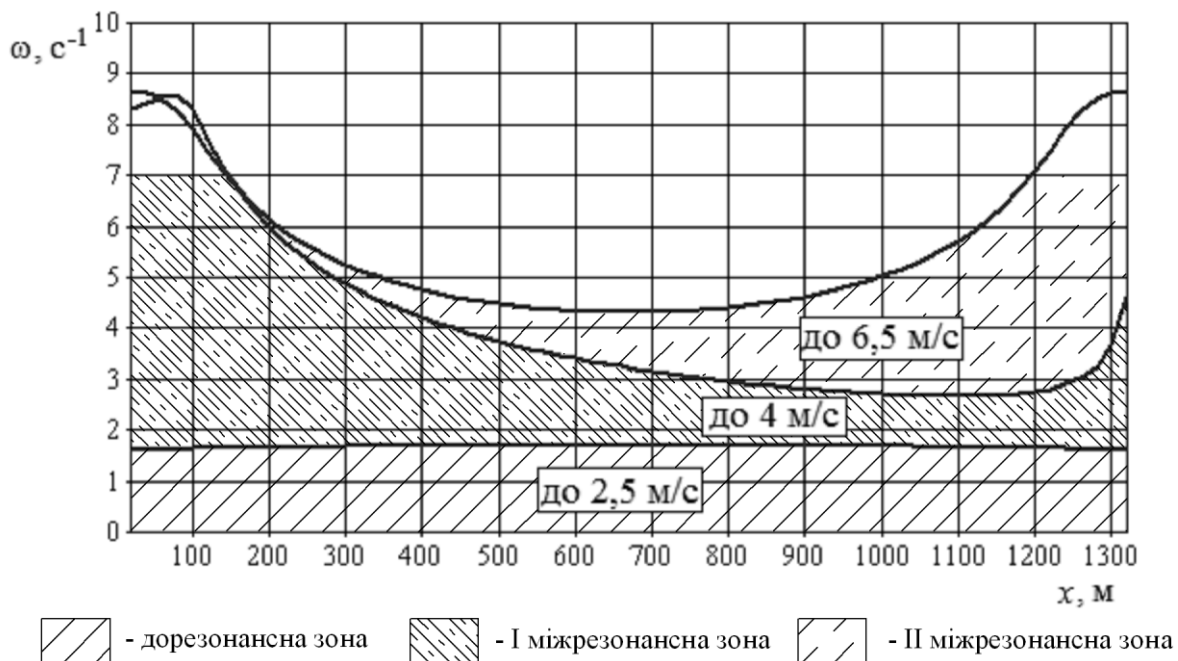


Рис. 3 – Частотна діаграма тягового контуру ПКД маятникового типу для випадку однакового завантаження вагонів

На діаграмі (рис. 3) відображено зміну перших трьох власних частот тягового контуру ПКД. Перша частота є невеликою та відносно стабільною. Однак під час розгону та сповільнення привід має долати резонансну зону за цією частотою. У разі роботи приводу в дорезонансній зоні рух вагонів можливий зі швидкістю до 2,5 м/с. За такої швидкості можливе здійснення технічного огляду або долаття зон перехідних режимів під час проходження вагонами опор, однак використання такого значення як номінальної швидкості є нерациональним через значне зниження продуктивності (пропускної здатності) дороги. Друга та третя частоти мають доволі широкий діапазон зміни. При цьому робота приводу у першій міжрезонансній зоні дозволяє вагонам рухатися зі швидкістю до 4 м/с під час наближення до нижньої станції в інтервалі переміщень від 1 000 до 1 300 м. У разі роботи приводу в даній міжрезонансній зоні на інтервалі переміщень від 0 до 1 000 м максимум швидкості може суттєво змінюватися в залежності від положення вагонів на трасі. Третя частота своїм мінімумом

обмежує швидкість руху вагонів до 6,5 м/с, що також не є граничним показником для маятникових ПКД.

Частотні діаграми для випадків неоднакового завантаження вагонів наведені на рис. 4.

