

БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ

УДК 624.012: 699.841

ЗМІШАНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ БУДІВЛІ З ПІДВІСНИМИ ПЕРЕКРИТТЯМИ

MIXED METHOD OF CALCULATION OF A BUILDING WITH SUSPENDED FLOORS

Азізов Т.Н., д.т.н., проф., Orcid [0000-0001-9621-9805], (Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини), **Кочкар'єв Д.В., д.т.н., проф., Orcid[0000-0002-4525-7315],** (Національний університет водного господарства та природокористування)

Azizov T.N., Doctor of Engineering, Professor, (Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Ukraine), **Kochkarev D.V., Doctor of Engineering, Professor** (National University of Water and Environment Engineering, Ukraine)

Запропонована методика динамічного розрахунку будівлі, перекриття якої підвішені до несучої рами. Виведено систему диференціальних рівнянь, рішення якої дозволяє визначити невідомі переміщення. Після визначення переміщень не складно визначити динамічні зусилля, діючі на несучі конструкції будівлі.

A method of dynamic calculation of a multi-story building, the floors of which are suspended from the supporting frame, is proposed. A system of differential equations is derived, the solution of which allows determining unknown displacements. After determining the displacements, the forces acting on the supporting structures are easily determined. It is shown that in the proposed building design, the use of Lagrange equations of the second kind leads to rather cumbersome expressions. Therefore, a mixed method was used to formulate the equations of motion. As unknown functions, the horizontal displacements of the supporting frame at the level of each floor and the angles of rotation of the threads on which the floors are suspended are taken. The first group of differential equations is compiled using the force method. The second group of equations is compiled using the d'Alembert principle. At the same time, the condition of equilibrium of each mass (which simulates one floor) is considered, which consists in the condition that the sum of the moments of all forces, including the forces of inertia, relative to the suspension point of each mass is equal to zero. This greatly simplified the compilation of the system of differential equations. It is shown that if in a particular case, a one-story frame is considered, then the system of equations

completely coincides with the system obtained earlier by the author of the article using the Lagrange equations of the second kind. This proves the correctness of the adopted approach to the compilation of a system of differential equations. On the example of a one-story building, it is shown that the dynamic forces from seismic effects for the proposed building are significantly less than those in traditional buildings operating in a cantilever arrangement. As one of the variants, a building scheme is also proposed, in which part of the floors is rigidly fixed according to the traditional scheme, and part is suspended. It is also shown that when determining the forces from seismic effects, it is necessary to consider in the aggregate both the acceleration of the ground vibration and its amplitude since dynamic efforts depend on the ratio of these factors.

Ключові слова: підвішений будинок, сейсмічна безпека, динамічні сили, умови рівноваги, принцип Даламбера
suspended building, seismic safety, dynamic forces, equilibrium conditions, d'Alembert's principle

Аналіз досліджень і постановка задачі. Відомо, що основною і найбільш небезпечною складовою землетрусу є горизонтальна складова. У розрахунках традиційних будівель маси поверхів зосереджуються в рівні перекриттів [3]. Горизонтальні динамічні сили від маси кожного поверху, як відомо, рівні добутку маси на прискорення коливання цієї маси. Це прискорення складається з прискорення коливання фундаменту і прискорення від деформації самої будівлі.

Сейсмічна ізоляція будівель, як правило, виконується з застосуванням демпферів або в'язей, які вимикаються [1, 2]. Як відомо, основна ідея таких систем полягає в тому [4, 5], що елемент, який вимикається, прикріплюється жорстко до в'язевих елементів і до основної несучої конструкції, забезпечуючи жорсткий зв'язок верхніх поверхів і фундаменту до певних величин сейсмічного навантаження. Після перевищення цих граничних величин елемент руйнується. Однак, величина таких граничних значень досить складно піддається розрахунку. Сейсмічні зусилля знижуються, але залишаються при цьому досить великими.

У роботах авторів цієї статті [6, 8] запропонована конструкція і розрахунок підвісної будівлі, що відрізняється істотним зниженням зусиль в несучих конструкціях. Ця конструктивна схема є новою і потребує вдосконалення методів розрахунку її елементів на випадок багатоповерхової будівлі, а також порівняльного аналізу зусиль в традиційних будівлях і підвісних.

У зв'язку зі сказаним **метою цієї статті** є вдосконалення конструкції несучої рами підвісних будівель і розробка принципів розрахунку несучих конструкцій багатоповерхових будівель.

