

**О.В. УСТИНЕНКО, Р.В. ПРОТАСОВ, К.О. МЕРЕЦЬКА, А.М. КОБА**

### **ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА ПРИ ДІЇ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ**

В ході роботи були досліджені напружено-деформований стан та власні коливання сонячного колектора. Проаналізовані найпоширеніші види сонячних колекторів та їх актуальність на теперішній час. Приведений опис та аналіз застосованих програмних продуктів з метою виявлення їх відповідності для виконання даної роботи. Побудовано просторову модель дискового сонячного колектору, на основі якої був проведений аналіз конструкції. У результаті отримані величини переміщень, напружень та власних коливань конструкції для різних кутів нахилу до горизонту. Виявлені слабкі місця конструкції для подальшої модернізації. Запропоновані шляхи усунення виявлених конструктивних недоліків.

**Ключові слова:** метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, системи автоматизованого проектування, сонячний колектор, власні коливання.

**А.В. УСТИНЕНКО, Р.В. ПРОТАСОВ, К.А. МЕРЕЦКАЯ, А.М. КОБА**

### **ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНСТРУКЦИИ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ**

В ходе работы были исследованы напряженно-деформированное состояние и собственные колебания солнечного коллектора. Проанализированы самые распространенные виды солнечных коллекторов и их актуальность в настоящее время. Приведено описание и анализ примененных программных продуктов с целью выявления их соответствия для выполнения данной работы. Построена пространственная модель дискового солнечного коллектора, на основе которой был проведен анализ конструкции. В результате получены величины перемещений, напряжений и собственных колебаний конструкции для различных углов наклона к горизонту. Выявлены слабые места конструкции для дальнейшей модернизации. Предложены пути устранения выявленных конструктивных недостатков.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, системы автоматизированного проектирования, солнечный коллектор, собственные колебания

**A. USTYNENKO, R. PROTASOV, K. MERETSKA, A. KOBA**

### **EFFICIENCY PARAMETER ESTIMATION OF SOLAR COLLECTOR DESIGN UNDER ACTION OF EXTERNAL FACTORS**

The stress-strain state and natural vibrations of the solar collector were investigated in this work. The most common types of solar collectors and their relevance are analyzed at present. The resulted description and analysis of applied software products are given for the purpose of revealing their conformity to perform this work. The spatial model of the disk solar collector was constructed, on the basis of which the analysis of the design was carried out. As a result, the values of displacements, tensions and internal fluctuations of the design for different angles of inclination to the horizon are obtained. The design weaknesses for further modernization are revealed. The ways of elimination of identified structural defects are proposed

**Keywords:** finite element method, stress-strain state, CAD-systems, solar collector, natural vibrations

**Вступ.** Більшість енергетичних ресурсів нашої планети є обмеженими. Більш того, багато з них вже досягли своєї межі. Ось чому все більшої популярності набувають альтернативні джерела енергії, лідируючу позицію серед яких впевнено займає сонце. Завдяки йому ми щомігті отримуємо понад 85 трильйонів кВт, причому безкоштовно.

Енергія сонця є одним із найбільш доступних і перспективних поновлюваних джерел енергії. Зростання інтересу до використання саме цього виду енергії обумовлений, з одного боку, постійним зростанням цін на органічне паливо, зокрема, на природний газ і нафту, з іншого – постійно набирає вагомості рух за охорону навколишнього середовища. Важливим фактором є і свого роду мода у світі на використання поновлюваних джерел енергії, яка, як можна констатувати, дійшла і до України.

Сонячний водонагрівач – різновид сонячного колектору. Призначений для виробництва гарячої води шляхом поглинання сонячного випромінювання, перетворення його в тепло, акумуляції та передачі споживачеві. Ці нові конструкції потребують дослідження напружено-деформованого стану (НДС) і власних коливань.

Означені аспекти стали змістом цієї роботи.

**Аналіз конструкцій та методів досліджень.** Задіявши сонячну енергію для нагрівання води, в 1767 р. швейцарський ботанік Орас Бенедикт де Сосюр створив перший сонячний водонагрівач, який за своєю потужністю давав можливість приготувати суп.

