

## СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНА МОДЕЛЬ МІКРОСУПУТНИКА ТА МОДАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЙОГО КОНСТРУКЦІЇ

### Вступ

Під час виведення на орбіту супутник знаходиться під дією великої кількості зовнішніх навантажень різноманітної природи, які сприймає від ракети-носія. Ці навантаження діють на нього протягом декількох хвилин від моменту старту до моменту виводу супутника на орбіту.

Одним із ефективних методів аналізу конструкції космічного апарату під дією зовнішніх навантажень є метод скінченних елементів (МСЕ) [1].

Статичний аналіз конструкцій під впливом зовнішнього навантаження з використанням МСЕ є світовим стандартом для розрахунків на міцність та інших видів розрахунків. Це пов'язано з універсальністю МСЕ, що дозволяє єдиним способом розраховувати різноманітні конструкції за різними властивостями матеріалів [1].

Основними типами скінчених елементів є одномірні, двомірні та об'ємні скінчені елементи [2].

Якщо є тривимірна модель об'єкту дослідження, створена за допомогою системи автоматизованого проектування (САПР), то найпростіше створити розрахункову модель, використовуючи об'ємні скінченні елементи [3]. Однак використання об'ємних скінчених елементів дає низьку точність розрахунків, потребує великих ресурсів обчислювальної техніки та великих затрат часу [3].

Скінченно-елементна модель, створена на основі одномірних та двомірних скінчених елементів, дозволяє проводити розрахунки із більшою точністю і суттєво меншими затратами часу, але отримати збіжність результатів при моделюванні всіх елементів будь-якої конструкції, у тому числі і супутників, практично неможливо [3].

Динамічний аналіз складних конструкцій математичними методами або практично неможливий, або потребує багато часу [4]. Час можна скоротити, якщо використовувати МСЕ при динамічному аналізі конструкції.

При модальному аналізі конструкції не можна знехтувати окремими елементами, оскільки їх маси та розміщення у силовому каркасі впливають на частоти власних коливань конструктивних елементів каркасу супутника [5].

### Постановка задачі

Метою роботи є модальний аналіз конструкції силового каркасу мікросупутника (МС).

### Модальний аналіз конструкції силового каркасу МС

При розв'язанні поставленої задачі за прототип було прийнято МС «МС-КПІ», загальний вигляд якого зображено у розкритому стані на рис. 1 та у складеному стані на рис. 2.

Найменування елементів МС, яким відповідають позначення на рис. 1 та рис. 2, приведені у табл.1. Загальні розміри МС приведено у табл.2.

