

DOI:

УДК 629.45.027.35

к.т.н. Дівеєв Б.М.,
divboglviv@yahoo.com, ORCID: 0000-0001-5184-499X, h-index: 5,
к.т.н. Котів М.В., mykhailo.kotiv@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4376-505X,
к.т.н. Котів Р.М., roman.m.kotiv@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-9827-9825,
h-index: 3,
Національний університет «Львівська політехніка»

ВИСОТНІ СПОРУДИ З ДИНАМІЧНИМИ ГАСНИКАМИ КОЛИВАНЬ

Розглядаються висотні споруди, що знаходяться під дією динамічних навантажень. Для зменшення рівнів вібрації проаналізовано застосування динамічних гасників коливань (ДГК). Розглядаються два типи пасивних ДГК: маятникового та коткового типів. На основі конденсованих розрахункових моделей проведена оптимізація характеристик ДГК та вказані їхні оптимальні конструкції.

Ключові слова: динамічний гасник коливань; напівактивні; висотні об'єкти; адаптивні схеми; стійкість; оптимізація

Вступ. Пасивні системи керування для висотних будівель мають дві основні категорії: пристрої сейсмічної ізоляції та розсіювання енергії. Системи сейсмічної ізоляції, як це видно з назви, в основному використовуються для захисту цивільних споруд. Пристрої розсіювання енергії є малооб'ємними елементами відносно основної конструкції, прикріпленими до структури для поглинання або відведення частини вхідної енергії. Одним з таких елементів є ДГК, що передає частину вхідної енергії з основної структура до приєднаного абсорбера. В [1] наведено огляд методів сейсмосахисту та приклади їх застосування у конструкціях будівель. Тут розглянуті як сейсмоізолюючі фундаменти, так і ДГК для хмарочосу у Тайбеї (описаний нижче).

Через ефективність систем ДГК вони використовуються у багатьох структурах по всьому світу, таких як будівлі та мости [2–7]. Хоча ДГК були встановлені в багатьох будівлях навколо світу, таких як башта в Торонто, 1975 і будівля Шанхайського Всесвітнього фінансового центру в Шанхаї, 2008. 660-тонний ДГК, встановлений на вершині вежі на Тайбеї, 2004 року, вважається найбільший і найбільш відомим ДГК [3]. Були проведені численні дослідження щодо математичних формулювань, чисельних застосувань і реакції систем, керованих ДГК [5]. На додаток до пасивних ДГК, були досліджені інші типи ДГК, такі як керований змінної жорсткості ДГК [6], що використовувала єдину

масу з пружиною зі змінною жорсткістю, щоб контролювати реакцію збудженого вітром 76-поверхового бетонного будинку. Результати показали, що зсув і реакція прискорення верхнього поверху зменшилися відповідно до 32% і 53% відповідно до відповідної реакції неконтрольованої будівлі. Цей ефект подібний до ефекту активного ДГК, хоча і з меншим споживанням енергії.

Проаналізовано дві реальні конструкції: (1) – башта попереднього нагрівання на цементному заводі (СІМСА) в Мерсіні (Туреччина) [6]; (2) вежа на Подільському цементному заводі [7].

ДГК для висотних споруд. Розглянемо тепер наймасивніші ДГК для висотних споруд. На протязі останнього століття, виходячи з важливої ролі ДГК в гасінні вібрації, проведені численні дослідження для оцінки застосування пасивних, активних та напіваактивних абсорберів як протидії вібрації у висотних спорудах [1-7]. Такі структури як мости, висотні будови, вежі мають малі частоти коливань та демпфування та мають здатність до високих рівнів коливань. Отже, застосування ДГК є ефективним для покращення їхньої динамічної поведінки. Застосування найбільшого ДГК в світі (660т) у другому найвищому хмарочосі в Тайпеї 101 [3] (рис. 1), та інсталяція 140 тонного маятникового абсорбера в вежі спортивного міста Доха в Катарі [7] можуть бути названі як частина самого визначного і ефектного використання ДГК.