Викладення основного матеріалу.

При розгляді підвісної будівлі як системи з однією або двома масами зручно використовувати рівняння Лагранжа другого роду [6, 8]. Для багатомасових систем використання цих рівнянь стає досить громіздким. Тому для розрахунку таких систем скористаємося методикою, запропонованою в [7], де використаний принцип Даламбера спільно з методом сил.

Нехай є каркас будівлі, в якому перекриття кожного поверху підвішені на окремих підвісках. Динамічна розрахункова схема такого будинку буде мати вигляд, показаний на рис. 1.

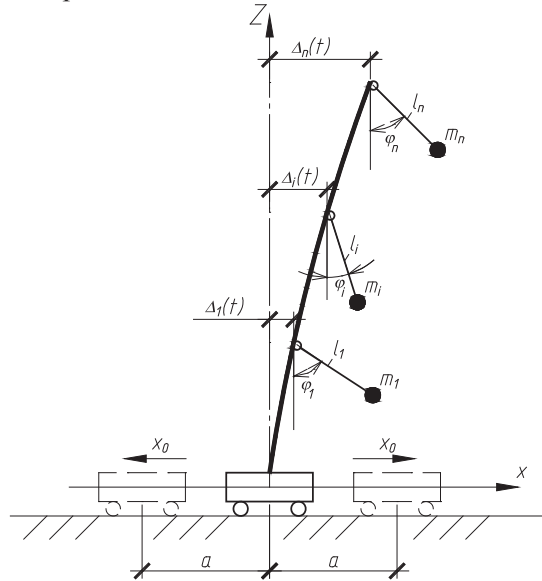


Рис. 1. Динамічна розрахункова схема будівлі з підвісними перекриттями

Нехай є n поверхів, які підвішені до несучої рами. Нехай також задано коливання опори (поверхні землі) за будь-яким законом (наприклад, за законом $X_0 = a \cdot \sin(p \cdot t)$), де a - амплітуда коливань, p - кругова частота, t - час. В результаті коливання в кожній масі m_i виникатиме сила інерції F_i . Причому ця сила прикладена і до самої маси, і (за принципом Даламбера) до точки підвісу маси. Переміщення Δ_i в точці підвісу кожної i -тої маси будуть залежати і від сили F_i , і від усіх сил F_k ($k=1 \dots n$), прикладених вище і нижче даної точки. Тоді переміщення Δ_i відповідно до правила будівельної механіки з визначення переміщень [3] дорівнюватиме:

$$\Delta_i = \delta_{i,1} F_1 + \delta_{i,2} F_2 + \dots + \delta_{i,i} F_i + \dots + \delta_{i,n} F_n \quad (1)$$

де $\delta_{i,k}$ - переміщення в точці від одиничної сили, яка прикладена в точці k . Сила інерції F_i , прикладена до кожної маси, як відомо, дорівнює:

$$F_i = m_i w_i \quad (2)$$

де w_i – прискорення маси m_i . Це прискорення визначається як друга похідна за часом від повного переміщення маси m_i (в нашому випадку в напрямку осі X). Повне переміщення маси m_i складається з переміщення фундаменту X_0 , переміщення від згину консолі Δ_i і переміщення від відхилення від вертикалі нитки, на якій підвішена маса m_i . Тоді прискорення i -тій маси визначиться за формулою:

$$w_i = X_0'' + \Delta_i'' + l_i (\sin \varphi_i)'' \quad (3)$$

де двома вертикальними рисками зверху позначена друга похідна за часом t .

Підставляючи (3) і (2) в вираз (1) і привівши подібні, отримаємо типовий рядок системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \Delta_i = & (\delta_{i1}m_1 + \dots + \delta_{ii}m_i + \dots + \delta_{in}m_n)X_0'' + \delta_{i1}m_1\Delta_1'' + \\ & + \delta_{i2}m_2\Delta_2'' + \dots + \delta_{ii}m_i\Delta_i'' + \dots + \delta_{in}m_n\Delta_n'' + \delta_{i1}m_1l_1(\sin \varphi_1)'' + (4) \\ & + \dots + \delta_{ii}m_i l_i (\sin \varphi_i)'' + \dots + \delta_{in}m_n l_n (\sin \varphi_n)'' \end{aligned}$$

Система (4) містить n диференціальних рівнянь. Однак число невідомих функцій дорівнює $2 \cdot n$. Відсутню групу рівнянь отримаємо, використовуючи принцип Даламбера. Для цього розглянемо рівновагу кожної i -тої маси (рис.2).

