

8. **Хмара Л. А.** Призначення режимів роботи шнекового інтенсифікатора / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения. – Д. : ПГАСА, 2003. – С. 230 – 231.

9. **Хмара Л. А.** Методика визначення потрібної потужності приводу шнекового інтенсифікатора / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Сб. науч. тр.: Вестник ХНАДУ. – Вып. 27. – Харьков, 2004. – С. 77 – 81.

10. **Хмара Л. А.** Визначення критичної частоти обертання та висоти зависання ґрунту для шнекового інтенсифікатора на робочому обладнанні бульдозера при пошаровій розробці ґрунту / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – Вып. 26. – Д. : ПГАСА, 2004. – С. 57 – 66.

11. **Хмара Л. А.** Теоретическое исследование режимов работы шнекового интенсификатора / Л. А. Хмара, Р. Н. Кроль // Интерстроймех – 2005 : Тр. междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. – Тюмень, 2005. – С. 262 – 266.

12. **Хмара Л. А.** Визначення геометричних залежностей шнекового інтенсифікатора на робочому обладнанні бульдозера / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – № 12. – Д. : ПДАБА, 2005. – С. 37 – 45.

13. **Хмара Л. А.** Бульдозер з шнековим інтенсифікатором – як універсальна машина для засипки траншей / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – Вып. 33. – Д. : ПГАСА, 2005. – С. 56 – 75.

14. **Хмара Л. А.** Теоретичне дослідження закономірності руху частки ґрунту по гвинтовій поверхні шнекового інтенсифікатора / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Зб. наук. пр. : Вісник НУВГП. – Вип. 2 (34), Ч. 2. – Рівне, 2006. – С. 175 – 181.

15. **Хмара Л. А.** Теоретичні основи розрахунку бульдозера зі шнековим інтенсифікатором / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Сб. науч. тр.: Вестник ХНАДУ. – Вып. 38. – Харьков, 2007. – С. 53 – 56.

16. **Хмара Л. А.** Экспериментальное и теоретическое исследование бульдозера с винтошнековым интенсификатором / Л. А. Хмара, Р. Н. Кроль // Всеукр. зб. наук. пр.: Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Вип. 71. – К. : КНУБА, 2008. – С. 80 – 86.

17. **Кроль Р. М.** Визначення значення абсолютної швидкості частки ґрунту, що транспортується шнековим інтенсифікатором / Р. М. Кроль // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – Вып. 51. – Д. : ПГАСА, 2009. – С. 74 – 80.

18. **Хмара Л. А.** Отвал бульдозера с винтошнековым интенсификатором / Л. А. Хмара, Р. Н. Кроль // Журнал «Строительные и дорожные машины». – 2009. – № 9. – С. 30 – 33.

19. **Хмара Л. А.** Повышение эффективности бульдозерного оборудования путем снабжения отвала винтошнековым интенсификатором / Л. А. Хмара, Р. Н. Кроль // Вісник придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – № 7. – Д. : ПДАБА, 2010. – С. 64 – 73.

УДК 624.042

РАЦІОНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ОДНОМАСОВИХ ДИНАМІЧНИХ ГАСНИКІВ КОЛИВАНЬ З ТЕРТЯМ, ПРИНЦИПИ НАЛАШТУВАННЯ

Д. С. Ярошенко, асп.

Ключові слова: динамічний гасник коливань, амплітудно-частотна характеристика, демпфер, інваріантні точки

Постановка проблеми. Причини виникнення коливань будівельних конструкцій, будинків та споруд можуть бути дуже різноманітними: вітрові та сейсмічні впливи (в т. ч. промислова сейсміка), робота технологічного обладнання і т. п. Тенденції до збільшення висот, прольотів об'єктів сучасного будівництва, міцності застосовуваних матеріалів також сприяють підвищенню їх чутливості до різноманітних динамічних впливів. Усі ці фактори збільшують значимість динамічних навантажень у роботі будівель та споруд і, як наслідок, викликають необхідність боротьби із шкідливими вібраціями. Слід зазначити, що такий стан справ, підвищення стандартів безпеки і вимог до комфорту людей, викликав появу нового напрямку в

динаміці споруд – **віброекології**. Мабуть, перша робота в цьому напрямі була написана В. В. Кулябком та М. І. Казакевичем [9].