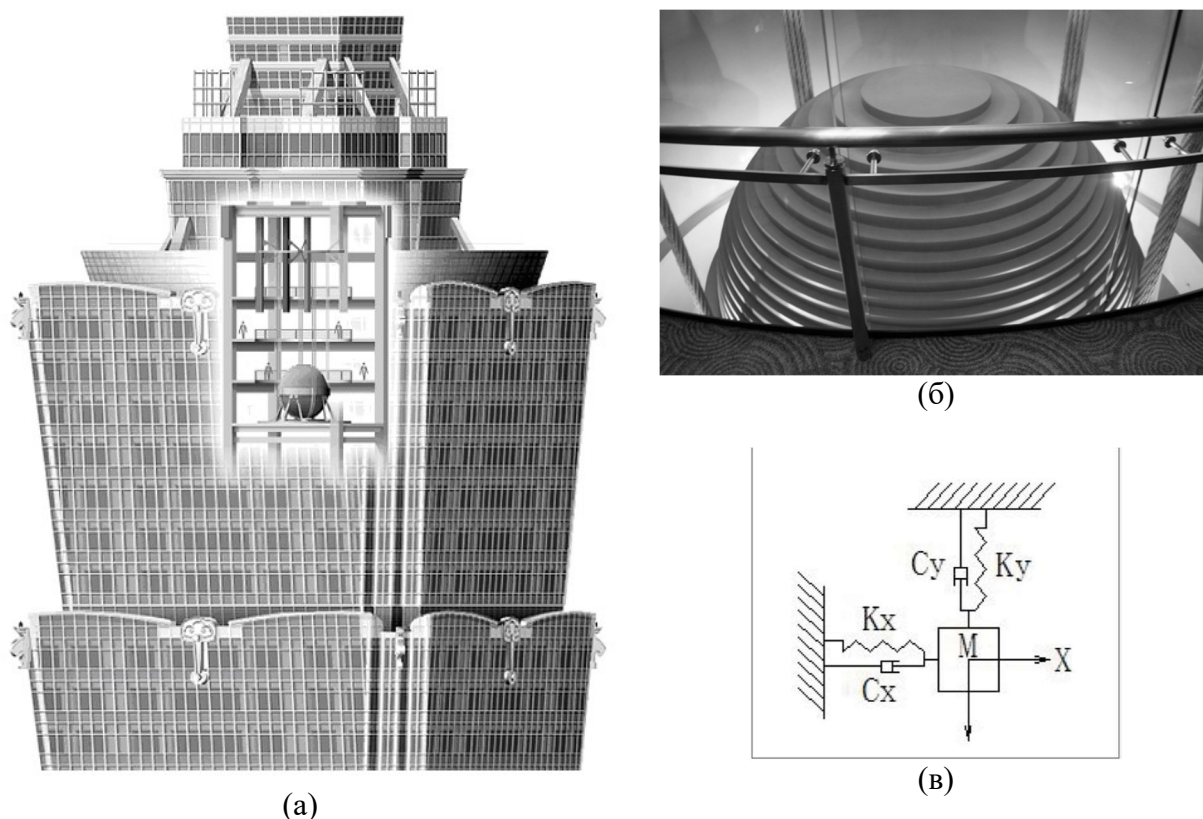


Рис. 1. ДГК у вежі 101 поверхового хмарочосу в Тайпеї: (а) – загальний вигляд ДГК в хмарочосі, (б) – вид ДГК, (в) – механічна схема ДГК

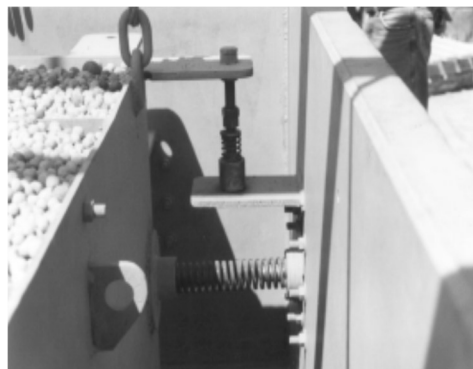
Прикладом застосування ДГК у висотних спорудах промислового призначення може бути вежа попереднього нагріву на цементному заводі в Турції (рис. 2).



(a)



(б)



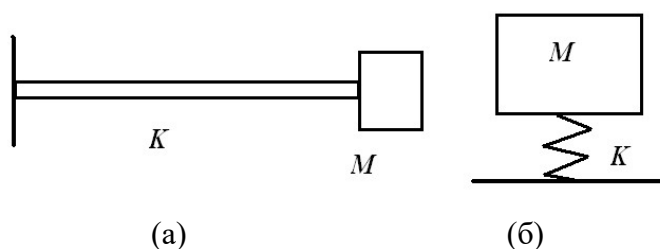
(в)

Рис. 2. Вежа попереднього нагріву (а); Загальний вигляд 2D вібраційного абсорбера (б); приєднання пружин і фрикційних демпферів (в)

Ці обидва ДГК маятникового типу, що діють у горизонтальній площині, налаштовані на першу резонансну частоту хмарочоса та вежі.

Розрахункова схема будівлі з ДГК. Для розрахунку будівлі з ДГК використовують моделі різного ступеня складності. Це громіздкі скінченоелементні моделі з подетальним описом будівель або конденсовані моделі, до висотна споруда розглядається як балка. Але оскільки основний сценарій коливань будови чи вежі в основному відбувається в ореолі її першої резонансної частоти, то в даній роботі ми зосередимося на одно масовій моделі споруди. Такий вибір надасть нам змогу зосередитися саме на процесі взаємодії споруди з ДГК та оптимізації ДГК. Якщо модель ДГК будується переважно просто (згідно прогнозованих конструктивних даних) знову на основі числових схем чи експериментів, то навіть одно-масову модель споруди отримати важче.

