

Інноваційний демпфер багатоповислової будівлі INNOVATIVE DAMPER OF A MULTISTORY BUILDING

Азізов Т.Н., д.т.н., проф. (Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини), Кочкар'ов Д.В., д.т.н., доц. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), Мельник О.С., к.т.н., доц. (Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини)

Taliat Azizov, Doctor of Engineering, Professor (Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Uman, Ukraine), Dmytro Kochkarev, Doctor of Engineering, Associate Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine), Oleksiy Melnik, Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Uman, Ukraine)

Наведена нова конструкція будівлі, в якій замість традиційного маятникового демпфера у вигляді металевої кулі використана частина будівлі, підвішена між двома основними блоками будівлі. Використання в якості маятникового демпфера замість металевої кулі підвішеною частини будівлі з одного боку збільшує корисний об'єм, а з іншого боку дозволяє варіювати масою демпфера в необхідних розрахунком межах.

Existing systems for seismic insulation of buildings, as a rule, are performed using damping devices, without connections, etc. At the same time, dynamic efforts are still quite high. A very effective way to dynamically protect a multi-stored building is to hang a massive pendulum with a spring system. With the significant effectiveness of this method of reducing the dynamic forces and vibrations of a building, this method has several disadvantages. Instead of a dynamic damper in the form of a metal ball, which significantly reduces the useful volume of the building and increases the cost, the article proposed to hang up part of the building, which is itself a pendulum damper and at the same time increases the useful area. The design of the suspended part of the building can significantly reduce the amplitude of vibrations and dynamic forces on the supporting structures of the building when an earthquake is applied.

In such a constructive scheme an additional part consisting of one or several floors is suspended between the main parts of the building. The mass of the suspended part of the building is calculated. The effectiveness of the proposed method is shown on the example of a frame building consisting of two ten-story parts at the edges and apart suspended between them consisting of five floors in an earthquake of 9 points.

It is shown that the maximum horizontal deviation from the vertical in a building without additional suspended floors is twice as large as in a building with five suspended floors. The use of the hanging part of the building can reduce the dynamic efforts by half. The increase in the mass of the suspended part of the building leads to a decrease in the amplitude of the horizontal oscillations of the main parts. In buildings where a metal ball is used as a pendulum, an increase in the mass of the pendulum leads to an increase in the cost of the building and a decrease in the useful area. In the proposed building, the mass of the pendulum damper can be taken anywhere, which is selected by dynamic calculation. In addition, this pendulum is part of the building and, conversely, increases its usable area.

Ключові слова: маятниковий демпфер, підвісна будівля, землетрус, динамічні зусилля, амплітуда, частота коливань.

Keywords: pendulum damper, suspended building, earthquake, dynamic forces, amplitude, oscillation frequency.

Аналіз досліджень і постановка задачі

Відомо, що основною і найбільш небезпечною складовою землетрусу є горизонтальна складова. У динамічних розрахунках традиційних будівель, які працюють за консольної схемою, маси поверхів зосереджуються в рівні перекриттів [1, 4, 10]. Горизонтальні сейсмічні сили від

кожного поверху, як відомо, рівні множенню маси на прискорення коливання ґрунту. При цьому, чим більша кількість поверхів має будівля, тим більші зусилля будуть виникати в рівні обрізу фундаменту.

Існуючі системи сейсмічної ізоляції будівель, як правило, виконуються із застосуванням демпфуючих пристроїв, в'язів, що вимикаються та ін. [3, 5, 6, 7, 9, 11]. При цьому, однак, динамічні зусилля все одно залишаються досить високими. Крім того, механізми такого сейсмічного захисту обходяться досить дорого.