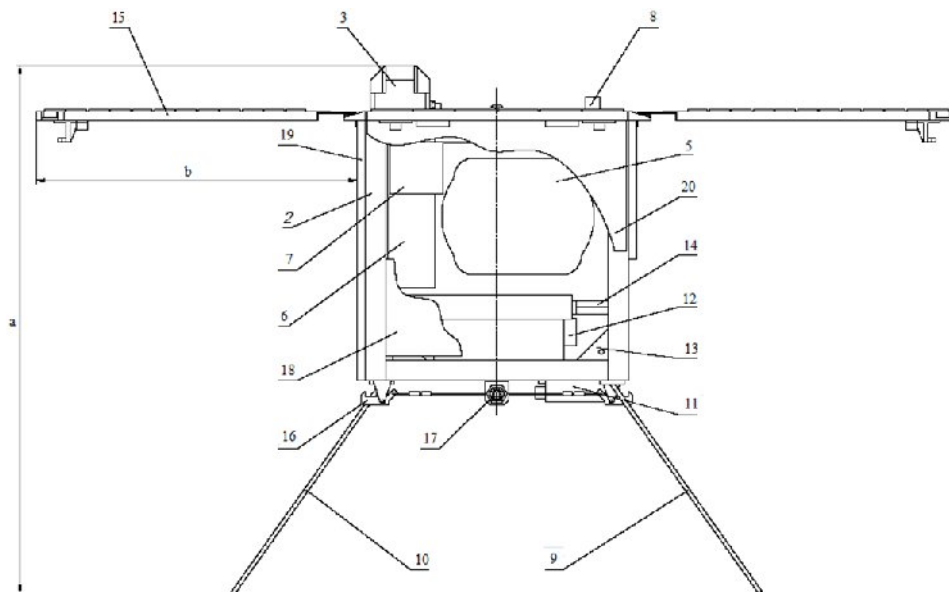


Рис. 1. МС «МС-КПІ» у розкритому стані

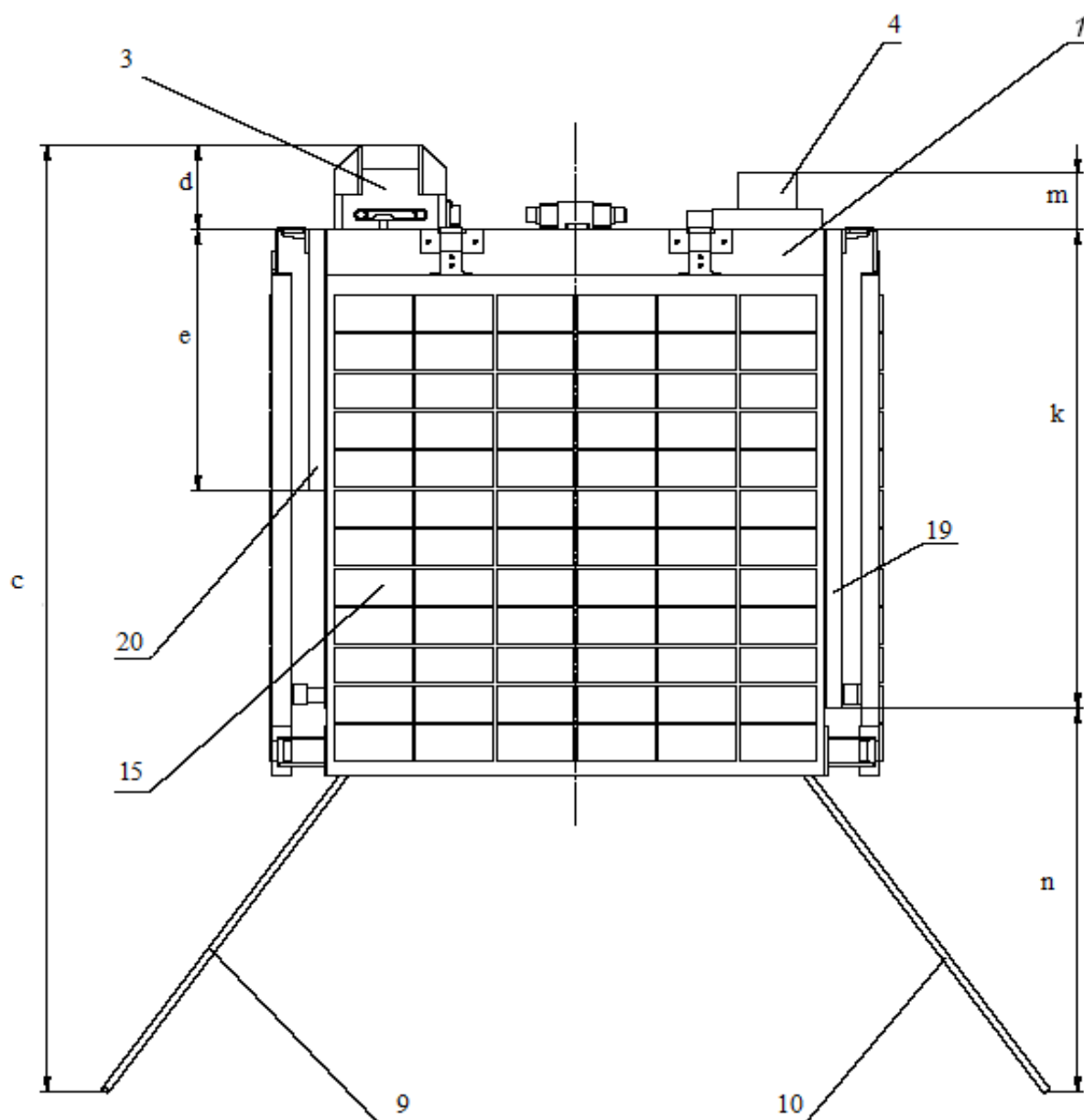


Рис. 2. МС «МС-КПІ» у складеному стані

Таблиця 1.

Елементи мікросупутника МС-КПІ

Позначення	Найменування
1.	Основа
2.	Корпус
3.	Давач координат Сонця
4.	Антено-фідерний пристрій КН
5.	Модуль електронних компонентів
6.	Батарея хімічна
7.	Блок двигунів-маховиків
8.	Датчик відокремлення

9.	Антено-фідерний пристрій основний
10.	Антено-фідерний пристрій резервний
11.	Магнітометр трикомпонентний
12.	Блок електронний основний
13.	Котушка електромагнітна Х
14.	Трубка теплова
15.	Батарея сонячна
16.	Защіпка
17.	Піросекатор
18.	Радіатор
19.	Екран тепловий
20.	Екран тепловий (к)

Таблиця 2.

### Розміри мікросупутника МС-КПІ

Позначення	Розмір (мм)
a	652
b	395
c	436
d	59
e	180
k	330
m	39

Основою силового каркасу МС є 4 стійки та 2 монтажні плити, що виконані з матеріалу Д-16Т. У середині силового каркасу розміщуються блоки корисного навантаження (рис. 3). На монтажних плитах розташовані датчики орієнтації та навігації. Силовий каркас екрановано чотирма тепловими екранами, до яких через вузли навіски приєднані сонячні батареї.

Таким чином, МС представляє собою складну статично невизначену конструкцію. Визначення спектру частот власних коливань такої конструкції аналітично є дуже складною та трудомісткою задачею. Тому розрахунок проводився за методом скінчених елементів із використанням модулю Pro/Mechanica системи автоматизованого проектування Pro/Engineer.

Для визначення точності розрахунків було проведено порівняння результатів при визначенні частот коливань при розрахунку з використанням математичного методу, розрахунку в MSN NASTRAN з використанням скінченно-елементної моделі та розрахунку в Pro/Engineer з використанням скінченно-елементної моделі,

Для аналізу була обрана балка прямокутного розрізу з наступними вихідними даними: висота – 200 мм, ширина – 100 мм, довжина – 1.5 м. Матеріал - дюралюміній Д16Т.