Основне рівняння для ідентифікації. Враховуючи те, що як перша резонансна частота споруди, так і пік зовнішнього збурення знаходяться у низькочастотному діапазоні, розглянемо одно-масову модель (рис. 3)



(a)

(б)

Рис. 3. Одно-масова модель крила штанги

Це маса на невагомому стержні (а), еквівалентна класичній одномасовій моделі – масі на пружині (б). Розрахункова модель описується наступним диференціальним рівнянням:

$$m \ddot{w} + k D \dot{w} + k w = F; \quad (1)$$

де k – відповідна жорсткість; D – коефіцієнт в'язкого демпфування. w – переміщення, F – збурення. Параметри m , k , D невідомі. Визначимо m , k на основі знайдених резонансної частоти та жорсткості споруди в місці приєднання ДГК.

Визначимо m , k на основі знайдених вище резонансної частоти та жорсткості. Жорсткість k визначається на основі $k = F/\Delta$ (сила на переміщення). Масу тепер визначаємо на основі формули $m = k/\omega^2$ (жорсткість на квадрат частоти). Частота (перша резонансна) в основному відома з вимірювань або при застосуванні імпульсного збурення споруди ударом. Проте для визначення параметрів m і k можна використати цей же ДГК з різними масами [9-11].

Пружно-маятниковий ДГК. Розглянемо пружно-маятниковий ДГК, що часто застосовується у висотних спорудах. Схема цього ДГК показана на рис. 4.

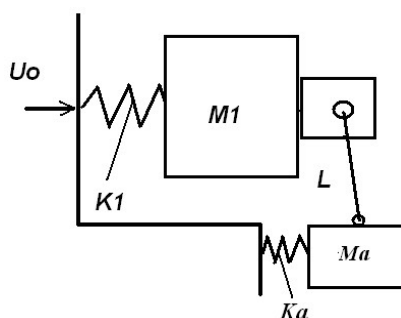


Рис. 4. Пружно-маятниковий ДГК

Рівняння динаміки такого ДГК будуть

$$m_1 \frac{d^2 u_1}{dt^2} + k_1(u_1 - u_0) + k_A(u_1 - u_A) + \frac{m_A}{L}(u_1 - u_A) = 0, \quad m_A \frac{d^2 u_A}{dt^2} + k_A(u_A - u_0) - \frac{m_A}{L}(u_1 - u_A) = 0 \quad (2)$$

Єдина відмінність від звичайного одно-масового ДГК в тому, що замість одного коефіцієнта жорсткості маємо комбінований: пружно-маятниковий коефіцієнт: $k_A^\Sigma = k_A + \frac{m_A}{L}$. Однак у реальних конструкціях ДГК додатковий зв'язок k_A переважно містить не лише пружні елементи, але й демпфуючі елементи, а також нелінійні елементи сухого тертя та бар'єрні функції. Нелінійні рівняння динаміки будуть

$$m_1 \frac{d^2 u_1}{dt^2} + k_1 \left((u_1 - u_0) + \eta_1 \left(\frac{du_1}{dt} - \frac{du_0}{dt} \right) \right) + \frac{m_A}{L} \left((u_1 - u_A) + \eta_{Am} \left(\frac{du_1}{dt} - \frac{du_A}{dt} \right) \right) + F_n = 0, \quad (3)$$

$$m_A \frac{d^2 u_A}{dt^2} - \frac{m_A}{L} \left((u_1 - u_A) + \eta_{Am} \left(\frac{du_1}{dt} - \frac{du_A}{dt} \right) \right) - k_A \left((u_1 - u_A) + \eta_A \left(\frac{du_1}{dt} - \frac{du_A}{dt} \right) \right) - F_n = 0.$$

Параметри m_1 , k_1 , m_A , k_A позначені вище на рис. 1. Нелінійні функції F_n , що характеризують взаємодію маси ДГК з пружними бар'єрами та сухе тертя будуть $F_n = F_B + F_T$, де

$$F_B = k_B \left((x_A - x_1 - A_i) + \eta_B \left(\frac{du_A}{dt} - \frac{du_1}{dt} \right) \right) \quad |x_A - x_1| > A_i, \quad F_B = 0 \quad |x_A - x_1| < A_i, \quad (4)$$

$$F_T = k_T \operatorname{sign} \left(\frac{du_A}{dt} - \frac{du_1}{dt} \right).$$

Тут ще подібно можна було врахувати сухе тертя в шарнірах маятникового підвісу, однак воно, як і демпфування в цьому підвісі η_{Am} досить мале (особливо, коли маса ДГК підвішена на канатах) і не враховується. Як і раніше, для цієї системи рівнянь (3) було складено програму підрахунку на Фортрані.

Приклад 1. Розрахунок башти попереднього нагрівання на цементному заводі (СІМSА) в Мерсіні (Туреччина). Ці дослідження було розпочато через високий рівень вібрації. Башта попереднього нагрівача, показана на рис. 2, виконана зі сталі з 7-ма платформами, висотою 57 метрів, а загальна маса близько 1490 тонн. 2D-вібраційний поглинач масою 7 тонн показаний на рис.2с було виготовлено та встановлено на вісім пружин між внутрішньою та зовнішньою коробкою з відповідною пружністю. Чотири кабелі підтримують масу поглинача. Були спроектовані та виготовлені регульовані амортизатори тертя, здатні працювати в двох вимірах. Конструкцію ДГК було встановлено на верхній платформі башти. Початкові вимірювання вібрації вежі (використовуючи акселерометри, підсилювачі струму, аналізатор спектра та осцилограф) дали основну частоту, близьку до 1Гц

Розрахунок вежі в пакеті АРМ WinMachin. На рис. 5 показана вежа та її власні частоти коливань, включно з першою формою власних коливань отримані в пакеті АРМ WinMachin.