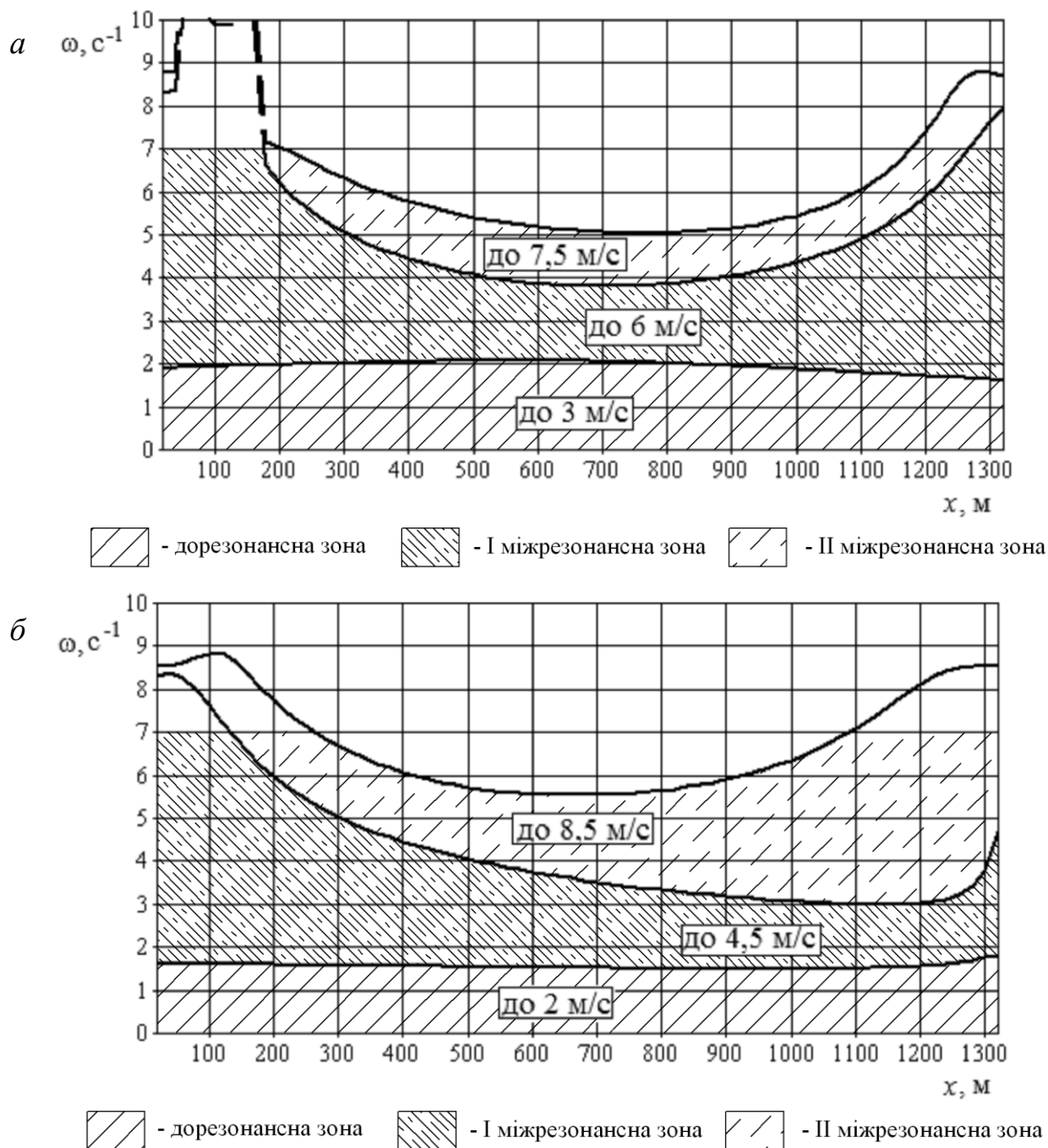


Рис. 4 – Частотні діаграми тягового контуру ПКД маятникового типу за умови неоднакового завантаження вагонів:

$$a - m_1^B = m_0; m_1^H = m; б - m_1^B = m; m_1^H = m_0.$$

У разі незавантаження верхніх вагонів (рис. 4, *a*) діаграма характеризується наявністю певної динаміки першої власної частоти тягового контуру, діапазон зміни другої частоти зменшується, при цьому мінімальні та максимальні значення кожної з частот збільшуються. За таких умов робота приводу в дорезонансній зоні дозволяє забезпечити рух вагонів зі швидкістю до 3 м/с, а мінімум другої частоти обмежує швидкість руху вагонів до 6 м/с під час