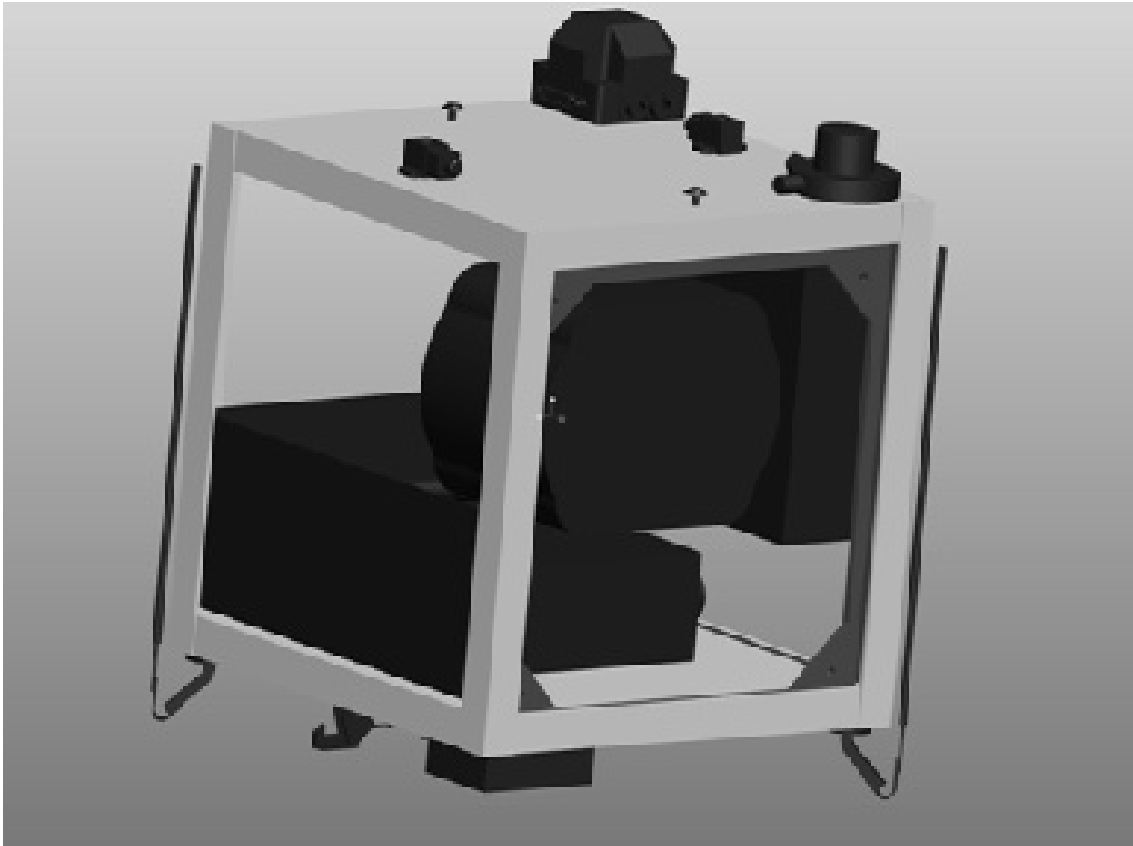


Рис. 3. Силовий каркас МС із встановленими датчиками та корисним навантаженням

При використанні математичного методу розрахунок частот власних коливань проводиться за формулою:

$$f = \frac{\lambda_i^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho F}},$$

де  $f$  – частота власних коливань балки;

$\lambda = (2i - 1)\pi/2$  – корінь частотного рівняння, який характеризує форму коливань та спосіб закріплення балки;

$i$  - номер тону коливань;

$l$  - довжина балки;

$E$  - модуль пружності матеріалу балки;

$J$  - момент інерції балки;

$\rho$  - густина матеріалу балки;

$F$  - площа поперечного перерізу балки.

Результати розрахунків з використанням математичного методу (ММ), розрахунку в MSN NASTRAN з використанням об'ємних скінченних елементів (МН) та розрахунку в Pro/Engineer з використанням одномірних та двомірних скінченних елементів (МП) приведені у табл. 3.

Таблиця 3.

Порівняльна таблиця розрахунків за трьома методами

	<b>ММ</b>	<b>МН</b>	<b>МП</b>
1	32,5	34,7	33,1
2	97,4	99,2	96,8
3	162,7	165,5	161,3
4	227,5	236,3	230,5
5	292,2	302,1	298,7
6	357,9	369,9	363,4
7	422,4	443,2	434,8
8	487,3	503,6	490,5
9	552,3	568,3	558,1
10	617,8	631,7	622,4

Бачимо, що розрахунки з використанням МСЕ, в якому використовуються одномірні і двомірні скінченні елементи, є точнішими ніж розрахунки з використанням МСЕ, в якому використовуються об'ємні скінченні елементи.