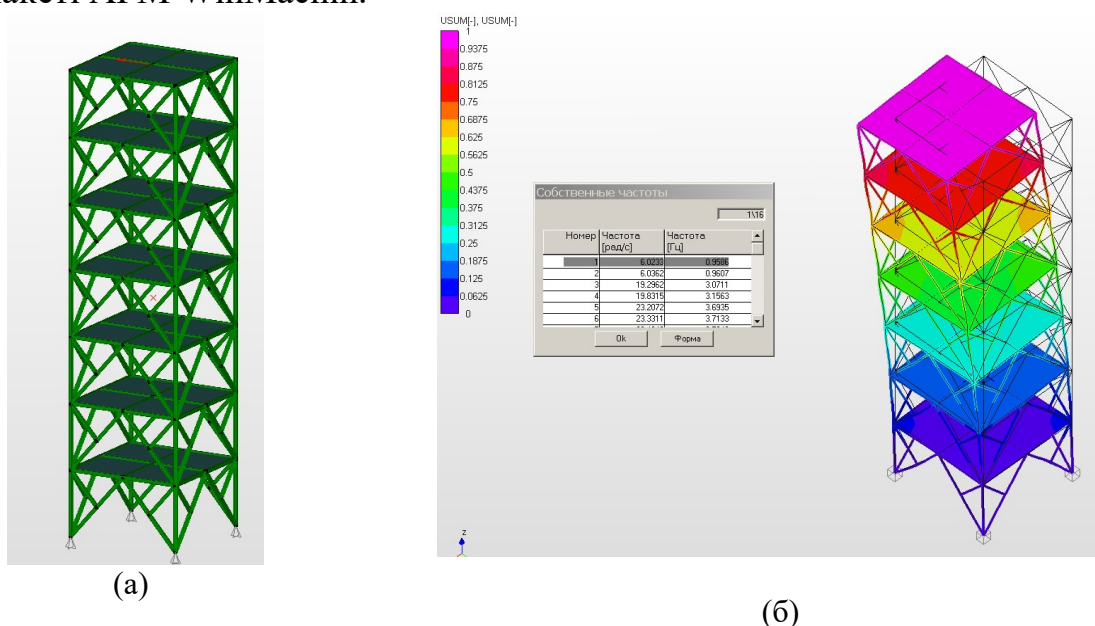


Рис. 5. Вежа (а) та її власні частоти коливань, включно з першою формою власних коливань (б)

Нижче, (рис. 6), наведені АЧХ оптимізованих ДГК для різних мас базису та частотного діапазону отримані на основі наших розрахунків.

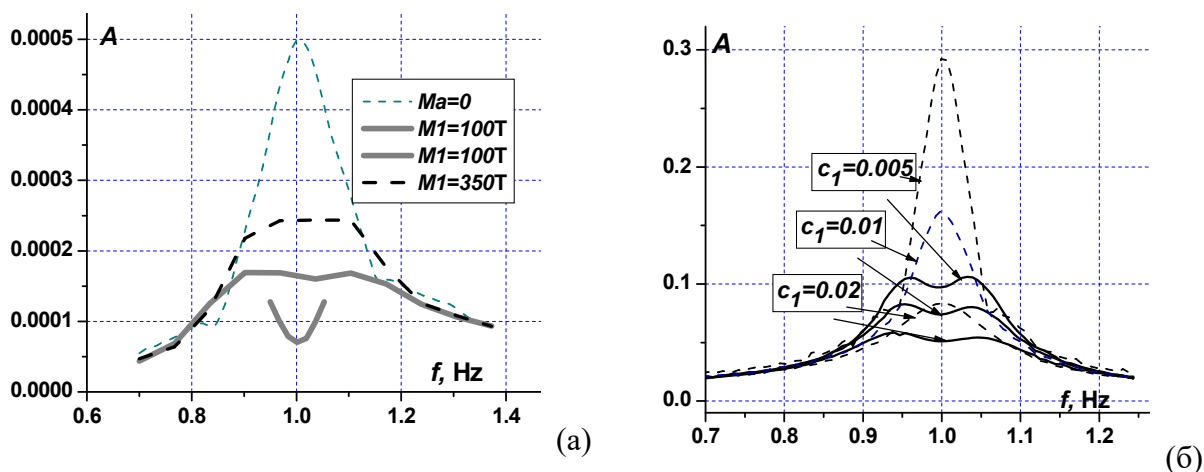


Рис. 6. АЧХ оптимізованих ДГК для різних мас базису та частотного діапазону (а), різний рівень демпфування в базисі (б)

Маса ДГК задавалася так як у [7] – $m_A = 6t$. Параметри моделі визначалися на основі процесу ідентифікації. Маса в моделі у 5 раз менша за масу вежі.