роботи приводу у першій міжрезонансній зоні. У даному випадку розгін та сповільнення вагонів біля станцій може здійснюватися за умови роботи приводу в першій міжрезонансній зоні, що дозволяє реалізовувати основний цикл руху з більшою швидкістю, інколи – навіть у другій міжрезонансній зоні, де обмеження швидкості складає 7,5 м/с.

У разі незавантаження нижніх вагонів (рис. 4, б) частотна діаграма схожа з діаграмою, властивою для варіанту повного завантаження вагонів обох напрямків руху. Перша частота відносно стабільна, діапазон зміни другої частоти доволі великий, динаміка третьої частоти – помірна. При цьому обмеження швидкості руху вагонів такі:

- за умови роботи приводу в дорезонансній зоні – до 2 м/с;
- за умови роботи приводу в першій міжрезонансній зоні – до 4,5 м/с на ділянці переміщень від 1 000 до 1 300 м;
- за умови роботи приводу в другій міжрезонансній зоні – до 8,5 м/с, що є непоганим показником для ПКД маятникового типу.

Підвісна канатна дорога кільцевого типу

Як приклад ПКД кільцевого типу розглянемо дорогу з такими параметрами:

- маса шківів $m_{ш} = 5\,000$ кг;
- маса натяжного пристрою $m_{нп} = 5\,650$ кг;
- довжина тягового канату на одному напрямку руху $l = 1\,320$ м;
- кількість вагонів на одному напрямку руху $n = 4$;
- маса завантаженого вагона $m = 1\,250$ кг;
- маса порожнього вагона $m_0 = 450$ кг.

На рис. 5 зображено частотну діаграму для випадку однакового завантаження вагонів.