Найбільш поширеними методами боротьби з надмірними коливаннями в будівництві є такі: застосування систем віброізоляції, спеціальних демпфірувальних пристроїв, динамічних гасників коливань.

Уперше застосовувати динамічні гасники коливань (ДГК) для заспокоєння качання човна запропонував Фрамм ще в 1909 році. Зараз застосування різноманітних типів ДГК в будівництві має багато прикладів. Ось деякі найвідоміші споруди, обладнані подібними пристроями: Тайбей 101, телебашта «Коктобе» (Алма-Ата), Ризька телебашта (обладнана декількома ДГК із в'язкими демпферами) [11], сумно відомий міст в м. Волгоград.

Аналіз публікацій. Література, присвячена питанням застосування різноманітних ДГК для гасіння коливань, досить численна [3; 4; 7; 10], адже ДГК широко використовуються не тільки в будівництві, а і в машинобудуванні, де історично проблеми динаміки виникли і почали вирішуватись раніше. Теорією і практикою застосування ДГК в будівництві займались Б. Г. Коренев і Л. М. Резніков [5; 11; 12], праці М. І. Казакевича, А. Л. Закори та ін. головним чином присвячені гасінню коливань прогонових конструкцій мостів, вант [2; 8]. У 1988 році ЦНДІБК видав рекомендації [15] з віброзахисту промислових споруд. Дослідженням ударних гасників коливань присвячені роботи А. В. Дукарта ([6]).

Майже у всіх перерахованих роботах дослідники моделювали об'єкт захисту як одномасову систему без урахування сил внутрішнього тертя. Нелінійні системи досліджувались лінеаризацією характеристик.

Мета статті. Проаналізувати динамічні взаємодії системи «об'єкт гасіння – ДГК з тертям» при елементах тертя в ДГК із в'язким і сухим тертям, розглянути принципи підбору параметрів одномасових динамічних гасників коливань з тертям.

Динамічні моделі розглядуваних будівельних конструкцій будуть створюватися за методикою (метод прямих), описаною в [13]. Системи диференціальних рівнянь руху будуть обчислюватися у ПК Mathcad.

Виклад основного матеріалу. За об'єкт дослідження приймемо однопрогонову шарнірно оперту балкову мостову конструкцію, оскільки такі конструкції мають досить розріджений спектр власних частот коливань. Певний аналіз характеру поведінки власних частот і форм конструкцій даного виду розглянуто в [14]. Актуальність вибору саме такого об'єкта досліджень також підтверджується активним використанням демпфірувальних пристроїв у мостових конструкціях різноманітних конструктивних схем і деякими найвідомішими аваріями: Такомська катастрофа (1940 р.), аварійні коливання Волгоградського мосту (2010 р.).

У праці [16] розглянуто запропонований авторами новий підхід для визначення аеропружних коливань із застосуванням програми ANSYS на прикладі Волгоградського мосту. Тому вихідними даними для побудови математичної моделі об'єкта досліджень будуть матеріали статті [16] як за геометричними, пружними, інерційними параметрами моделі споруди, так і за параметрами динамічного навантаження, що діє на об'єкт. Декремент вільних коливань визначається з умови рівності резонансних амплітуд коливань даної моделі мосту даним натурних замірів під час його аварійних коливань.

Підбір параметрів ДГК для гасіння вимушених коливань. У [10] зазначається, що при виборі раціональних параметрів гасників можуть прийматися критерії:

- критерій рівності резонансних піків, котрі одночасно мають мінімальні значення;
- найближчі частоти системи з гасниками повинні бути максимально відсутні від резонансної частоти (частот) системи без гасників.