Імпульсне та високочастотне навантаження. На будівлі часто великий вплив мають імпульсне та високочастотне навантаження. Тому розглянемо деталі застосування ДГК для зменшення цих впливів. Розглянемо оптимізацію ДГК по параметрах f_A , η_A при імпульсному збуренні.

$$CiL = \text{Max}(u_1(t)), t > T_0 \quad (5)$$

Тут за цільову функцію взято максимальне відхилення амплітуди базису після деякого початкового періоду часу T_0 . Окремо розглянемо першу форму коливаний (1Гц). На рис. 7 показані оптимізовані віброграми при імпульсному збуренні (частота базису 4Гц). Тут оптимальні параметри ДГК залежать від часу відсічки T_0 в (5).

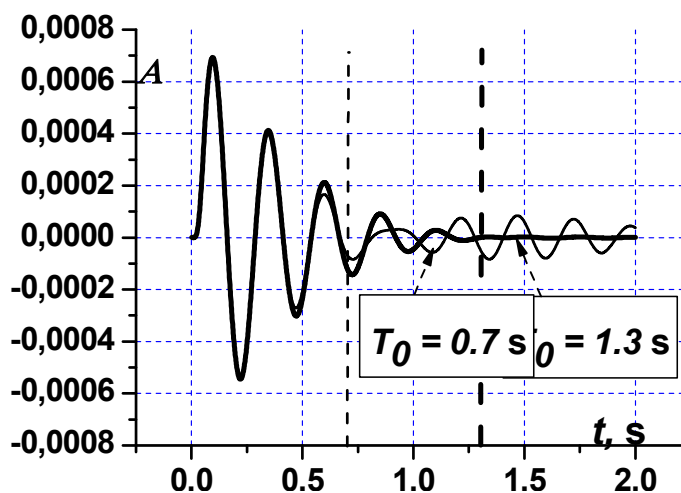


Рис. 7. Оптимізовані віброграми при імпульсному збуренні (частота базису 4Гц) при різних часах відсічки.

Приклад 2. Вежа на Подільському цементному заводі. Розглянемо конструкцію вежі на Подільському цементному заводі. На цій вежі проведені дослідження по вібрації [7]. На рис. 8 показані віброграми швидкостей на верхній площадці вежі в горизонтальному напрямку.

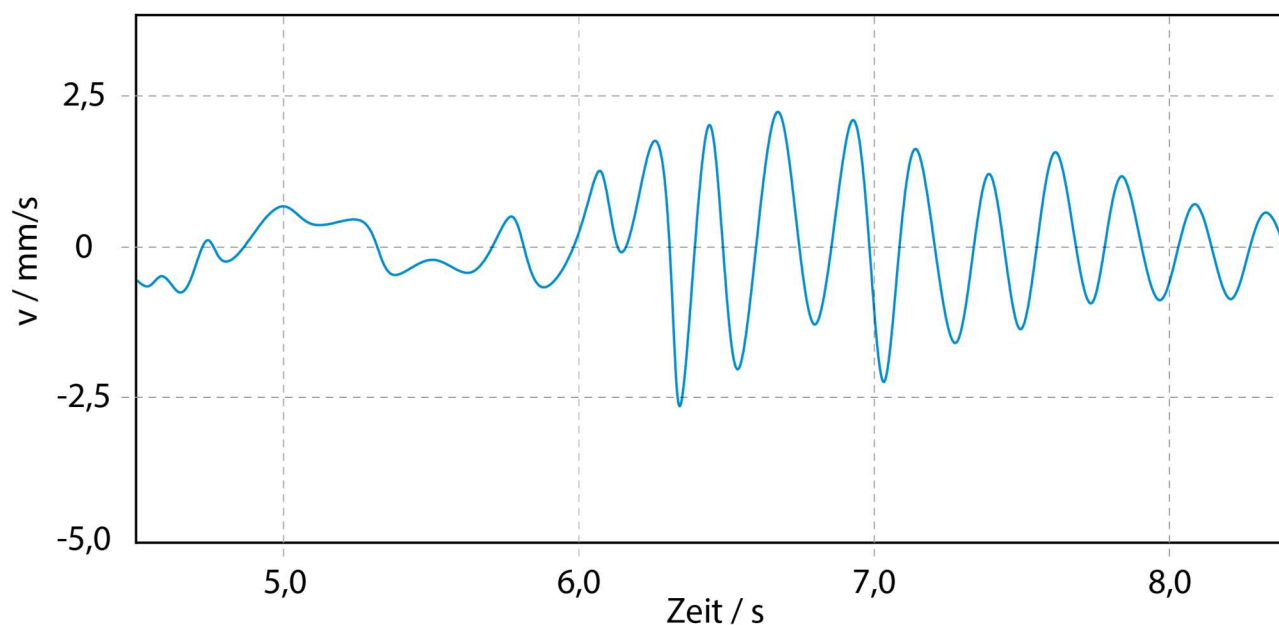
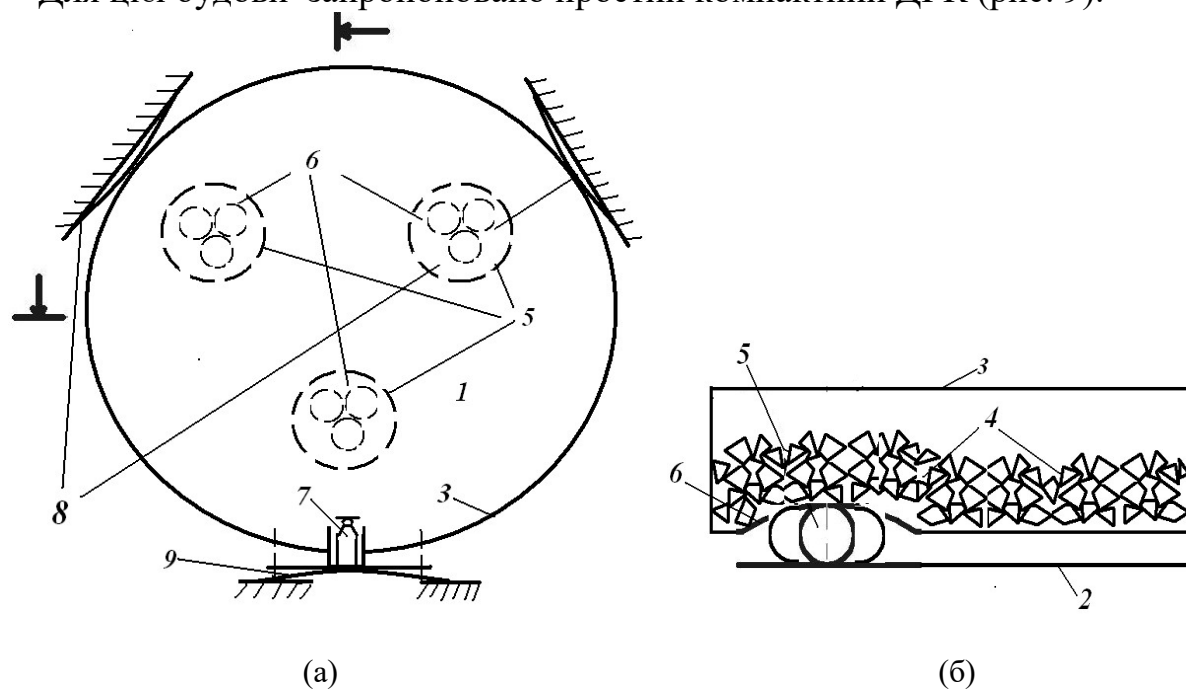