Сонячний колектор (СК) – пристрій для збору теплової енергії Сонця (геліоустановка) [1], яку переносять видимим світлом і ближнім інфрачервоним випромінюванням. На відміну від сонячних батарей, які виробляють безпосередньо електрику, сонячний колектор здійснює нагрівання матеріалу-теплоносія.

Сучасний тип водонагрівачів був створений у 1953 р. в Ізраїлі інженером Леви-Іссар і вдосконалений доктором Цві-Тавор у 1955 р., за що останній отримав через 3 роки премію у 1000 ізраїльських лір від прем'єр-міністра країни Давида Бен-Гуріона.

На поточний момент сонячні колектори використовуються для гарячого водопостачання в основному приватних житлових будинків. Експлуатація побутового сонячного водонагрівача дає можливість скоротити викиди CO<sub>2</sub> пропорційно кількості зекономленого палива [1]. Крім того, у цьому випадку скорочується парниковий ефект від викидів вуглекислого газу. Загальноприйнятій у розвинених країнах потенціал використання сонячних колекторів становить 1 м<sup>2</sup> на людину. Сонячне гаряче водопостачання у світі розвивається дуже інтенсивними темпами. Такі країни, як Греція та Ізраїль, давно досягли цього рівня. Це не дивно, тому що в умовах жаркого сонячного клімату енергія сонця може покривати до 100 % витрат на приготування гарячої води. Що ж стосується обсягів впровадження, тут безумовним лідером є Китай. У 2007 р. в Китаї сонячними водонагрівачами користувалися близько 40 млн. сімей

© О.В. Устиненко, Р.В. Протасов, К.О. Мерецька, А.М. Коба, 2019

загальною чисельністю у 150 млн. чоловік. До 2020 р. 300 млн. м<sup>2</sup> приміщень у Китаї буде обладнано сонячними водонагрівачами. У Європі лідерами із впровадження сонячних колекторів є Німеччина, Швеція, Австрія, Швейцарія. За своїми кліматичними умовами Україна належить до територій із середньою інтенсивністю сонячної радіації.

Для проведення дослідження сонячних колекторів використовувалися такі програмні продукти як SolidWorks та SiemensFemap. SolidWorks – програмний комплекс САПР для автоматизації робіт промислового підприємства на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва [2]. Забезпечує розробку виробів будь-якого ступеня складності і призначення. Працює в середовищі Microsoft Windows. Розроблено компанією SolidWorks Corporation, створеної з нуля Джоном Хірштіком.

Femap є всесвітньо відомим і визнаним у багатьох областях промисловості інструментом для проведення ефективного скінченно-елементного (СЕ) моделювання з широкими можливостями. Використання Femap with NX Nastran, а також додаткових модулів і розв'язувачів дає можливість істотно знизити кількість натурних випробувань виробів і замінити їх віртуальними чисельними експериментами [3].

Для розв'язання завдань механіки деформованого твердого тіла, механіки рідин і газів, механіки теплопереносу у Femap як базовий використовується метод скінченних елементів (МСЕ). Застосування МСЕ вимагає створення математичної та дискретної (скінченно-елементної) моделі. Femap надає необхідний набір інструментів для побудови СЕ сіток на основі вихідної геометрії, прямого створення і редагування розрахункової сітки, роботи з геометричними даними, створення розрахункової моделі, обробки і аналізу отриманих результатів. Велике значення має якість СЕ моделі (сітки). Якщо сітка буде низької якості (великі елементи), то можна не отримати збіжності або вірний результат при розв'язанні. Але при цьому висока ступінь дискретизації моделі повинна бути виправдана метою.

**Мета та постановка завдання.** Метою роботи є дослідження працездатності сонячного колектору під дією зовнішніх факторів для подальшого удосконалення конструкції за рахунок її зміцнення або зменшення собівартості.

**Матеріали досліджень.** Усі сонячні колектори умовно ділять на плоскі (плоскопанельні) та вакуумні. Крім того, є ще такі типи сонячних колекторів: сонячні колектори-концентратори, сонячні башти, параболічні концентратори. Проте для домашніх умов вони не підходять через високу вартість [4]. Діскові сонячні колектори, або, як їх ще називають, сонячні тарілки Стірлінга, зазвичай представляють собою дзеркальну структуру висотою 38 або 40 футів, яка виглядає як великий блискучий супутниковий ресивер. Дісковий сонячний колектор – на рис. 1.