Для вирішення поставленої задачі силовий каркас було розбито на окремі тіла: монтажні плити, теплові екрани та стійки. Кожну стійку було розбито на 10-15 одномірних скінчених елементів. Теплові екрани та монтажні плити було розбито на 100-150 двомірних скінчених елементів.

Структура скінчено-елементної моделі силового каркасу МС представлена на рис. 4.

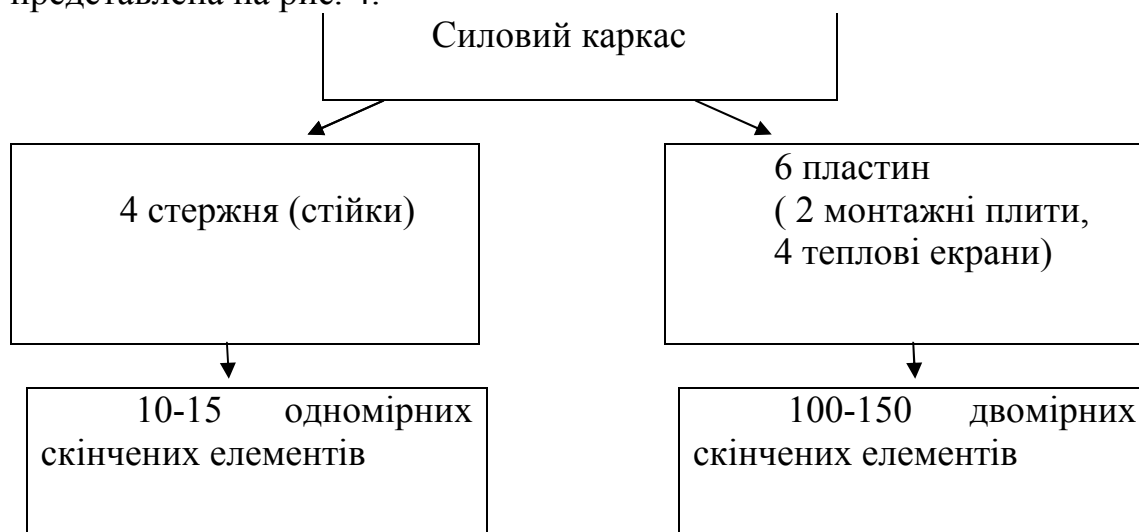


Рис. 4. Структура скінченно-елементної моделі силового каркасу

## МС-КПІ.

Відомим підходом щодо моделювання компонентів корисного навантаження є моделювання їх у вигляді зосереджених мас.

При такому способі у центрі мас кожного компоненту, що моделюється, розміщується зосереджена маса, жорстко пов'язана із елементом силового каркасу, до якого стикується відповідний елемент.

Це дозволяє врахувати вплив маси компоненту на динамічні характеристики, однак суттєвим недоліком такого способу є те, що не враховується зміна жорсткісних характеристик силових елементів за рахунок приєднання елементів корисного навантаження.

Тому будемо розглядати блоки корисного навантаження у вигляді одномірних кінцевих елементів (стрижнів), або двомірних елементів (пластин), в залежності від співвідношення їх лінійних розмірів.

При цьому густина матеріалу приймається такою, щоб маса моделі відповідала масі приладу. Маса вважається рівномірно розподіленою у об'ємі моделі.

Сонячні батареї також моделюються згідно цього алгоритму.

Перелік компонентів, що моделюється згідно запропонованого алгоритму, представлено у табл. 4.

