

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 відсунуті 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, вирахуємо 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]:

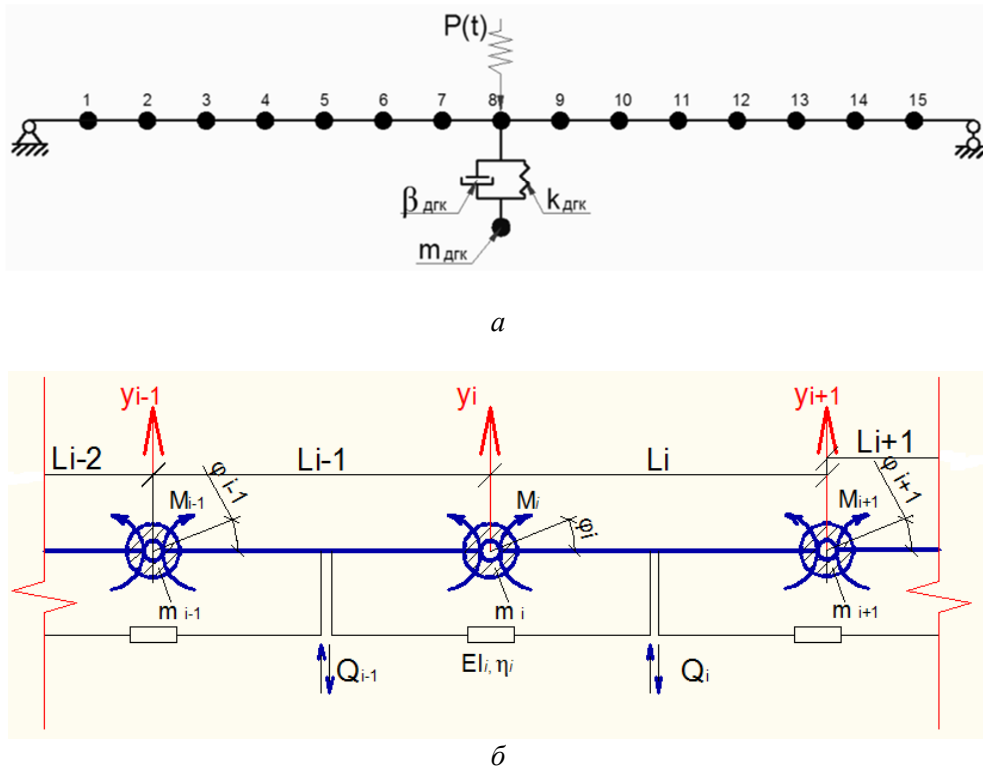


Рис. 1. Розрахункова схема дискретної балки з одним ДГК (а) та фрагмент її динамічної моделі (б)

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

(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 згинна жорсткість 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.

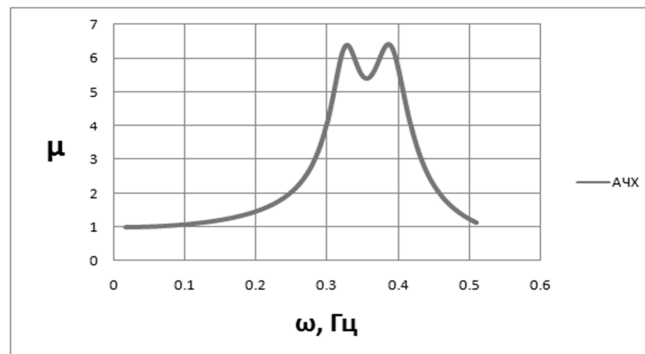


Рис. 2. АЧХ двомасової системи з раціональними параметрами ДГК (за рекомендаціями [1])

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).