Блюдо фокусує сонячні промені на двигуні Стірлінга, нагріваючи водневий газ, і підвищений тиск в нагрітому циліндрі натискає на силовий поршень. Рух поршня повертає колінчастий вал, який здійснює роботу. У

конструкції двигуна використовуються матеріали з низькими коефіцієнтами тертя, а деякі конструкції повністю виключають ковзання шляхом використанням діафрагм замість поршнів [5].

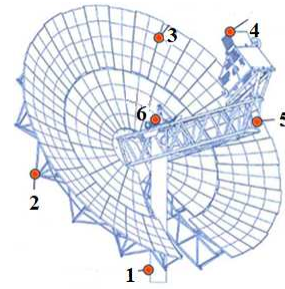


Рисунок 1 – Дісковий сонячний колектор:  
1 – опора; 2 – передня структура підтримки дзеркал;  
3 – дзеркальні ферми; 4 – двигун Стірлінга;  
5 – сталеві конструкції для підтримки двигуна Стірлінга;  
6 – пристрої відстеження Сонця

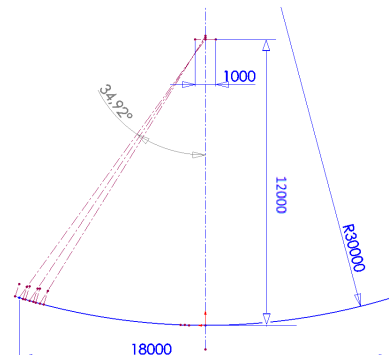


Рисунок 2 – Початкова геометрія дзеркала

У цій роботі було побудоване дзеркало та поперечна ферма, яка спирається на опору. Як геометричні вихідні дані для побудови дзеркала були використані наступні параметри: потужність двигуна Стірлінга становить 28 кВт; ККД двигуна Стірлінга – 35 %; відстань від дзеркала до теплоприймача двигуна – не більше 12 м. З огляду на ці дані було побудовано дзеркало з діаметром 18 м та кривизною 30 м (рис. 2).

Для можливості зміни кута нахилу дзеркала відносно горизонту та зменшення навантаження на опору колектора силову структуру дзеркала закріплено близько до його геометричного центру. Для розрахунку використовували вуглецеву сталь марки Ст.3.

**Розрахунок напружено-деформованого стану.** Напружено-деформований стан (НДС) конструкції – сукупність внутрішніх напружень і деформацій, що виникають при дії на неї зовнішніх навантажень, температурних полів та інших факторів. НДС визначається розрахунковими і експериментальними методами у вигляді розподілу напружень, деформацій і переміщень в конструкції і є підставою для оцінки статичної міцності та ресурсу конструкції на всіх етапах життєвого циклу різноманітних виробів. При розрахунках НДС певним чином ідеалізується розрахункова схема. Розрізняють загальний і місцевий напружено-деформований стан: загальний визначається в силових елементах конструкції без урахування концентрації напружень, викли-

каних місцевими конструктивно-технологічними особливостями, а місцевий – поблизу концентратора напружень із урахуванням виду концентратора і прикладеного навантаження. При розрахунковому методі дослідження місцевого НДС вид навантаження може бути визначений з попереднього розрахунку загального НДС. Місцевий напружено-деформований стан – розподіл напружень у перетині отвору. У разі лінійної пружності матеріалу і малості переміщень (при лінійному НДС) розрахунок конструкції можна здійснювати на поодинокі випадки навантаження. Результати розрахунку НДС повинні підтверджуватися експериментально.

Сукупність напружень повністю характеризує напружений стан частинки тіла. Цю сукупність записують в вигляді тензора напружень.

Тензор напружень (тензор напружень Коші) – тензор другого рангу, який складається з дев'яти величин, які є механічними напруженнями у довільній точці навантаженого тіла. Ці дев'ять величин записуються у вигляді таблиці, в якій на головній діагоналі стоять нормальні напруження у трьох взаємно перпендикулярних осях, а у рештах позицій – дотичні напруження, які діють на трьох взаємно перпендикулярних площинах.