Досить ефективним способом динамічного захисту багатоповерхового будинку є підвішування масивного маятника з системою пружин (як, наприклад, в будівлі Таїреї 101 в Китаї). При істотній ефективності такого способу зменшення динамічних зусиль і коливань будівлі, цей спосіб має ряд недоліків. По-перше, великий простір всередині будівлі залишається не використаним, тому що масивний маятник висить всередині будівлі протягом декількох його поверхів. По-друге, вартість матеріалу масивного маятника збільшує загальну вартість будівлі. По-третє, для більш ефективного гасіння коливань будівлі необхідно збільшення маси маятника, а отже, вартості, і в зв'язку з цим його масу доводиться обмежувати.

Пропонувалися конструктивні схеми, в яких використовувалися підвісні фундаменти [1, 9]. Однак, такі конструктивні схеми так і не знайшли свого практичного застосування. Причини відмови від таких рішень так і залишилися не з'ясованими. Дослідження авторів цієї статті [1] показали, що динамічні зусилля в будівлях з підвісними фундаментами виявилися навіть більшими, ніж в будівлях, які працюють за консольною схемою.

Дослідження авторів цієї статті [2, 8] показують, що підвішування самої будівлі на несучій рамі є ефективним методом боротьби з динамічними зусиллями, що виникають під час землетрусу або вітрового навантаження. При цьому сейсмічні зусилля істотно знижуються. Переваги такої конструкції очевидні. Однак, і така конструкція має ряд своїх недоліків. Серед цих недоліків є складність архітектурно-дизайнерських рішень несучої рами, на яку підвішена будівля; необхідність захисту від коливань при дії вітрового навантаження; досить велика маса конструкції несучої рами, тому що вагу підвісної будівлі сприймають як колони (вертикальні елементи) самої будівлі, так і колони несучої рами. Іншими словами, вертикальні навантаження сприймаються два рази, що практично веде до двократного збільшення маси вертикальних несучих елементів.

У зв'язку з вищесказаним **метою цієї статті** є вдосконалення конструктивної схеми підвісної будівлі, що враховує недоліки існуючих схем.

Викладення основного матеріалу

Як було сказано вище, підвішування масивного маятника всередині будівлі має ряд недоліків. Замість маятника, який по суті є баластом, пропонується використання маятника у вигляді певної частини приміщень в кілька поверхів, які підвішені усередині основної будівлі (рис. 1).

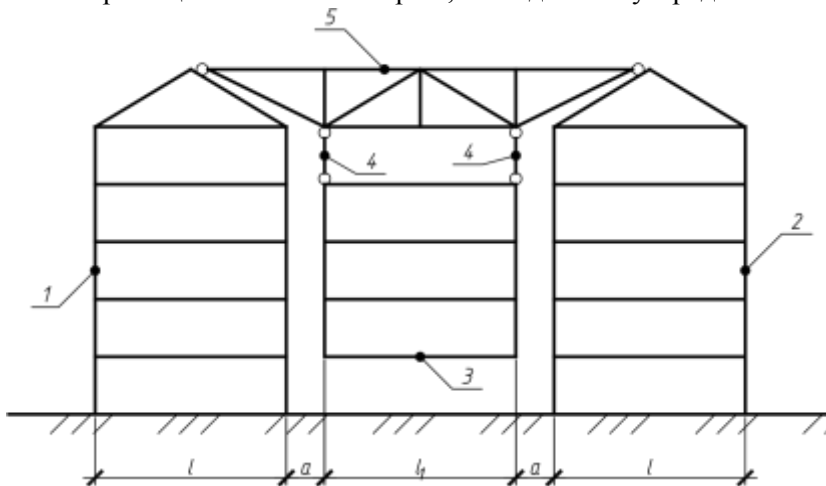


Рис. 1. Схема будівлі, всередині якої підвішена частина додаткових поверхів

У такій конструктивній схемі між основними частинами будівлі 1 і 2 підвішена додаткова частина 3, що складається з одного або декількох поверхів. Частина будівлі 3 підвішується за допомогою тросів 4 на фермі 5, яка шарнірно кріпиться до гребневих вузлів каркаса основної

частини будівлі 1 і 2. Крок ферм в поздовжньому напрямку (перпендикулярно площині малюнка 1) підбирається розрахунком. Маса підвішеної частини 3 підбирається розрахунком. Тобто в залежності від необхідної оптимальної маси маятника визначається необхідна кількість поверхів підвішеної частини будівлі. Відстань між колонами в підвішеній частини може бути рівною відстані між колонами в крайніх (основних) частинах будівлі, може бути більшою або меншою. Відстань між підвішеною і основними частинами підбирається з умови можливості коливання підвішеної частини під час землетрусу.