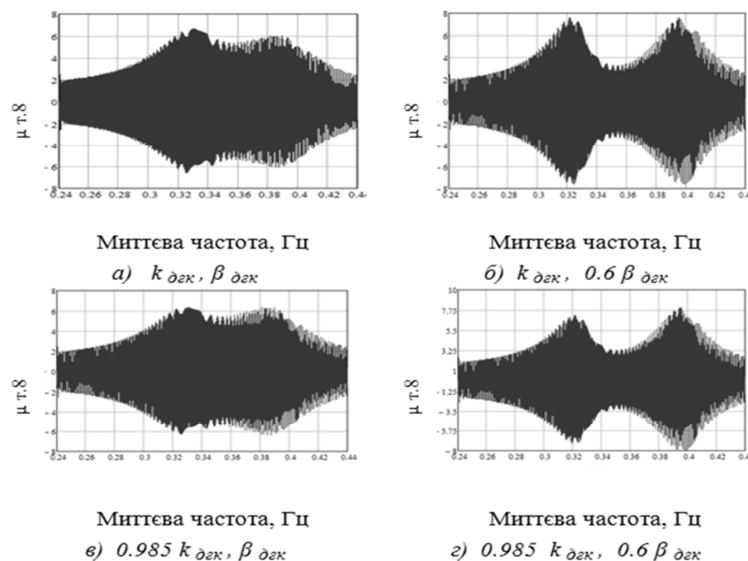


Рис. 3. Реакції системи з різними величинами жорсткості пружного і в'язкості демпфірувального елементів ДГК

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 врахованого згідно з рекомендаціями [1].

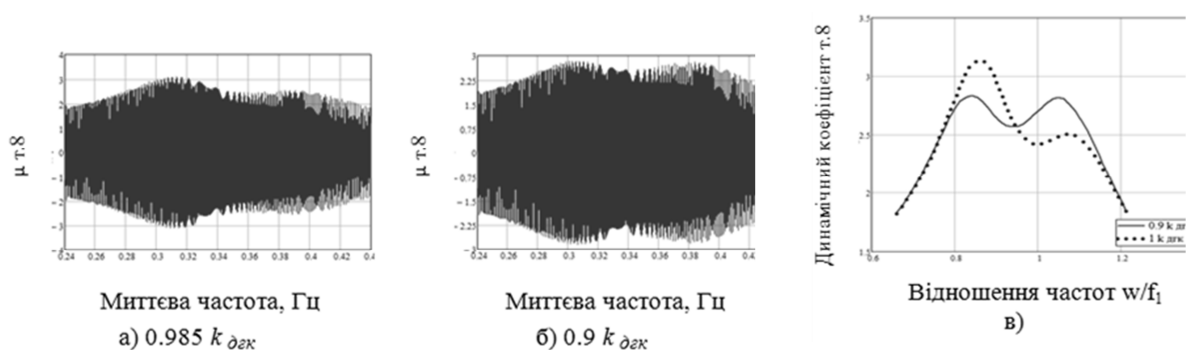


Рис.4. Реакції системи при різних налаштуваннях ДГК (а, б) та її АЧХ (в)

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_{DGC}) буде порівнюватися з максимальною величиною сили тертя в демпфері ДГК із в'язким тертям ($\max F_{TP}/H$), 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 β_{DGC} (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 ($0.8*0.9*k_{DGC}$, $1*0.9*k_{DGC}$, $1.2*0.9*k_{DGC}$).

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

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

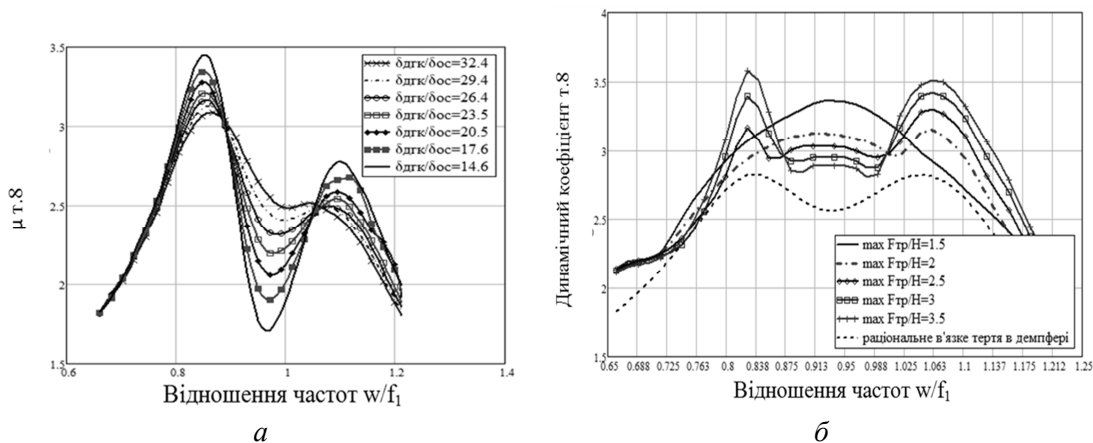


Рис. 5. Фрагмент АЧХ т. 8 системи при різних значеннях величини в'язкого тертя (а) і сухого тертя (б) в ДГК

Пара паралельних ДГК, розташованих симетрично відносно точки прикладення зосередженого гармонічного навантаження. В роботі [11] розглянуто ефективність групи паралельних ДГК без демпфівальних 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 б 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).