Компоненти тензора напружень  $\sigma_{ij}$  у декартовій системі координат  $Ox_i$  вводять наступним чином. Розглядають нескінченно малий об'єм тіла (суцільного середовища) у вигляді прямокутного паралелепіпеда, грані якого ортогональні координатним осям і мають площу  $dS_i$ . На кожній грані  $dS_i$  паралелепіпеда діють поверхневі сили  $dF_i$ . Якщо позначити проекції цих сил на осі  $Ox_j$  як  $dF_{ij}$ , то компонентами тензора напружень називають відношення проекцій сили до величини площі грані, на якій діє ця сила:  $\sigma_{ij} = dF_{ij} / dS_i$ .

За відсутності власного моменту імпульсу суцільного середовища, а також об'ємних і поверхневих пар тензор напружень симетричний (так званий закон парності дотичних напружень), що є наслідком рівняння балансу моменту імпульсу.

Зокрема, тензор напружень симетричний у класичній теорії пружності та гідродинаміці ідеальної та лінійно-в'язкої рідин.

Основні види напружено-деформованого стану: розтягнення, стиск та плоский чистий зсув. При розтягненні і стисковій осьової деформації визначається законом Гука:  $\epsilon_z = \sigma_z / E$ , де  $E$  – модуль пружності першого роду або модуль Юнга, а  $\epsilon_z$ ,  $\sigma_z$  – деформації та напруження уздовж осі  $z$ .

При розтягненні і стисненні поперечні деформації визначаються законом Пуассона:  $\epsilon_z = \epsilon_y = -\mu \epsilon_x$ , де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона (величина відношення відносного поперечного стиску до відносного повздовжнього розтягнення). Цей коефіцієнт залежить не від розмірів тіла, а від природи матеріалу, з якого виготовлене тіло.

Результати розрахунку напружено-деформованого стану за методом скінченних елементів в різному положенні відносно горизонту проілюстровані на рис. 3–10 та наведені в табл. 1.