Динамічна розрахункова схема такої конструкції має вигляд, показаний на рис. 2.

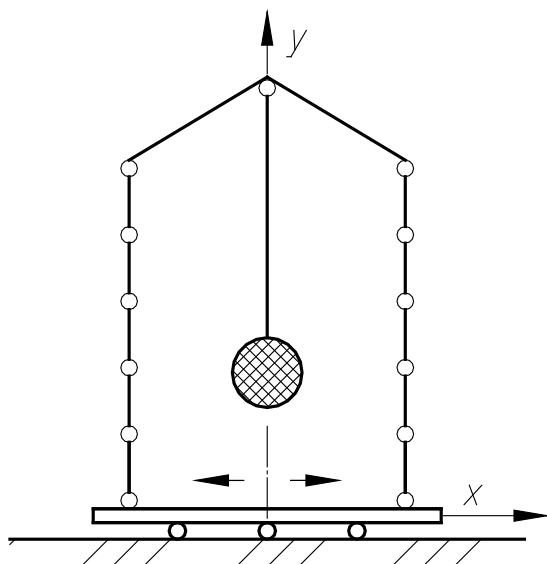


Рис. 2. Динамічна розрахункова схема пропонованої будівлі

Горизонтальні сейсмічні сили, що діють на конструкцію будівлі визначаються наступним чином. Зусилля від мас в елементах основної частини (поз. 1 і 2 на рис. 1) визначаються відомими методами будівельної механіки, наприклад, за [10]. Потім визначається горизонтальна динамічна сила в точці підвісу підвісної частини за методикою [2, 8]. Ця сила, як відомо, залежить (при інших рівних умовах коливання ґрунту) від маси підвішеної частини, довжини нитки підвісу і горизонтальної жорсткості рами, на якій підвішена частина будівлі.

Для полегшення конструкції замість схеми підвішування на фермі (поз. 5 на рис. 1) можна підвісити частину будівлі на тросах, як показано на рис. 3. При цьому замість досить масивної ферми поз. 5 на рис. 1 будуть використані троси поз. 4 на рис. 3 і розпірка поз. 5 на рис. 3. Можна також застосувати схему без розпірки поз. 5 на рис. 3.

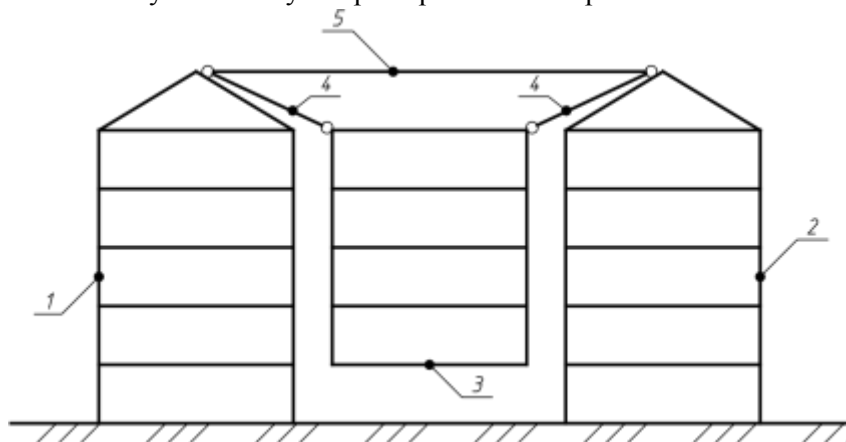


Рис. 3. Схема підвішування будівлі на похилих тросах

В такому випадку розпір від похилого розміщення ниток (тросів) поз. 4 повинен бути сприйнятий самими основними частинами будівлі поз 1 і 2. Слід зазначити, що від схеми підвішування підвісної частини будівлі залежать динамічні зусилля. Так, при підвішуванні за