Відомі аналітичні рішення для системи з одним ступенем вільності і приєднаним ДГК із в'язким тертям [1; 4], при цьому внутрішнє тертя в основній системі не враховувалось.

ДГК з демпфером в'язкого тертя. Задавшись масою ДГК, рівною 2,5 % маси всієї конструкції, вираховуємо значення жорсткості пружного елемента ДГК ($k_{дгк}$) і елемента в'язкого тертя ($\beta_{дгк}$), користуючись рекомендаціями довідника [1].

Система диференціальних та алгебраїчних рівнянь, що описують рух фрагмента динамічної моделі (рис. 1, б), матиме такий вигляд [13]:

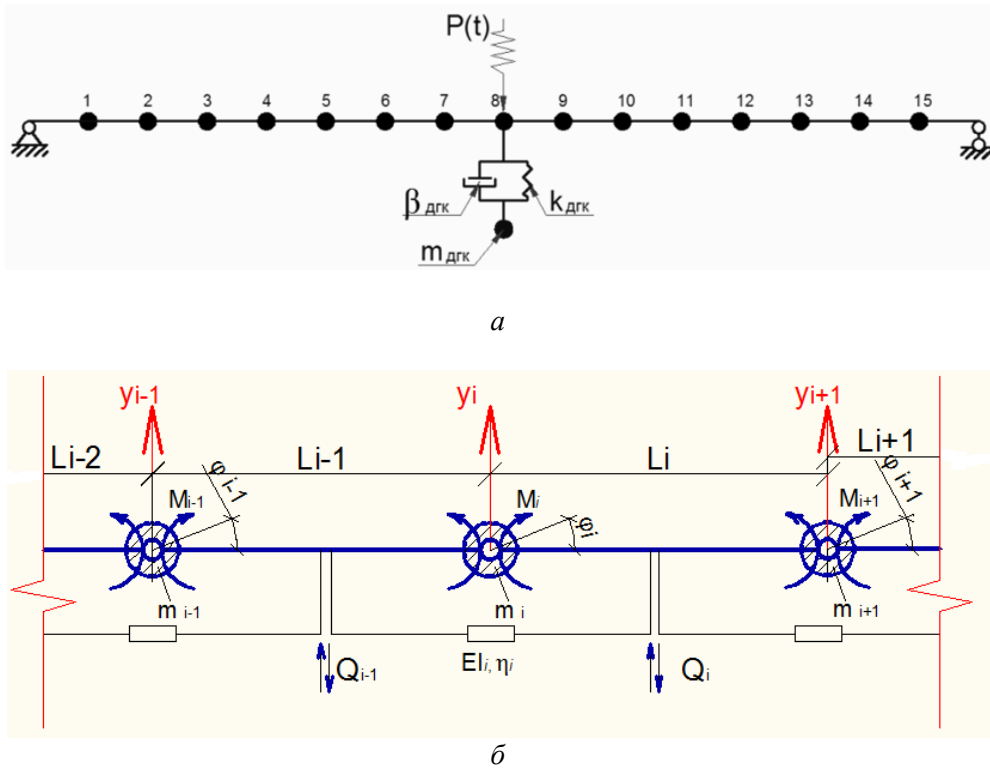


Рис. 1. Розрахункова схема дискретної балки з одним ДГК (а) та фрагмент її динамічної моделі (б)

$$\left\{ \begin{array}{l} y_i'' = \frac{1}{m_i}(Q_i - Q_{i-1}) - g, \\ Q_i = \frac{M_{i+1} - M_i}{L_i}, \\ Q_{i-1} = \frac{M_i - M_{i-1}}{L_{i-1}}, \\ M_i = \frac{-2E_i I_i}{L_{i-1} + L_i} [(\varphi_i - \varphi_{i-1}) + \eta_i (\varphi_i' - \varphi_{i-1}')], \\ M_{i-1} = \frac{-2E_{i-1} I_{i-1}}{L_{i-2} + L_{i-1}} [(\varphi_{i-1} - \varphi_{i-2}) + \eta_{i-1} (\varphi_{i-1}' - \varphi_{i-2}')], \\ M_{i+1} = \frac{-2E_{i+1} I_{i+1}}{L_i + L_{i+1}} [(\varphi_{i+1} - \varphi_i) + \eta_{i+1} (\varphi_{i+1}' - \varphi_i')], \\ \varphi_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{L_i}, \varphi_i' = \frac{y_{i+1}' - y_i'}{L_i}. \end{array} \right. \quad (1)$$