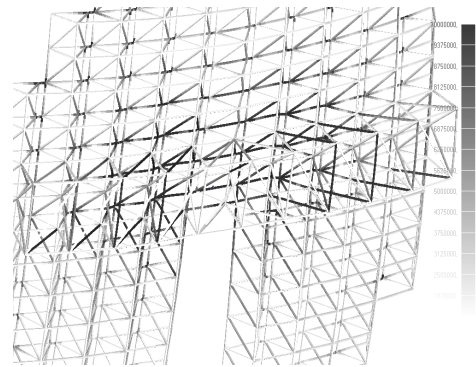


Рисунок 3 – Напруження у сонячному колекторі, розташованому горизонтально

Таблиця 1 – Результати НДС

Кут нахилу, °	Напруження, МПа	Переміщення, мм
45	119	12,9
90	66	5,6
0	113	12,9

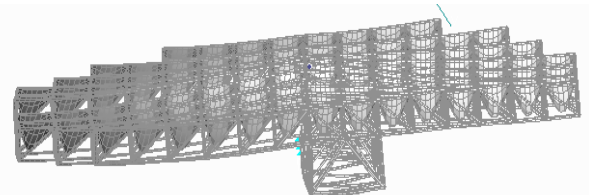


Рисунок 4 – Переміщення у сонячному колекторі, розташованому горизонтально

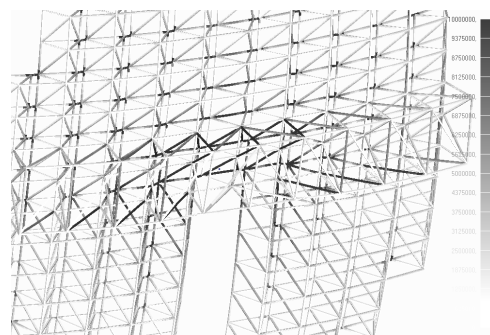


Рисунок 5 – Напруження у сонячному колекторі, розташованому під кутом

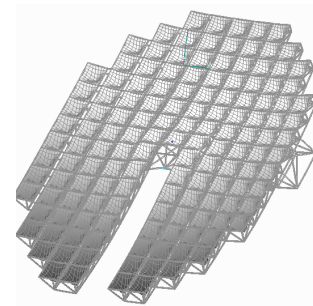


Рисунок 6 – Переміщення у сонячному колекторі, розташованому під кутом

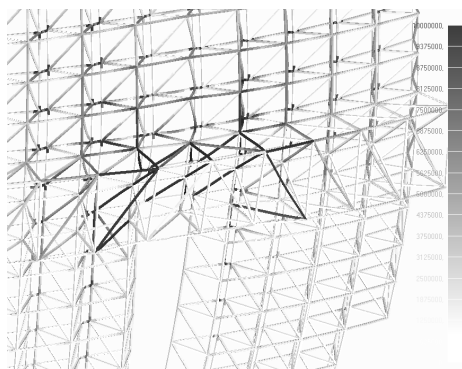


Рисунок 7 – Напруження у сонячному колекторі, розташованому вертикально

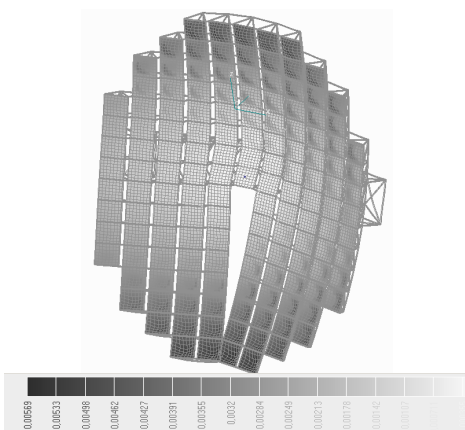


Рисунок 8 – Переміщення у сонячному колекторі, розташованому вертикально

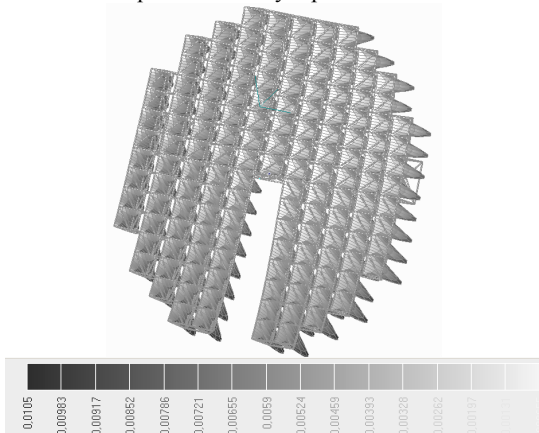


Рисунок 9 – Переміщення від дії сили вітру з товщиною дзеркала 2мм

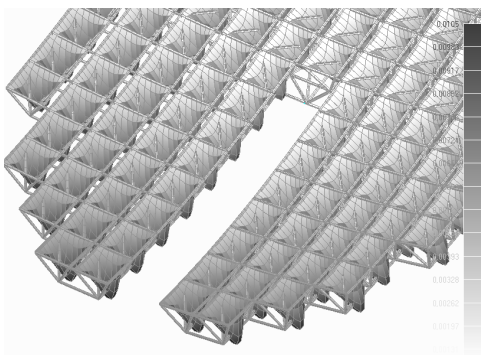


Рисунок 10 – Переміщення від дії сили вітру з товщиною дзеркала 2 мм

**Розрахунок власних частот.** Власними (вільними) коливаннями називаються коливання, які відбуваються в системі за відсутності змінних зовнішніх впливів і виникають внаслідок початкового відхилення одного з параметрів системи від стану рівноваги. У реальних макроскопічних системах через втрату енергії вільні коливання завжди затухають.

При малих відхиленнях від стану рівноваги рух системи задовольняє принципу суперпозиції, згідно з яким сума двох довільних рухів також становить допустимий рух системи; такі рухи описуються лінійними (зокрема, диференціальними) рівняннями. Якщо система ще й консервативна (в ній немає втрат або припливу енергії ззовні), а її параметри не змінюються в часі, то будь-яке власне коливання може бути однозначно представлено як сума нормальних коливань, синусоїдально змінюваних у часі з певними власними частотами. Якщо положення системи у будь-який час може бути описано єдиним параметром, то система має одну ступінь вільності.