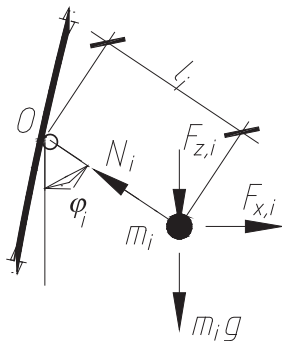


Рис. 2. Схема динамічної рівноваги i -тої маси

На розглянуту масу m_i діє сила натягу нитки підвісу N_i , сила тяжіння $m_i \cdot g$, сила інерції в горизонтальному напрямку F_{xi} і сила інерції в вертикальному напрямку F_{zi} . З рівняння рівності суми моментів відносно точки підвісу O , легко отримати:

$$m_i g l_i \sin \varphi_i - F_{xi} l_i \cos \varphi_i + F_{zi} l_i \sin \varphi_i = 0 \quad (5)$$

Підставляючи в (5) вирази (2) з врахуванням (3), скорочуючи на $l_i m_i$, отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta_i'' \cos \varphi_i + l_i \cos \varphi_i (\sin \varphi_i)'' + l_i \sin \varphi_i (\cos \varphi_i)'' - \\ - g \cdot \sin \varphi_i + \cos \varphi_i X_0'' = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Кількість рівнянь (6) також дорівнює n , тому що ці рівняння складаються для всіх n мас системи. Таким чином, система рівнянь (4) і (6) є системою диференціальних рівнянь для визначення всіх невідомих функцій $\Delta_i(t)$ та $\varphi_i(t)$ ($i=1\dots n$). Чисельне рішення цієї системи диференціальних рівнянь в принципі не викликає труднощів.

Зауважимо, що у рівнянні (1) (відповідно і у системі (4)) не є присутньою вертикальна складова F_{zi} сили інерції. Це пов'язано з фактом, що на горизонтальні переміщення Δ_i (див. рис. 1) ця сила не впливає. А у рівнянні (5) є присутніми і вертикальна, і горизонтальна сили інерції.

Врахування вертикальної складової сили інерції не призводить до збільшення числа функціональних невідомих, тому що вертикальна сила інерції $F_{z,i}(t)$ також залежить від невідомого кута $\varphi_i(t)$.

Якщо розглянути одноповерхову будівлю, то система рівнянь (4) та (6) буде мати вигляд:

$$(m)\Delta'' + m_2 l \varphi'' \cos \varphi - m_2 l (\varphi')^2 \sin \varphi - m p^2 a \cdot \sin pt + kx = 0 \quad (7)$$

$$\Delta'' \cos \varphi + l \cdot \varphi'' - a \cdot p^2 \sin pt \cdot \cos \varphi + g \cdot \sin \varphi = 0$$

де $m=m_1+m_2$; k – коефіцієнт жорсткості стійки (консолі).

Система (7) повністю співпадає з системою рівнянь, яка отримана з застосуванням рівнянь Лагранжа другого роду [6, 8], що є підтвердженням правильності запропонованого у цій статті методу розрахунку.

Розглянемо тепер різницю зусиль у будівля за консольною (традиційною) схемою та будівлі з підвішеним перекриттям на прикладі одноповерхового будинку. Динамічні розрахункові схеми по обох варіантах наведені на рис. 3.

Розрахунок за схемою рис. 3, а здійснено з рішення системи рівнянь (7), розрахунок за схемою рис. 3, б – за відомим методом будівельної механіки [3]. В схемі за рис. 3, а сумарна маса перекриття m розділена на m_1 – масу конструкцій, на яких підвішене перекриття, та на масу m_2 – власне самого перекриття. В схемі за рис. 3, б вся маса перекриття зосереджена в кінці консолю: $m=m_1+m_2$.

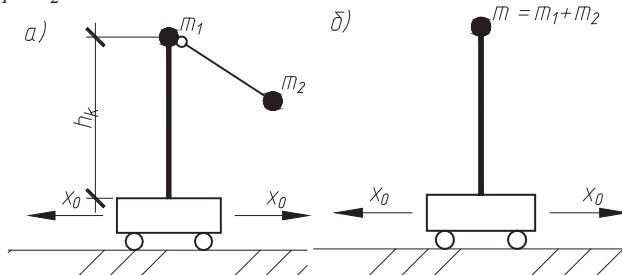


Рис. 3. Динамічні розрахункові схеми для одноповерхової будівлі.
а) – з підвішеним перекриттям; б) – консольна (традиційна) схема

В таблиці 1 наведено результати порівняльного розрахунку при

варіюванні величин маси m_1 та m_2 , довжини нитки підвісу перекриття l та жорсткості стійки(умовний прямокутний переріз $b \times h$), висота якої h_k прийнята рівною 3 м. Амплітуда коливань основи прийнята $a=0.036$ м, кругова частота $p=14.4$ рад/с.