Рис. 8. Віброграми швидкостей на верхній площадці вежі в горизонтальному напрямку

Характер збурення імпульсний, збуджуються коливання вежі на першій власній частоті ($f_1 \approx 1$ Гц) та на вищій частоті ($f_1 \approx 4.5$ Гц). Ці експериментальні дані вказують на те, що треба оптимізувати ДГК і в імпульсному режимі.

Для цієї будови запропоновано простий компактний ДГК (рис. 9).



(а) (б)
Рис. 9. ДГК вид зверху – (а), вид збоку (б)

На рис. 9а схематично зображений ДГК (вид зверху) з рухомою масою 1 у вигляді коробки 3 з трьома сферичними вставками в днищі 5, яка опирається на потрійні кульові опори 6, та обмежену пружними бар'єрами 8 у вигляді криволінійних пластин, одна пластина 9 міняє свою кривину під дією притискного пристрою 7. На рис. 9б схематично зображений ДГК (вид збоку) наповнений дрібнозернистим матеріалом 4 корпус якого 3 містить три сферичні вставки в днищі 5, які опираються на потрійні кульові опори 6, ДГК рухається по поверхні амортизованого об'єкта 2 і досягає регульованої, за рахунок притискного пристрою 7 частоти, та демпфування за рахунок тертя гранульованого матеріалу 4 у коробці та тертя між кулями 6 в опорах.

Розроблений динамічний гасник коливань забезпечує плавне регулювання частотних і демпфуючих характеристик ДГК та реалізує ефективне вібропоглинання у широкому частотному діапазоні по двох осях.

Методика розрахунку такого типу ДГК наведена в [9-11]. Розглянемо оптимізацію ДГК для частоти 1Гц. На рис. 10 показані результати оптимізації для частоти 1Гц та відгук (неоптимізований) на частоті 4Гц.