У системі (1) прийняті такі позначення: y_i, y_i', y_i'' – переміщення, швидкості та прискорення i -ї маси, M_i, Q_i та EI_i – внутрішній згинальний момент, поперечна сила та згина жорсткостів i -му перерізі балки, L_i – довжина ділянки, φ_i, φ_i' – кут повороту та його перша похідна за часом, g – прискорення вільного падіння.

Щоб виявити основні закономірності поведінки системи, зображеної на рисунку 1, і порівняти їх з аналітичним рішенням (рис. 2), моделювалось прикладення до неї гармонійної примусової сили з повільно зростаючою частотою збурення (0,0001 Гц/с). Також на даному етапі в багатомасовій динамічній моделі не враховувались сили непружного опору. Реакції системи з різними величинами параметрів ДГК (маса – стала) наведено на рисунку 3 у вигляді відношення динамічних переміщень точки 8 і переміщень від статично прикладеної сили (дорівнює амплітуді сили гармонічного навантаження) – μ , від частоти дії динамічного навантаження.

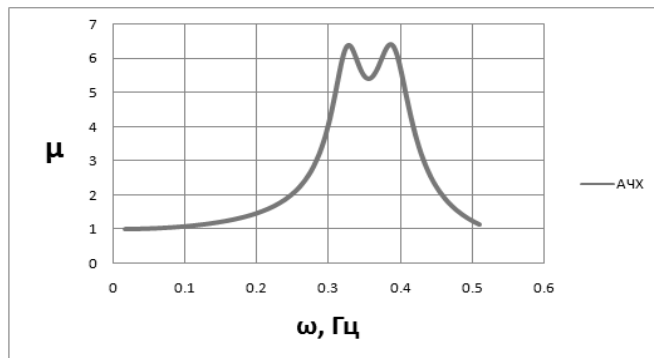


Рис. 2. АЧХ двомасової системи з раціональними параметрами ДГК (за рекомендаціями [1])

Графіки на рисунках 2 і 3 а відрізняються тим, що на рисунку 2 піки графіка рівні, на рисунку 3 а – ні, при рівних резонансних частотах. Із цього можна зробити висновок, що аналітичні рішення, котрі справедливі для систем з одним ступенем вільності, проблематично застосовувати для систем з багатьма ступенями вільності.

У подальшому, змінюючи величину в'язкого тертя в демпфері ДГК, але не змінюючи значення жорсткості пружного елемента, знайшли таке його значення, при якому піки резонансних амплітуд приблизно рівні (що і було критерієм налаштування ДГК). У даному випадку його значення виявилось на 40 % меншим за вираховане згідно з довідником [1] (рис. 3 б). Діючи навпаки, тобто залишаючи незмінною величину в'язкого тертя в демпфері ДГК, але змінюючи величину жорсткості пружного елемента, знайдемо, що резонансні піки будуть рівними при на 1,5 % меншому значенні жорсткості від вирахованої аналітично (рис. 3 в).