Таблиця 1

Порівняння сил інерції для одноповерхової будівлі

№	$b \times h$ (мм)	m_1 (кг)	m_2 (кг)	l (м)	Максимальна сила інерції F (кН)		
					Підвісна схема F_p	Консоль- на схема F_k	F_k/F_p
1	400x400	2000	2000	1	21,4	47	2,19
2	400x400	10	3990	1	6,85	47	6,86
3	560x560	100	17900	1	30,7	222	7,23
4	560x560	100	17900	0,5	47,6	222	4,66
5	560x560	6400	18000	0,5	97,2	222	2,28
6	560x560	6400	36000	0,5	137	619	4,52
$a=0.012$ м; $p=17.3$ рад/с							
7	560x560	6400	18000	0,5	52,8	411,5	7,79
8	560x560	6400	18000	0,25	58,7	411,5	7,01

З таблиці 1 можна бачити, що в системі з підвішеним перекриттям зусилля в декілька разів менші ніж зусилля в консольній схемі, що говорить про суттєві переваги запропонованої конструктивної схеми.

Величина амплітуди коливань $a=0.036$ м прийнята за даними [9] як середнє значення для землетрусу в 9 балів. А частота коливань прийнята з умови максимального прискорення для землетрусу такої ж інтенсивності. Слід зазначити, що при одному і тому ж значенні прискорення частота коливань буде змінюватися в залежності від прийнятої максимальної амплітуди. Це видно з виразу прискорення $w=a \cdot p^2 \cdot \sin(p \cdot t)$, звідки не важко отримати частоту, відповідну максимуму прискорення $p=(w/a)^{(1/2)}$. Для системи з підвішеними перекриттями цей факт має важливе значення, і тому такі будівлі повинні бути розраховані на різне поєднання прискорень, амплітуд і частот. Так, при однаковій величині прискорення w чим більше величина амплітуди a з відповідним зменшенням частоти p , сила інерції F збільшується. Цей факт підтверджує спостереження [10], де показано, що не тільки величина прискорення впливає на руйнівні властивості землетрусів. Так, в [10] показано, що при одному з землетрусів прискорення ґрунту сягало 418 см/с^2 , але пошкодження споруд були помірними, і навпаки, відомі випадки сильних руйнувань при відносно невеликих прискореннях. У запропонованій схемі будинку можна підібрати такі параметри співвідношення мас, жорсткостей та ін., щоб отримати мінімальні сумарні значення сейсмічних сил.

Може бути запропонована також схема, коли одні поверхи будівлі (споруди) підвішені, а інші - жорстко пов'язані з несучою рамою. Така схема може бути більш ефективною з точки зору сейсмічної захисту, проте ця ефективність має бути перевірена чисельно. Динамічна розрахункова схема в такому випадку (на прикладі чотириповерхової будівлі) буде мати вигляд, представлений на рис. 4.

Кількість невідомих в динамічній схемі, яка показана на рис. 4, дорівнюватиме $(2 \cdot m + k) < 2 \cdot n$, де m - число підвішених перекриттів, k - кількість жорстко закріплених перекриттів, n - загальна кількість перекриттів (кількість поверхів). І суть розрахунку буде абсолютно аналогічна представлений вище методиці.

Висновки та перспективи досліджень. Перевагою запропонованої авторами раніше і розвиненої в цій статті підвісній будівлі є факт суттєвого зменшення сейсмічних сил. Виведено систему диференціальних рівнянь, рішення якої дозволяє визначити невідомі переміщення, після визначення яких не складно визначити зусилля, діючі на несучі конструкції будівлі. Запропонована методика динамічного розрахунку системи дозволяє досить просто отримати рівняння руху системи.

У перспективі передбачається дослідження можливості спрощення чисельної реалізації рішення системи диференціальних рівнянь (4) і (6), а також порівняння схеми з підвішеними окремо поверхами і схеми з поверхами, пов'язаними між собою гнучкими підвісками для багатоповерхової будівлі.