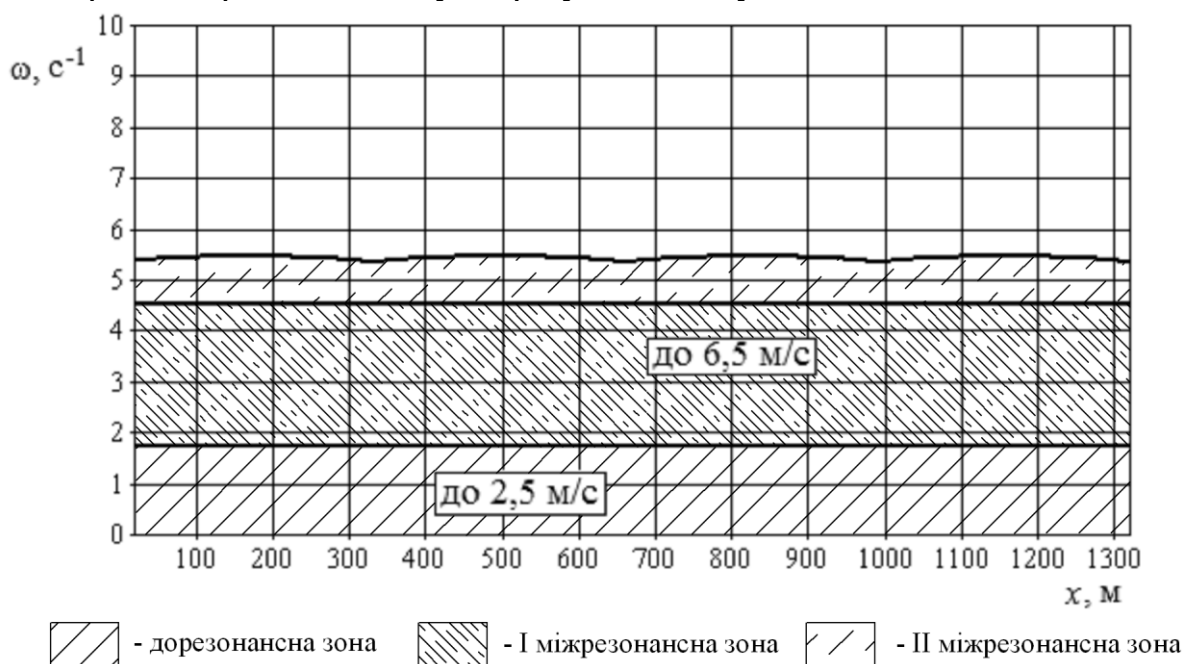


Рис. 5 – Частотна діаграма тягового контуру ПКД кільцевого типу для випадку однакового завантаження вагонів

Як видно на діаграмі (рис. 5), у разі повного завантаження всіх вагонів перша та друга власні частоти є постійними, третя має незначну динаміку, до того ж кількість циклів зміни частоти дорівнює кількості вагонів на одному напрямку руху. Під час роботи приводу в дорезонансній зоні вагони можливе переміщення вагонів зі швидкістю до 2,5 м/с. Робота приводу в першій міжрезонансній зоні дозволить здійснювати рух вагонів зі швидкістю до 6,5 м/с. Оскільки Правилами [1] встановлюється обмеження швидкості до 7 м/с під час

руху вагонів у прогоні та до 6 м/с в період проходження вагонами опор, роботу приводу в другій міжрезонансній зоні можна вважати недоцільною.