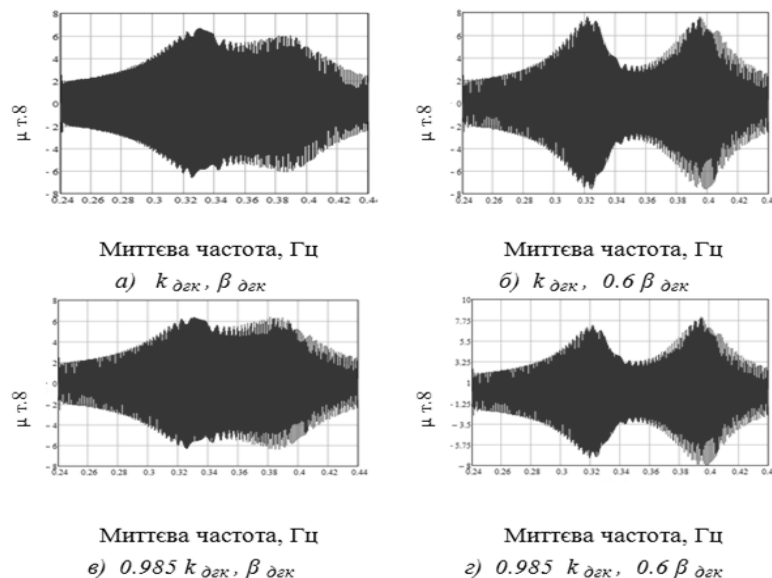


Рис. 3. Реакції системи з різними величинами жорсткості пружного і в'язкості демпфівального елементів ДГК

Після ряду чисельних експериментів були виявлені такі закономірності поведінки системи при різних її параметрах:

- при зменшенні значення сили в'язкого тертя в демпфері ДГК резонансні піки «відсуваються» один від одного на частотній осі, їх значення збільшуються (причому другий пік – швидше, поступово «наздоганяючи» перший). Зона антирезонансу стає більш вираженою;
- при збільшенні значення сили в'язкого тертя в демпфері ДГК резонансні піки поступово «зливаються» в один, ДГК і основна система починають коливатися в одній фазі, власні частоти зменшуються (ДГК стає просто додатковою масою);
- при зменшенні жорсткості пружного елемента ДГК величина першого піку зменшується, другого – збільшується, змінюються власні частоти системи.

Усі попередні висновки стосувалися систем, у яких не враховувалось внутрішнє тертя. Якщо враховувати в розрахунках сили непружного опору, результати будуть іншими. Резонансні піки не тільки стануть меншими, але і в випадках, зображених на рисунку 3 (б, в) перший резонансний пік стане більшим за другий. Зони антирезонансу стають менш виразними. Так, щоб виконувалась умова рівності резонансних піків, значення жорсткості пружного елемента ДГК в даній системі буде меншим приблизно на 10 % від вирахованого згідно з рекомендаціями [1].

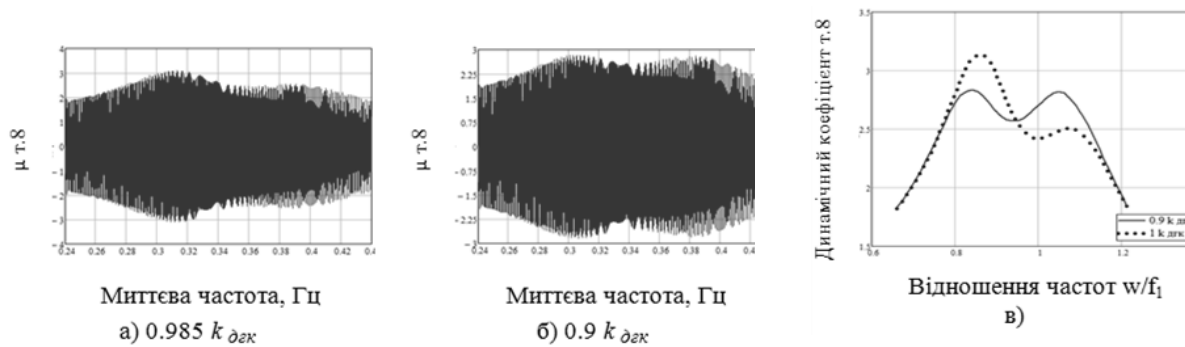


Рис.4. Реакції системи при різних налаштуваннях ДГК (а, б) та її АЧХ (в)

На рисунку 4 (а, б) зображені реакції точки 8 (яка має найбільші динамічні переміщення), на рисунку 4 (в) зображені фрагменти АЧХ багатомасової системи при різних значеннях жорсткості пружного елемента ДГК за умови врахування сил непружного опору основної системи; w/f_1 – відношення частоти примусової сили до частоти першого тону коливань основної системи.