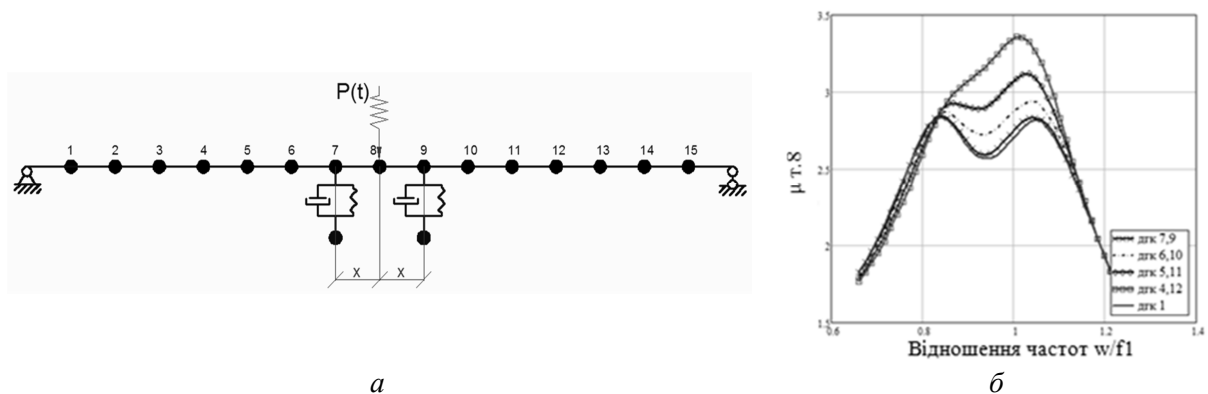


Рис. 6. Дискретна розрахункова схема балки з двома ДГК і зосередженим гармонічним навантаженням посеред її прольоту (а) та фрагмент АЧХ т. 8 системи при різних розташуваннях ДГК

Як бачимо з рисунка б 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 $f_{дгк}$, 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 виброэкологию 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&jornal_id=187#p164.

УДК 624.042

Раціональні параметри одномасових динамічних гасників коливань з тертям, принципи налаштування / Д. С. Ярошенко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2013. – № 4. – С. 43 – 49. – рис. 6. – табл. 1. – Бібліогр.: (16 назв.).

Розглянуто принципи підбору параметрів одномасових динамічних гасників коливань з тертям (в'язким та сухим). У розглянутих прикладах найефективнішим виявився ДГК з демпфером в'язкого тертя. Раціональне налаштування для ДГК з демпферами сухого і в'язкого тертя збігається, але їх ефективність різна.

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

Рациональные параметры одномассовых динамических гасителей колебаний с трением, принципы настройки / Д. С. Ярошенко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2013. – № 4. – С. 43 – 49. – рис. 6. – табл. 1. – Бібліогр.: (16 назв.).

Рассмотрены принципы подбора параметров одномассовых динамических гасителей колебаний с трением (вязким и сухим). В рассматриваемых примерах наиболее эффективным оказался ДГК с демпфером вязкого трения. Рациональная настройка для ДГК с демпферами сухого и вязкого трения совпадает, но их эффективность разная.

Ключевые слова: динамический гаситель колебаний, амплитудно-частотная характеристика, демпфер, инвариантные точки.

Rational parameters of single-mass tuned mass dampers with a friction, the principles of tuning / D. S. Yaroshenko // Visnyk of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D. : PSACEA, 2013. – № 4. – P. 43 – 49. – pic. 6. – tabl. 1. – Bibliogr.: (16 names).

Selection principles for parameters of single-mass tuned mass dampers with a friction (viscous and Coulomb friction) are considered. In the examined examples TMD appeared most effective with the damper of viscous friction. Rational tuning for TMD with dampers dry and viscous friction coincide, but their efficiency different.

Key words: tuned mass damper, amplitude-frequency characteristic, invariant points.