Приклади таких систем: маятник, що коливається в заданій площині; маса, пов'язана з пружиною, LC-ланцюжок (рис. 11). Дійсно, положення маятника може бути визначено кутом відхилення нитки маятника від вертикалі  $\varphi$ . Для LC-ланцюжка таким параметром може служити величина заряду на ємності. Маятник, здатний коливатися у будь-якому напрямку подібно гирі, підвішеній на нитці, має два ступені вільності; потрібні дві координати, щоб задати його положення. Маятник у стінному годиннику закріплений так, що може гойдатися тільки в певній площині і тому має одну ступінь вільності.

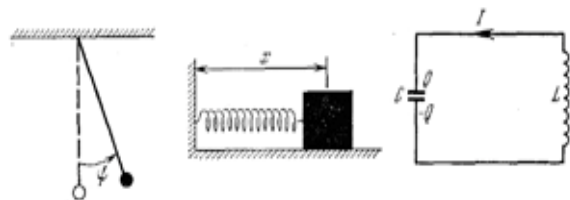


Рисунок 11 – Системи з одним ступенем свободи (вільності)

У природі існує безліч цікавих систем, що мають два ступені свободи. Найбільш красиві – приклади молекул і елементарних частинок (особливо нейтральних  $K$ -мезонів). Більш простими прикладами є подвійний маятник (один маятник підвішений до опори, а другий – до гирі першого маятника); два маятника, пов'язані пружиною; горизонтальна нитка з двома кульками; два пов'язані LC-ланцюги (рис. 12). Щоб описати стан таких систем, потрібні дві змінні. Наприклад, в разі сферичного маятника ці змінні – це положення маятника у двох взаємно перпендикулярних напрямках. У разі пов'язаних маятників ці змінні відповідають положенням кожного маятника; для двох пов'язаних LC-ланцюгів – це заряди на двох ємностях або струми в обох ланцюгах.

У загальному випадку рух системи з двома ступенями вільності може мати дуже складний вигляд, не схожий на простий гармонійний рух.

Для двох ступенів вільності і при лінійних рівнян-

нях руху найбільш загальний рух є суперпозицією двох незалежних простих гармонійних рухів, що відбуваються одночасно. Ці два простих гармонійних рухи називаються нормальними або власними коливаннями, або гармоніками, а також нормальними модами коливань або просто модами.

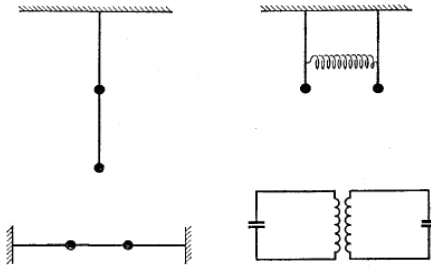


Рисунок 12 – Системи з двома ступенями свободи

У коливальних системах із зосередженими параметрами, що складаються з  $n$  зв'язаних осциляторів (наприклад ланцюжок із коливальних електричних контурів або із зв'язаних пружними пружинками кульок), існує  $n$  частот з  $n$  зв'язаних та  $n$  нормальних мод. У системах із розподіленими параметрами (струна, мембрана, полий або відкритий резонатор) таких коливань існує безліч. Наприклад, для струни із закріпленими кінцями довжиною  $L$  моди відрізняються числом напівхвиль, які можна укласти на всій довжині струни. Якщо швидкість поширення хвиль уздовж струни дорівнює  $v$ , то спектр власних частот визначиться формулою [6]:  $\omega_n = k_n \cdot v = n(\pi v / L)$ .

Наявність дисперсії хвиль ( $v = v(\omega)$ ) спотворює цей простий квазидистантний розподіл частот, спектр яких визначиться вже з дисперсійного рівняння.

У реальних системах власні коливання будуть затухати через втрати, тому їх можна вважати приблизно гармонійними лише в інтервалі часу, меншому  $1/\delta$ . Загасаюче коливання може бути представлено у вигляді пакету гармонійних коливань, які безперервно заповнюють інтервал частот ( $\omega_0 \pm \Delta\omega$ ) (інтеграл Фур'є), тим вужчим, ніж менше  $\delta$ . У цьому випадку мова йде про розширення спектральної лінії, що іноді характеризується її добротністю  $Q$ , яке дорівнює відношенню збереженої енергії  $W$  до втрат  $P$  за період коливань  $2\pi/\omega$ . Таким чином, згущення спектра через втрати тягне за собою перетворення дискретного спектра в суцільний, коли ширина ліній приблизно дорівнює інтервалу між ними.