Задля виявлення наявності так званих інваріантних точок у багатомасовій системі було побудовано фрагменти АЧХ для точки 8 (рис. 5, а) для одного налаштування ДГК, але при різних значеннях величини в'язкого тертя в ДГК (відношення декрементів коливань ДГК як окремого осцилятора і основної системи). Бачимо, що всі графіки проходять через 2 точки (інваріантні). Дана особливість, що була виявлена давно для систем із двома степенями вільності [1; 4], проявилась і в системі з багатьма степенями вільності. Однак у даній системі власні частоти знаходяться на великій відстані одна від одної на частотному спектрі і вплив вищих форм на поведінку системи біля першої частоти може бути несуттєвим.

ДГК з демпфером сухого тертя. Величина сили сухого тертя в ДГК ($H_{ДГК}$) буде порівнюватися з максимальною величиною сили тертя в демпфері ДГК із в'язким тертям ($\max F_{Тр}/H$), що розвивається під дією динамічного гармонічного навантаження в розглядуваному діапазоні частот (табл. 1). Величина сили тертя в демпфері ДГК із в'язким тертям визначалася як добуток швидкості руху кінців демпфера ДГК (один відносно іншого) і коефіцієнта в'язкості демпфера $\beta_{ДГК}$ (коефіцієнта опору). Внутрішнє тертя в основній системі враховувалось (коефіцієнти η_i у системі (1)).

Отже, і у випадку сухого тертя в демпфері ДГК простежується наявність інваріантних точок, якщо демпфер не викликає запирання гасника. Також такі точки були віднайдені для випадків різного налаштування ДГК послідовно з демпфером в'язкого і сухого тертя. При цьому змінювалась жорсткість пружного елемента ($0.8*0.9*k_{ДГК}$, $1*0.9*k_{ДГК}$, $1.2*0.9*k_{ДГК}$).

Таблиця 1

Співвідношення максимальної величини сили тертя в демпфері ДГК із в'язким тертям із силою тертя в демпфері ДГК із сухим тертям

$\beta_{ДГК} = 1,2*10^4$ Нс/м $\max F_{Тр} = 7\ 840$ Н (на частоті антирезонансу основної системи).	$H_{ДГК} =$
	2 240 Н ($\max F_{Тр}/H = 3,5$),
	2 613 Н ($\max F_{Тр}/H = 3$),
	3 136 Н ($\max F_{Тр}/H = 2,5$),
	3 800 Н ($\max F_{Тр}/H = 2$),
	5 227 Н ($\max F_{Тр}/H = 1,5$).

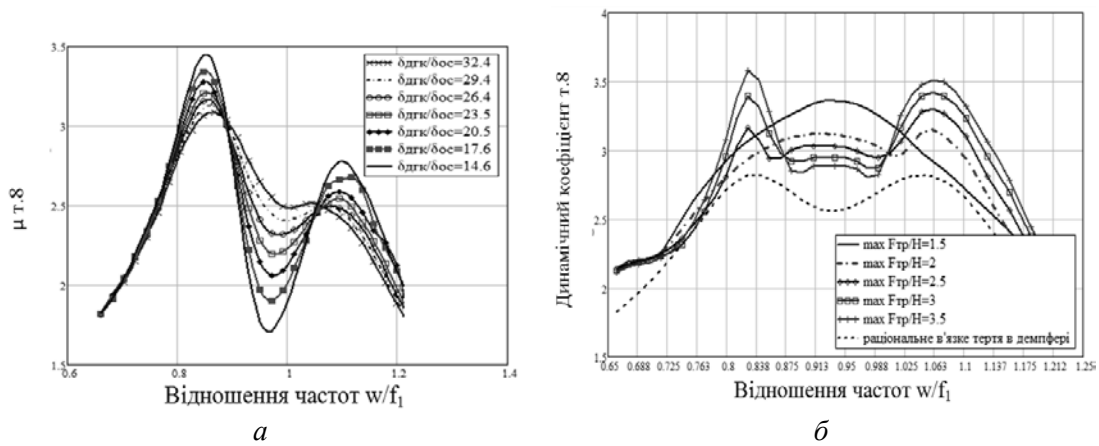


Рис. 5. Фрагмент АЧХ т. 8 системи при різних значеннях величини в'язкого тертя (а) і сухого тертя (б) в ДГК