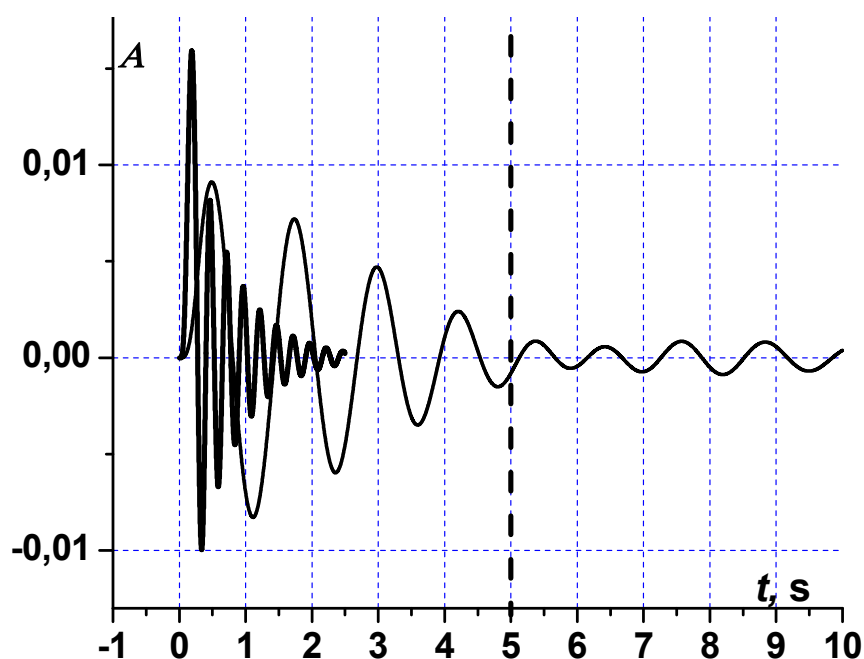


Рис. 10. Результати оптимізації на частоті 1Гц та відгук (неоптимізований) на частоті 4Гц.

Висновки. Для вирішення інженерної задачі оптимального проектування ДГК як, зрештою, для будь-якої техніки не існує стандартних програмних засобів. Універсальні, переважно імпорتنі програми мало пристосовані до специфіки проектування цих конструкцій та описання умов експлуатації машин, не враховуючи їх вартість, важкість освоєння. Проте, на даний час розроблено низку ефективних алгоритмів та програмних засобів моделювання динамічних

процесів, що визначають ресурсні та функціональні властивості таких машин. Можна успішно аналізувати міцність і функціональність висотних споруд з ДГК за допомогою мало-параметричних математичних моделей, які дозволяють інженеру в інтерактивному режимі оптимізувати ці конструкції ще на стадії проектування, а не після виготовлення, що потребує більше затрат. Отримані ефективні конструкції ДГК компактного типу.

Література.

1. Г.М. Іванченко, М.В. Гончаренко, Огляд методів сейсмозахисту та приклади їх застосування у конструкціях, Опір матеріалів і теорія споруд. 2015. № 96. 158-164.
2. S.J. Dyke, Current directions in structural control in the US, in: 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, 2005, pp. 13–16.
3. Kourakis, I. Structural systems and tuned mass dampers of super-tall buildings : case study of Taipei 101, Massachusetts Institute of Technology, 2007.
4. J. Carlot, Effects of a Tuned Mass Damper on Wind Induced Motions in Tall Buildings. Master Thesis, MIT, 2012.
5. B. Palazzo, L. Pettia, Aspects of passive control of structural vibrations, *Meccanica* 32 (1997) 529–544.
6. N. Varadarajan, S. Nagarajaiah, Response control of building with variable stiffness tuned mass damper using empirical mode decomposition and Hilbert transform algorithm. ASCE Engineering Mechanics Conference, No 16, University of Washington, Seattle, July 16–18, 2003.
7. Kenan Y. Sanliturk1 and H. Temel Belek Design and implementation of a 2-dimensional Vibration absorber on a pre-heater tower at a cement factory
8. Eibl , (GbR), Muller, Gunter (IGB GmbH). Report PJSC Podolsky Cement Vibrations in Raw Meal Silo, 2013.
9. Hennadiy Cherchyk, Diveyev, Yevhen Martyn, Roman Sava. Parameters identification of particle vibration absorber for rotating machines. / Proceeding of ICSV21, Vilnius, Lithuania, July 08-12, 2012.
10. Bohdan Diveyev, Ihor Vikovych, Viktor Martyn, Ihor Dorosh. Optimization of the impact and particle vibration absorbers, 22th International Congress on Sound and Vibration 2015 Florence, Italy. Vol. 2, (Electronic edition) 8p.
11. Bohdan Diveyev. Impact and particle buffered vibration absorbers optimization and design. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Material Science*. Vol.1., №2 pp. 35-50.

к.т.н. Дивеев Б.М., к.т.н. Котив М.В., к.т.н. Котив Р.М.,
Национальный университет «Львовська политехника»

ВЫСОТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ГАСИТЕЛЯМИ КОЛЕБАНИЙ

Для определения оптимальных параметров динамического виброгасителя (ДГК) требуется полная многопараметрическая модель динамики машин и конструкций. Модель с двумя степенями свободы неприемлема для достаточно точного расчета с достаточной точностью колебаний конструкции и, следовательно, для адекватного описания ее динамических характеристик. Поэтому на практике необходимо исследовать проект с использованием сложной модели. В частности, методы определения концентрации массы и жесткости могут быть использованы на основе уточненного теоретического расчета. Ряд численных схем (ЧС) известен для сложных вибронегруженных структур, в которых разработаны методы разложения и синтеза ЧС, основанные на новых методах модального синтеза. Также разработан комплекс ЧС дискретно-конечного типа, который дает возможность в адаптивном режиме рассчитывать напряжения не только в конечных элементах, но и в местах их наибольшей концентрации - в соединениях.