Власні коливання нелінійних систем менш доступні для класифікації. Нелінійність систем із дискретним спектром власних частот призводить до перекачування енергії між спектральними компонентами: при цьому виникають процеси конкуренції мод – виживання одних і придушення інших. Дисперсії можуть стабілізувати ці процеси і призвести до формування стійких просторово-часових утворень, прикладами яких в системах з безперервним спектром є солітони.

Особливе значення при порушенні коливань має явище резонансу, що полягає у різкому збільшенні відгуку системи (амплітуди коливань) при наближенні частоти зовнішнього впливу до деякої резонансної час-

тоти, що характеризує систему. Якщо остання лінійна і параметри її не залежать від часу, то резонансні частоти збігаються із частотами її власних коливань, і відповідний відгук тим сильніше, чим вище добротність коливної системи. Розгойдування відбувається до тих пір, поки енергія, яку вносить ззовні (наприклад, при кожному відхиленні маятника), перевищує втрати за період осциляції. Для лінійних коливань енергія, що отримується від джерела, пропорційна першому ступеню амплітуди, а втрати зростають пропорційно її квадрату, тому баланс енергій завжди досяжний.

Кожна деталь має нескінченну кількість частот власних коливань, що утворюють спектр. Кожній частоті власних коливань відповідає своя форма коливань. Форма коливань визначається картиною знакозмінних зміщень або прогинів і положенням вузлових ліній. У вузлових лініях переміщення нескінченно малі і вважаються нульовими. По різні боки вузлових ліній переміщення ділянок, які коливаються, знаходяться у протифазі. Сукупність форм коливань деталі утворюють спектр форм. Спосіб кріплення деталі змінює спектр частот і форм коливань.

Розрахункова формула для визначення частот згинальних коливань балок має наступний вигляд:  $f = (a^2 / 2\pi l^2) \cdot (\sqrt{EI} / m)$ , де  $l$  – довжина балки,  $EI$  – жорсткість балки на вигин,  $m$  – погонна маса балки, а  $a$  – розрахунковий коефіцієнт.

На рис. 13–15 наведені форми згинальних коливань балки при різних способах кріплення [6]. Значення частот власних коливань однієї і тієї ж балки при різних способах кріплення і різних формах залежать тільки від розрахункового коефіцієнта.



Рисунок 13 – Консольна балка



Рисунок 14 – Балка з опертими кінцями

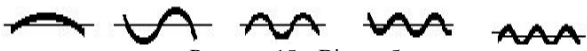



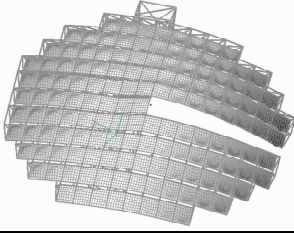

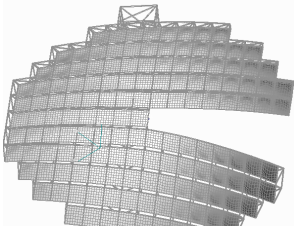
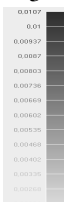
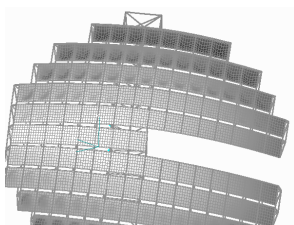

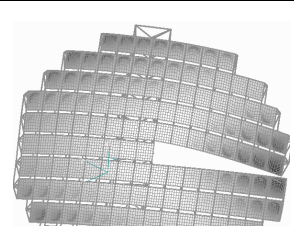
Рисунок 15 – Вільна балка

У табл. 2 відображені форми коливань, що виникають у СК, розташованому горизонтально під дією сили тяжіння (вони розраховані за допомогою МСЕ [6]), а у табл. 3 наведені десять форм коливань та їх відповідні частоти.