Пара паралельних ДГК, розташованих симетрично відносно точки прикладення зосередженого гармонічного навантаження. В роботі [11] розглянуто ефективність групи паралельних ДГК без демпфірувальних елементів, що приєднується до одномасової основної системи. Також наведено результати числової оптимізації параметрів двох паралельних ДГК, що теж приєднані до основної системи з одним ступенем вільності. Відмінністю наведених нижче результатів досліджень є те, що досліджується не вплив налаштування гасників, а їх розташування на реакцію багатомасової системи з внутрішнім тертям. Пара ДГК приймалась із половинними величинами характеристик одномасового з раціональними параметрами. На рисунку 6 б в підписах графіків цифрами позначено точки приєднання ДГК до дискретної моделі балки. Графік «дгк 1» – АЧХ системи з одномасовим гасником із раціональною величиною в'язкого тертя в демпфері (рис. 5 б).

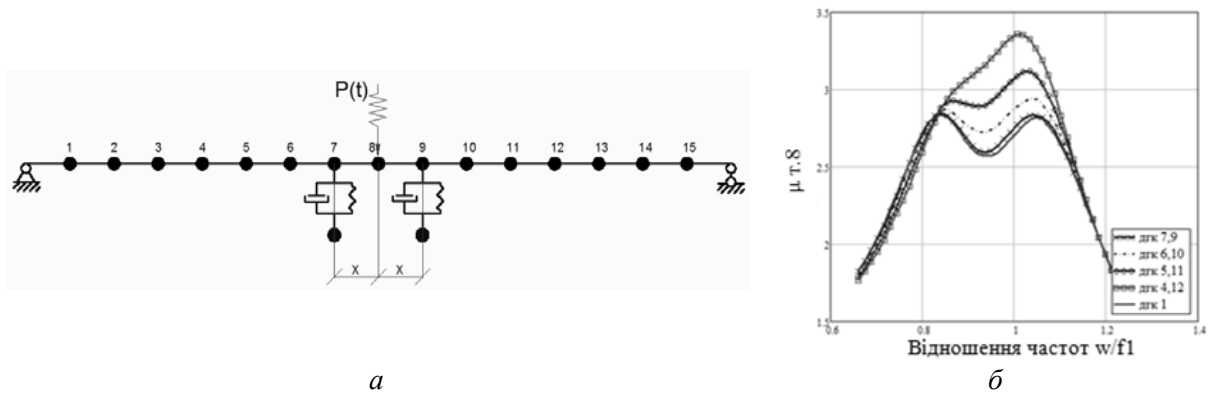


Рис. 6. Дискретна розрахункова схема балки з двома ДГК і зосередженим гармонічним навантаженням посеред її прольоту (а) та фрагмент АЧХ т. 8 системи при різних розташуваннях ДГК

Як бачимо з рисунка 6 б, за дії зосередженого гармонічного навантаження одномасовий ДГК, розташований в місці її прикладення, є найбільш ефективним із розглянутих тут способів гасіння коливань. Пара ДГК виявилась тим менш ефективною, чим далі розташовані ДГК від місця дії гармонічного навантаження.