Рассматриваются методы декомпозиции и численного синтеза на основе адаптивных схем. Разработана методика, обеспечивающая оптимальные динамические вибропоглотители для устранения чрезмерной вибрации при синусоидальной и ударной нагрузки высотных зданий. Одной из задач данной работы является анализ параметров идентификации динамического вибропоглотителя и базовой конструкции. Предлагаются модели динамики дискретного продолжения некоторых удлиненных элементов с мульти-массовыми ДГК. Рассмотрены вопросы устойчивости при оптимизации ДГК. Приведены примеры практической реализации ДГК.

Ключевые слова: динамический гаситель колебаний; полуактивные; высотные объекты; адаптивные схемы; устойчивость; оптимизация

PhD Bohdan Diveyev, PhD Mykhailo Kotiv, PhD Roman Kotiv,
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

HIGH-RISE BUILDINGS WITH DVA

To determine the optimal parameters of the dynamic vibration absorber (DVA), a complete multi-parameter model of the dynamics of machines and structures is

required. A model with two degrees of freedom is unacceptable for a sufficiently precise calculation with sufficient accuracy of the oscillations of the design, and thus for an adequate description of its dynamic characteristics. Therefore, in practice, it is necessary to investigate the design using a complex model. In particular, the methods for determining the concentration of mass and stiffness can be used on the basis of a refined theoretical calculation. A number of numerical schemes (NS) are known for complex vibro-loaded structures, in which developed methods of decomposition and synthesis of NS based on new methods of modal synthesis. Also developed is a complex NS of discrete-continuum type, which provides an opportunity in the adaptive mode to calculate stresses not only in the continuum elements, but also in the places of their greatest concentration - in the compounds.

In this paper, an efficient numerical approach based on the theoretical-experimental method is proposed to maximize the minimal damping of modes in a prescribed frequency range for general viscous tuned-mass systems. Methods of decomposition and numerical synthesis are considered on the basis of the adaptive schemes. The influence of dynamic vibration absorbers and basic design elastic and damping properties is under discussion. A technique is developed to give the optimal DVA's for the elimination of excessive vibration in sinusoidal and impact forced tall buildings system. One task of this work is to analyze parameters identification of the dynamic vibration absorber and the basic structure. The discrete-continue models of machines dynamics of some elongated element with multi mass DVA's are offered. A technique is developed to give the optimal DVA's for the elimination of excessive vibration in harmonic stochastic and impact loaded systems. The questions of robustness at optimization of DVA are considered. Different types of control management for semi-active DVA's are applied. Examples of DVA's practical implementation are presented.

Keywords: dynamic vibration absorber; semi-active; high-rise objects; adaptive schemes; optimization; robustness; design

REFERENCES

1. H.M. Ivanchenko, M.V. Honcharenko, Ohliad metodiv seizmozakhystu ta pryklady yikh zastosuvannia u konstruktsiakh, Opir materialiv i teoriia sporud. 2015. № 96. 158-164. {in Ukrainian}
2. S.J. Dyke, Current directions in structural control in the US, in: 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, 2005, pp. 13–16. {in English}
3. Kourakis, I. Structural systems and tuned mass dampers of super-tall buildings: case study of Taipei 101, Massachusetts Institute of Technology, 2007. {in English}

4. J. Carlot, Effects of a Tuned Mass Damper on Wind Induced Motions in Tall Buildings. Master Thesis, MIT, 2012. {in English}
5. B. Palazzo, L. Pettia, Aspects of passive control of structural vibrations, *Meccanica* 32 (1997) 529–544. {in English}
6. N. Varadarajan, S. Nagarajaiah, Response control of building with variable stiffness tuned mass damper using empirical mode decomposition and Hilbert transform algorithm. ASCE Engineering Mechanics Conference, No 16, University of Washington, Seattle, July 16–18, 2003. {in English}
7. Kenan Y. Sanliturk¹ and H. Temel Belek Design and implementation of a 2-dimensional Vibration absorber on a pre-heater tower at a cement factory. {in English}
8. Eibl, (GbR), Muller, Gunter (IGB GmbH). Report PJSC Podolsky Cement Vibrations in Raw Meal Silo, 2013. {in English}
9. Hennadiy Cherchyk, Diveyev, Yevhen Martyn, Roman Sava. Parameters identification of particle vibration absorber for rotating machines. / Proceeding of ICSV21, Vilnius, Lithuania, July 08-12, 2012. {in English}
10. Bohdan Diveyev, Ihor Vikovych, Viktor Martyn, Ihor Dorosh. Optimization of the impact and particle vibration absorbers, 22th International Congress on Sound and Vibration 2015 Florence, Italy. Vol. 2, (Electronic edition) 8p. {in English}
11. Bohdan Diveyev. Impact and particle buffered vibration absorbers optimization and design. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Material Science*. Vol.1., №2 pp. 35-50. {in English}