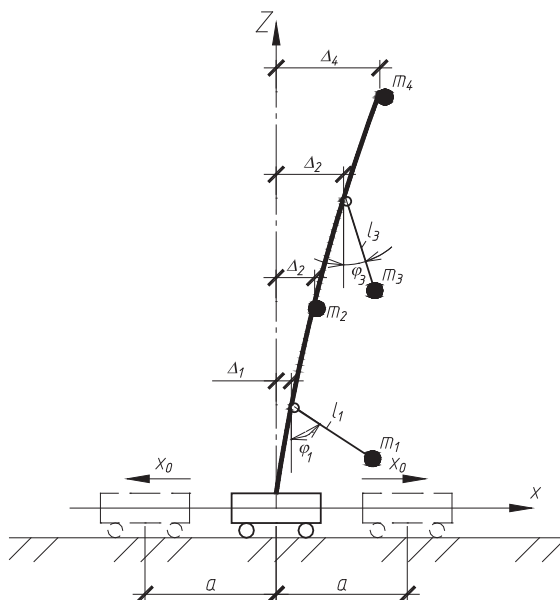


Рис. 4. Динамічна розрахункова схема для чотириповерхової будівлі

1. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. – М.: Стройиздат, 1976. – 229 с.
AAizenberh Ya.M. Sooruzheniya s vykliuchaiushchymysiasviaziamy dlia seismycheskykhraionov. – М.: Stroiizdat, 1976. – 229 s.
2. Савин Г.Н. Теоретическая механика – Киев: Гостехиздат, 1963. – 610 с.
Savyn H.N. Teoretycheskaiaimekhanika –Kyev: Hostekhyzdat, 1963. – 610 s.
3. Смирнов А.Ф. и др. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений. – М.: Стройиздат, 1984. – 416 с.
Smyrnov A.F. y dr. Stroytelnaiaimekhanika. Dynamyka y ustoichyvosťsooruzheniy. – М.: Stroiizdat, 1984. – 416 s.
4. Смирнов В.И. Применение сейсмоизоляции зданий и исторических сооружений в России // Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 60. - К.: НДІБК, 2004. – С. 210-217.
Smyrnov V.Y. Prymenenyeseismoizoliatsyyzdanyi y ystorycheskykhsooruzheniy v Rossyy // Budivelnikonstruksii. Mizhvidomchyinukovo-tekhnichnyizbirnyk. Vyp. 60. - K.: NDIBK, 2004. – S. 210-217.
5. Смирнов В.И. Сейсмоизоляция зданий и сооружений// Промышленное и гражданское строительство, 1997, № 12. – С. 37-39.
Smyrnov V.Y. Seismoizoliatsiyazdanyi y sooruzheniy // Promyshlennoe y hrazhdanskoestroytelstvo, 1997, № 12. – S. 37-39.
6. Азизов Т.Н., Кочкаръов Д.В., Мельник О.С. Инновационный демпфер багатоперехової будівлі // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Збірник наукових праць. Вип. 11. Луцьк, 2019. – С. 12-20. .
Azizov T.N., Kochkarov D.V., Melnyk O.S. Innovatsiyniy dempfer bahatopoverkhovoi budivli // Suchasni tekhnohohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. Zbirnyk naukovykh prats. Vyp. 11. Lutsk, 2019. – S. 12-20.
7. Azizov T.N. Calculation of a Multi-Storey Building With Suspended Floors// Sciences of Europe. – Vol 1, № 70(2021). – P. 63-68..
8. Азизов Т.Н. Уточненная расчетная схема подвешенного здания// Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип. 34. – Рівне: Нац. ун-т водного господарства та природокористування, 2017. – С. 167-175.
Azyzov T.N. Utochnennaia raschetnaia skhema podvesnoho zdanyia// Resursoekonomniamaterialy, konstruksii, budivli ta sporudy. Vyp. 34. – Rivne: Nats. un-t vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia, 2017. – S. 167-175.
9. Немчинов Ю.И. Сейсмостойкость зданий и сооружений. – Киев, 2008. – 480 с.
Nemchnov Yu.Y. Seismostoikostzdanyi y sooruzheniy. – Kyev, 2008. – 480 s.
10. Бирбаер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. –СПБ: Наука, 1998.–225 с.
Byrbaer A.N. Raschetkonstruksiyinaseismoistoikost. – SPB: Nauka, 1998. – 225 s.