Висновки. - рекомендації по підбору параметрів ДГК з тертям в'язкого тертя, що спираються на аналітичні дослідження двомасової недемпфірувальної системи, можуть застосовуватись як параметри в першому наближенні при аналізі багатомасових системі з врахуванням внутрішнього тертя;

- у випадку ДГК, оснащеного демпферами в'язкого і сухого тертя, виявляються так звані інваріантні точки (якщо сила сухого тертя не спричинює запирання гасника);
- в даній системі найефективнішими виявився ДГК з демпфером в'язкого тертя

(див. рис. 6);

- раціональне налаштування (інваріантні точки знаходяться на одному рівні) для ДГК з демпферами сухого і в'язкого тертя збігається (але ординати точок різні);

- для подібних систем можна застосовувати послідовність визначення раціональних параметрів $k_{дгк}$ і $\beta_{дгк}$, запропоновану, наприклад, у [10]: спочатку визначити $k_{дгк}$, виходячи з умови рівності ординат інваріантних точок системи з ДГК, потім визначити раціональну величину дисипації в елементі тертя (в'язкого чи сухого).

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Биргер И. А.** Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3 т. Т. 3 // Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – М. : Машиностроение, 1968. – 567 с.
2. **Бондарь Н. Г.** Гашение колебаний пролетных строений мостов / Н. Г. Бондарь, А. Л. Загора, М. И. Казакевич // Надежность и долговечность машины сооружений. Вып. 6. – К. : Наукова думка, 1984. – С.103 – 109.
3. Вибрации в технике : справочник. В 6 т. / Т. 6. Защита от вибрации и ударов. – М. : Машиностроение, 1981. – 456 с.
4. **Ден-Гартог Дж. П.** Механические колебания. – М. : Физматгиз, 1960. – 580 с.
5. Динамический расчет зданий и сооружений. (Справочник проектировщика). – М. : Стройиздат, 1984. – 303 с.
6. **Дукарт А. В.** Задачи теории ударных гасителей колебаний. – М. : АСВ, 2006. – 208 с.
7. **Елисеев С. В.** Динамические гасители колебаний / С. В. Елисеев, Г. П. Нерубенко. – Новосибирск: Наука, 1982. – 144 с.
8. **Загора А. Л.** Гашение колебаний мостовых конструкций / А. Л. Загора, М. И. Казакевич // Под ред. Н. Г. Бондаря. – М. : Транспорт, 1983. – 143 с.
9. **Казакевич М. И.** Введение в виброэкологю зданий и сооружений / М. И. Казакевич, В. В. Кулябко. – Д., 1996. – 200 с.
10. **Карамышкин В. В.** Динамическое гашение колебаний / Под ред. К. М. Рагулькиса. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 108 с.
11. **Коренев Б. Г.** Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения / Б. Г. Коренев, Л. М. Резников. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 304 с.
12. **Коренев Б. Г.** Справочник по динамике сооружений / Б. Г. Коренев, И. М. Рабинович. – М. : Стройиздат, 1972. – 511 с.
13. **Кулябко В. В.** Динамика конструкций, зданий и сооружений. Ч. 1. Статико-динамические модели для анализа свободных колебаний и взаимодействия сооружений с основаниями и подвижными нагрузками. – Запорожье, 2005. – 232 с.
14. **Кулябко В. В.** О дискретизации динамических моделей (на примерах балок и рам) при необходимости учета различных видов нелинейностей / В. В. Кулябко, Д. С. Ярошенко – Пространственные конструкции зданий и сооружений (Исследов., расчет, проектир., применение): Сб. статей. Вып.13 / под ред. В. В. Шугаева и др. / МОО ПК, РААСН, НИИЖБ, ЦНИИСК, ЦНИИПСК. – М. : СКАД СОФТ. – 2012. – С. 130 – 139.
15. Рекомендации по виброзащите несущих конструкций производственных зданий / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – М., 1988. – 217 с.
16. **Рутман Ю. Л.** Применение технологии FSI для определения аэроупругих колебаний сооружений / Ю. Л. Рутман, В. А. Мелешко // ANSYS Advantage. Русская редакция. – 2011. – № 16. – С. 7 – 11. – Режим доступа: http://www.ansysolutions.ru/index_print.php?search=view&journal_id=187#p164.