схемою рис. 3 при горизонтальному коливанні основи виникають вертикальні складові динамічних зусиль, які складаються із зусиллями від власної ваги будівель в стиснутих колонах частин 1 і 2 і в розтягнутих вертикальних елементах підвішеної частини 3. Виникнення вертикальних складових зусиль при горизонтальному коливанні видно з рис. 4, де наведена деформована схема.

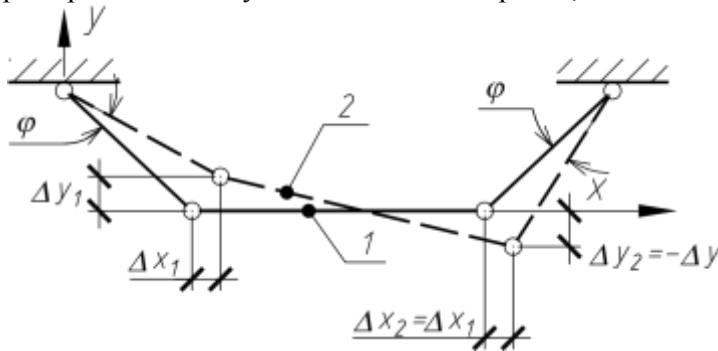


Рис. 4. Схема деформування системи при горизонтальному коливанні

При повороті на кут φ нитки підвісу стрижень 1 на рис. 4, що імітує підвішену будівлю (або верхню горизонтальну раму цієї будівлі), приймає положення 2. При цьому одна частина піднімається по вертикалі на величину Δy_1 , а інша частина опускається на величину $\Delta y_2 = -\Delta y_1$. При коливанні знаки вертикальних переміщень постійно змінюються. Відповідно змінюються і напрямки вертикальних динамічних сил.

Ефективність запропонованого способу покажемо на простому прикладі. Нехай є умовний каркасний будинок, що складається з двох десятиповерхових частин по краях (поз. 1 і 2 на рис. 1), і підвішеної частини (поз. 3 на рис. 1), що складається з п'яти поверхів. Сітка колон 6x6 м, висота поверху 3 м. Нехай також сумарне навантаження від ваги конструкцій і корисного навантаження на перекриття становить 10 кН/м^2 . Тоді маса одного поверху (зосередженого в динамічній схемі в рівні перекриття) складе 36 т. Колони і ригелі каркасів мають переріз 400x400 мм. Нехай основа коливається по закону $x_0 = a \cdot \sin(p \cdot t)$, де a – амплітуда, а p – кругова частота коливання ґрунту. При цьому $a = 0.036 \text{ м}$, $p = 10$ (приблизно відповідає землетрусу в 9 балів).

Динамічна розрахункова схема наведена вище на рис. 2. Зміною довжини нитки підвісу і маси підвішеної частини будівлі можна регулювати частоти коливань як підвішеної частини, так і основних (несучих) частин будівлі. Конструкція з підвісною будівлею така, що коливання підвісної частини і несучих частин відбуваються в протилежних фазах. Таким чином горизонтальне зусилля від коливання підвісної частини зменшує аналогічні зусилля в крайніх частинах будівлі. Зусилля і переміщення можуть бути визначені за допомогою програм типу Ansys, Lira і т.п. Для спрощення можна розрахувати без застосування програм окремо консольну схему за відомими методиками розрахунку (наприклад, [9, 10]) і схему підвішеної будівлі за методикою авторів [2, 8]. Отримати максимальні переміщення і відняти переміщення каркаса від коливання крайніх частин переміщення від коливання підвішеної частини. Розрахунок з таким підходом показує, що при вищенаведених даних амплітуди і частоти коливання ґрунту максимальне горизонтальне відхилення від вертикалі в будівлі без додаткових підвішених поверхів становить близько 730 мм. У будівлі ж з п'ятьма підвішеними поверхами це максимальне відхилення становить близько 380 мм. Якщо ж розрахувати будівлю з сімома додатковими підвішеними поверхами, то максимальне відхилення верху будівлі складе 315 мм.