Таблиця 2 – Результати розрахунку власних частот коливань

Номер частоти	Частота, Гц	Номер частоти	Частота, Гц
1	4,5	6	9,53
2	4,72	7	9,93
3	5,6	8	12,7
4	7,1	9	13
5	8,05	10	13,07

Таблиця 3 – Форми коливань, що виникають у СК, розташованому горизонтально під дією сили тяжіння

Форми коливань	Вид форми коливань
<p>1</p> 	
<p>2</p> 	
<p>3</p> 	
<p>4</p> 	

На рис. 18–19 відображені третя та четверта форми коливань, що виникають у СК, розташованому горизонтально, під дією сили тяжіння.

**Висновки.** Аналіз розрахунку напружено-деформованого стану показав, що при використанні металевих дзеркал товщиною 2 мм спостерігається значна деформація від вітрового навантаження та від окремих положень дзеркального диска. При дії вітру максимально напружені елементи конструкції – поперечна ферма у місці її кріплення до опори та крайні елементи дзеркала. Але для випадку, коли швидкість вітру становитиме 30 м/с, найбільш важливим є міцність всієї конструкції. Тому пропонується використовувати профілі із більшою площею перетину, ніж у дзеркалі. Аналіз розрахунку власних частот показав низькі значення перших двох, які менше 10 Гц. Це дозволяє зробити висновок про нечутливість до резонансу.

#### Список літератури

1. Плячкова С.Г., Плячков І.В., Дунаєвська Н.І. та інш. *Електроенергетика та охорона навколишнього середовища*. Київ: Українські енциклопедичні знання, 2012. 441 с.
2. Сотников Н.Н., Козарь Д.М. *Основы моделирования в SOLIDWORKS*: учеб. пособ. Москва: НИТТУ, 2013. 129 с.
3. Рычков С. П. *Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran* : [для Windows XP/Vista/7]. Москва: ДМК Пресс, 2016. 783 с.
4. Алмаев А.Ю., Лукшин И.А. Преимущества и недостатки плоских и вакуумных коллекторов солнечной энергии. *Вестник НГТУ*. 2015. №6 (49). С. 16–20.
5. William B. Stine, Richard B. *Diver A compendium of solar dish/stirling technology*. 1994. 451 p.
6. *МКЭ. Основы* / под ред. Н.В. Бондарчука; пер. с англ. Москва: Мир, 1984. 428 с.

#### References (transliterated)

1. Plachkova S.G., Plachkov I.V., Dunaevska N.I. et al. *Elektro-energetika ta ohorona navkolishn'ogo seredovishcha*. Kyiv: Ukraïns'ki encyklopedichni znannya, 2012. 441 p.
2. Sotnikov N.N., Kozar' D.M. *Osnovy modelirovaniya v SOLID-WORKS: ucheb. posob.* Moscow: NITPU, 2013. 129 p.
3. Rychkov S. P. *Modelirovanie konstrukcij v srede Femap with NX Nastran* : [dlya Windows XP/Vista/7]. Moscow: DMK Press, 2016. 783 p.
4. Almaev A.YU., Lukshin I.A. Preimushchestva i nedostatki plo-skikh i vakuumnyh kollektorov solnechnoj ehnergii. *Vestnik NGIEHI*. 2015, no. 6 (49), pp. 16–20.
5. William B. Stine, Richard B. *Diver A compendium of solar dish/stirling technology*. 1994. 451 p.
6. *MKE. Osnovy* / pod red. N.V. Bondarchuka; per. s angl. Moscow: Mir, 1984. 428 p.

Надійшла (received) 22.11.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Устиненко Олександр Віталійович (Устиненко Александр Витальевич, Ustynenko Oleksandr)** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; <https://orcid.org/0000-0002-6714-6122>; e-mail: [ustin1964@tmm-sapr.org](mailto:ustin1964@tmm-sapr.org)

**Протасов Роман Васильович (Протасов Роман Васильевич, Protasov Roman)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (057) 707-64-78; e-mail: [protasov@tmm-sapr.org](mailto:protasov@tmm-sapr.org).

**Мерецька Кароліна Олександрівна (Мерецкая Каролина Александровна, Meretska Karolina)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка гр. 2МІТ212п.8(ТМ-846), м. Харків, Україна. тел.: 099-38-43-924; e-mail: [BaseeK24@gmail.com](mailto:BaseeK24@gmail.com)

**Коба Андрій Миколайович (Коба Андрей Николаевич, Koba Andriy)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент гр. 2МІТ212п.8(ТМ-846), м. Харків, Україна