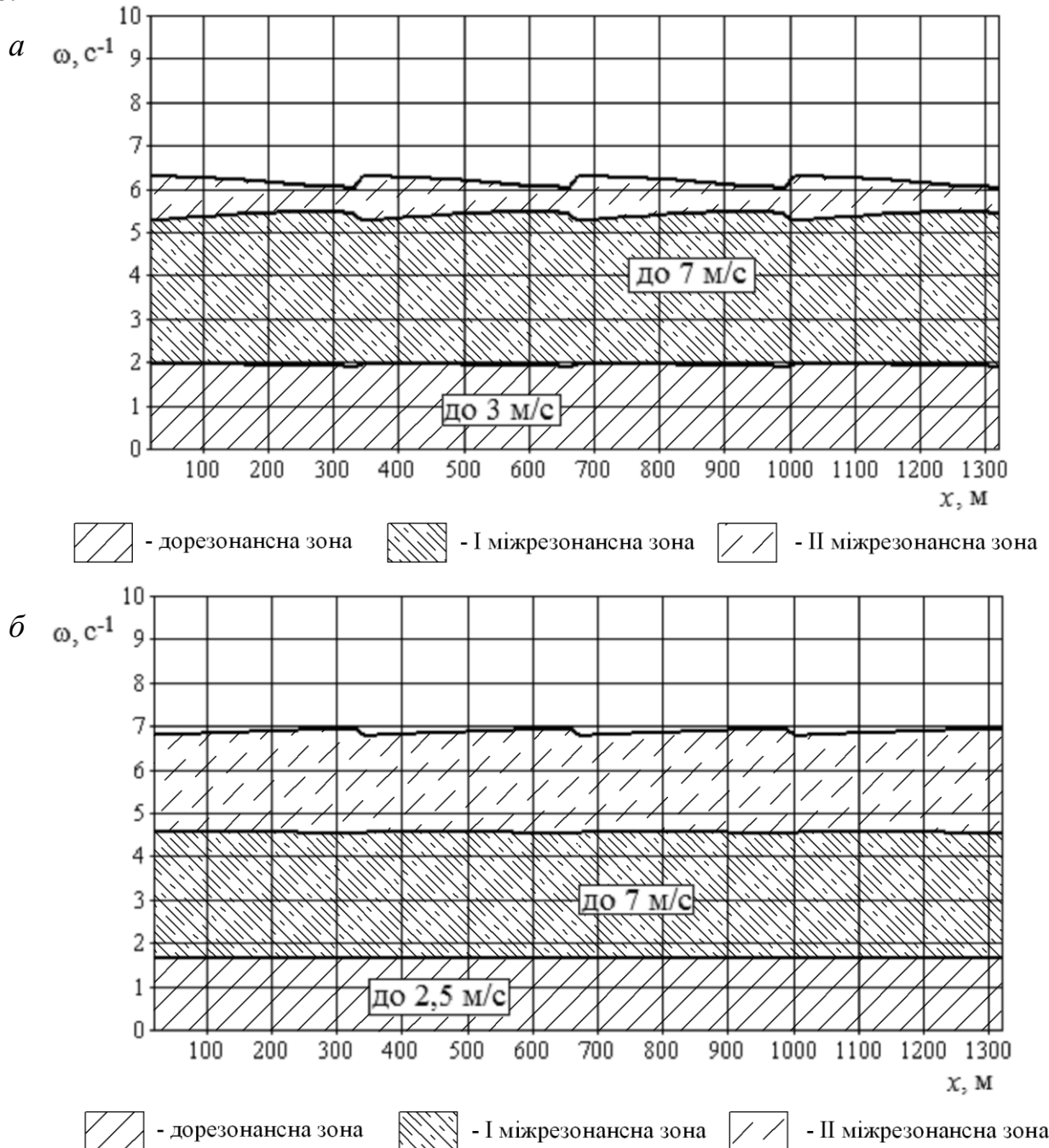


Рис. 6 – Частотні діаграми тягового контуру ПКД кільцевого типу за умови неоднакового завантаження вагонів:

$$a - m_1^B = m_0; m_1^H = m; \quad б - m_1^B = m; m_1^H = m_0.$$

У разі незавантаження верхніх вагонів (рис. 6, а) спостерігається певна динаміка другої та третьої частот, до того ж кількість циклів відповідає кількості вагонів на одному напрямку руху. Обмеження швидкості руху вагонів в залежності від роботи приводу в одній з резонансних зон наступні:

- за умови роботи приводу в дорезонансній зоні – до 3 м/с;
- за умови роботи приводу в першій міжрезонансній зоні – до 7 м/с з урахуванням вимог Правил [1].

Робота приводу у другій міжрезонансній зоні є недопустимою через обмеження швидкості руху вагонів, що накладаються Правилами [1].

У разі незавантаження нижніх вагонів (рис. 6, б) перша власна частота тягового контуру ПКД є постійною, динаміка другої та третьої частот – незначна зі збереженням відміченої вище періодичності. Обмеження швидкості руху вагонів в залежності від роботи приводу в одній з резонансних зон наступні:

- за умови роботи приводу в дорезонансній зоні – до 2,5 м/с;
- за умови роботи приводу в першій міжрезонансній зоні – до 7 м/с з урахуванням вимог Правил [1].

Робота приводу у другій міжрезонансній зоні є недопустимою через обмеження швидкості руху вагонів, що накладаються Правилами [1].

Узагальнені результати щодо вибору раціональних швидкісних режимів наведено в табл. 1. Як бачимо, врахування динаміки тягового контуру ПКД накладає додаткові обмеження щодо швидкості руху вагонів у порівнянні з вказаними у Правилах [1]. Так, для маятникової ПКД номінальну швидкість необхідно зменшити до 8,5 м/с під час руху вагонів у прогонах та до 6,5 м/с в період проходження вагонами опор. Для кільцевої ПКД рекомендовано зменшення номінальної швидкості до 6,5 м/с під час руху вагонів у прогонах. Рекомендована ревізійна швидкість не суперечить вимогам Правил [1].

Таблиця 1

Обмеження швидкості руху вагонів та частоти обертання приводного шківів

Швидкісний режим	Маятникова ПКД			Кільцева ПКД		
	Значення швидкості, м/с		Зона частот	Значення швидкості, м/с		Зона частот
	Правила	Рекомендації		Правила	Рекомендації	
Р-С	–	–	0, I	–	–	0, I
У-ном	12 (10)	8,5 (6,5)	II	7 (6)	6,5 (6)	I
У-рев	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0

У табл. 1 використано позначення

- швидкісних режимів: Р-С – розгін або сповільнення; У-ном – усталений рух з номінальною швидкістю; У-рев – усталений рух з ревізійною швидкістю;
- зон частот: 0 – дорезонансна; I – перша міжрезонансна; II – друга міжрезонансна.