На такому дуже спрощеному прикладі ми показали, що використання підвішеної частини будівлі, що є маятниковим демпфером для основної частини, може зменшити амплітуду коливань (a , отже, і динамічні зусилля) в два рази. Збільшення маси маятникового демпфера призводить до зменшення амплітуди горизонтальних коливань будівлі. У будівлях, де в якості маятника використовують металеву кулю, збільшення маси маятника призводить до збільшення вартості будівлі та зменшення корисної площі. А в запропонованому приміщенні масу маятникового демпфера можна приймати будь-якою, яка підбирається динамічним розрахунком. Крім того цей маятник є частиною будівлі і, навпаки, збільшує його корисну площу.

Висновки і перспективи досліджень

Замість динамічного демпфера у вигляді металевої кулі, який традиційно застосовується для зменшення динамічних коливань і зусиль, який суттєво зменшує корисний об'єм будівлі і збільшує вартість, запропоновано підвішувати частину будівлі, яка є маятниковим демпфером і одночасно збільшує корисну площу. Конструкція підвішеної частини будівлі дозволяє значно зменшити амплітуду коливання і динамічні зусилля на несучі конструкції будівлі при впливі землетрусу.

У перспективі передбачається розробка конструкцій вузлів підвішеної будівлі.

Список використаних джерел

1. Azizov T.N. Research of suspended buildings and structures // *SciencesofEurope*. – 2018. – Vol 1, № 34. – P. 18-24.
2. Azizov T., Jurkowska N. Improving the design of the earthquake-proof suspension building // *E3S Web of Conf.* 36 01001 (2018). DOI: 10.1051/e3sconf/20183601001 BIG 2018 – 4th Nationwide Scientific Conference on Engineering-Infrastructure-Mining.
3. C.C. Chang, Mass dampers and their optimal designs for building vibration control, *Eng. Struct.* (n.d.) 454–463. doi:10.1016/S0141-0296(97)00213-7.
4. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings Worked examples, (2012) 522. http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS_335/report/EC8_Seismic_Design_of_Buildings-Worked_examples.pdf.
5. K.S. Moon, Structural Design of Double Skin Facades as Damping Devices for Tall Buildings, *Procedia Eng.* (2011) 1351–1358. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.170.
6. M.G. Castellano, and S. Infanti, Recent applications of Italian anti-seismic devices, *Earthq. Resist. Eng. Struct. / WIT Trans. Built Environ.* Vol 104 (2009) 333–342. <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/ERES09/ERES09031FU1.pdf>
7. R.O. Hamburger, Facts for Steel Buildings Number 3 - Earthquakes and Seismic Design, (2009) 71. <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/facts-for-steel-buildings-3-earthquakes-and-seismic-design.pdf>.
8. Taliat Azizov , NadziejaJurkowskaImproved technique for the earthquake proof suspension building// *Journal of Measurements in Engineering*, Vol. 6, Issue 4, 2018, p. 196-202. <https://doi.org/10.21595/jme.2018.20411> Received 28 November 2018; received in revised form 12 December 2018; accepted 20 December 2018; published 31 December 2018.
9. Немчинов Ю.И. Сейсмостойкость зданий и сооружений. В двух частях. – Киев, 2008. – 480 с.
10. Смирнов А.Ф., Александров А.В., Лашеников Б.Я. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений. – М.: Стройиздата, 1984. – 416 с.
11. Смирнов В.И. Сейсмоизоляция зданий и сооружений / Промышленное и гражданское строительство, 1997, № 12. – С. 37-39.