Значення швидкості, вказані в дужках, відповідають швидкості проходження вагонами опор.

Слід відзначити, що рекомендовані значення швидкості руху вагонів значною мірою залежать від діаметра приводного шківів, тому обмеження, які враховують динаміку приводу, слід встановлювати щодо частот обертання приводного шківів з урахуванням відповідних зон власних частот тягового контуру ПКД.

ВИСНОВКИ

1. На етапі розробки експлуатаційної документації для підвісної канатної дороги необхідно складати частотні діаграми тягового контуру з метою обмеження частоти обертання приводного шківів та швидкості руху вагонів.
2. Режим усталеного руху вагонів з номінальною швидкістю слід забезпечувати за рахунок роботи приводу в першій міжрезонансній зоні частот з максимально можливим наближенням до її верхньої межі.
3. Перехідні режими руху слід реалізовувати за рахунок роботи приводу в дорезонансній та (або) першій міжрезонансній зонах частот.

4. Для підвісних канатних доріг маятникового типу допустимим є усталений рух вагонів з номінальною швидкістю, яка відповідає роботі приводу в другій міжрезонансній зоні частот.
5. Для підвісних канатних доріг кільцевого типу рух вагонів зі швидкістю, яка відповідає роботі приводу у другій міжрезонансній зоні частот, не рекомендовано.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Правила будови та безпечної експлуатації пасажирських підвісних канатних доріг* / Затв. Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України № 49 від 22.01.2014 р.
2. *Правила устройства и безопасной эксплуатации грузовых подвесных канатных дорог* / Утв. Госгортехнадзором СССР, 22.12.1987 г.
3. Adamovsky, M. G. Design calculations of main components and parametric substantiation of cable yarding systems used in groupselection felling operations / M. G. Adamovsky, M. P. Martyntsyv, O. V. Boratynsky // *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість : міжвідомчий науково-технічний збірник*. – Львів: НЛТУ України. – 2011. – №37.2. – С. 6–13.
4. Сологуб, Б. В. Розрахунок основних параметрів спареної крісельної дороги з перевантажувальним пристроєм / Б. В. Сологуб, Я. Я. Данило // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Динаміка, міцність та проектування машин і приладів*. – 2014. – № 788. – С. 48–55.
5. Сологуб, Б. В. Комп'ютерне проектування та моделювання пасажирських доріг з тягово-несним канатом / Б. В. Сологуб, Я. Я. Данило // *Електронний ресурс. Режим доступу: http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/12244/1/025_Kompjuterne%20proektuvannja_108_112_713.pdf*.
6. Knawa, M. Effects of dynamic loads acting on carrying cable in operating ropeway / M. Knawa, D. Bryja // *Proc. in Applied Mathematics and Mechanics*. – 2008. – Vol. 8. – Iss. 1. – P. 10297–10298.
7. Matsuhisa, H. Vibration control of a ropeway carrier by passive dynamic vibration absorbers / H. Matsuhisa, R. Gu, Y. Wang, O. Nishihara, S. Sato // *JSME International Journal. Series C*. – 1995. – Vol. 38. – No. 4. – P. 657–662.
8. Сологуб, Б. В. Моделювання та аналіз роботи пасажирських канатних доріг із замкнутим канатом / Б. В. Сологуб // *Машинознавство*. – 2011. – № 1–2. – С. 44–47.
9. Simonović, S. Effects of bicable reversible ropeway ending deceleration on dynamical strain of the haulage rope / S. Simonović // *Tehnička dijagnostika*. – 2009. – No. 3. – P. 37–44.
10. Ракиа, С. В. Застосування частотних діаграм для вивчення динаміки приводів підвісних канатних доріг / С. В. Ракиа, Ю. К. Горячев, О. С. Куроп'ятник // *Подъемно-транспортная техника*. – 2014. – №3 (43). – С. 38–53.
11. Дукельский, А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны / А. И. Дукельский. – М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 484 с.