*Таблиця 4.*

Перелік компонентів, що моделюється у вигляді кінцевих елементів з рівномірно розподіленою масою

№	Найменування	Позначення	Кількість	Маса, кг
1	Датчик координат Сонця	ДКС	1	0.21
2	Антенно-фідерний пристрій КН	АН	1	0.18
3	Модуль електронних компонентів	МЕК	1	1.7
4	Батарея хімічна	БХ	1	1.5
5	Блок двигунів-маховиків	БДМ	1	0.9
6	Датчик відокремлення	ДВ	2	0.08
7	Антенно-фідерний пристрій основний	АФПО	1	0.15
8	Антенно-фідерний пристрій резервний	АФПР	1	0.15
9	Магнітометр трикомпонентний	ММ	1	0.1
10	Блок електронний основний	БЕО	1	0.6
11	Блок електронний резервний	БЕР	1	0.6
12	Батарея сонячна	СБ	4	0.6

Таким чином, розрахункова скінченно-елементна модель супутника представляє собою набір поверхонь та кривих, розміщених по нейтральних лініях відповідних їм елементів, та з набору точок, розміщених у центрах мас елементів корисного навантаження, датчиків і сонячних панелей.

Принципову схему врахування впливу елементів корисного навантаження на жорсткісні та динамічні характеристики силового каркасу згідно запропонованого алгоритму представлено на рис. 5.

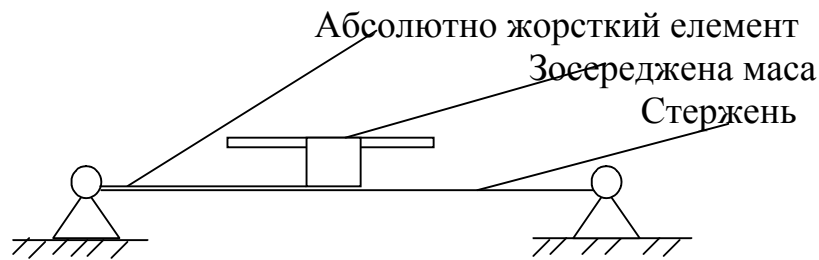


Рис. 5. Принципова схема врахування впливу елементів корисного навантаження на характеристики силового каркасу.

Для збільшення точності розрахунків необхідно забезпечити велику густину скінченно-елементної сітки поблизу зон стикування окремих елементів конструкції. У той же час на віддалені від зон стикування немає потреби у великій густині сітки, оскільки це призведе до великих витрат машинного часу. Тому скінченно-елементна сітка моделі оптимізувалася таким чином, щоб сітка мала максимальну густину поблизу зон стикування елементів силового каркасу.

На модель накладено консольне закріплення по площині стику із адаптером ракети-носія.

Частоти вібраційного, ударного і акустичного навантаження, що діють на корисне навантаження від ракети-носія лежать у діапазоні 0-1000 Гц.

Результати розрахунку частот власних коливань у даному діапазоні представлені у табл. 5.

Таблиця 5.

Розрахункові частоти власних коливань силового каркасу МС  
(запропонований алгоритм)

№ режиму	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота, Гц.	73.7	81.7	111.3	163.8	222.2	283.7	421.5	437.8
№ режиму	9	10	11	12	13	14	15	16
Частота, Гц.	498.2	504.9	531	535.5	581.2	600.5	680.3	724
№ режиму	17	18	19	20	21	22	23	24
Частота, Гц.	896.3	940.4	956.9	981.3	983.7	994.4	1010.4	1027.6

Результати розрахунку частот власних коливань при врахуванні елементів корисного навантаження у вигляді зосереджених мас за відомим алгоритмом (врахування елементів корисного навантаження у вигляді зосереджених мас) представлені у табл. 6.

Таблиця 6.

Розрахункові частоти власних коливань силового каркасу МС



(відомий алгоритм)

№ режиму	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота, Гц.	50.1	56.6	78.5	117.6	162.3	210.8	318.5	336.3
№ режиму	9	10	11	12	13	14	15	16
Частота, Гц.	389.0	400.6	428.0	438.4	483.2	506.8	582.7	629.3
№ режиму	17	18	19	20	21	22	23	24
Частота, Гц.	790.3	841.0	867.9	902.4	917.0	939.5	967.3	996.8

Результати розрахунку частот власних коливань за відомим та запропонованим алгоритмами представлено на рис. 6.

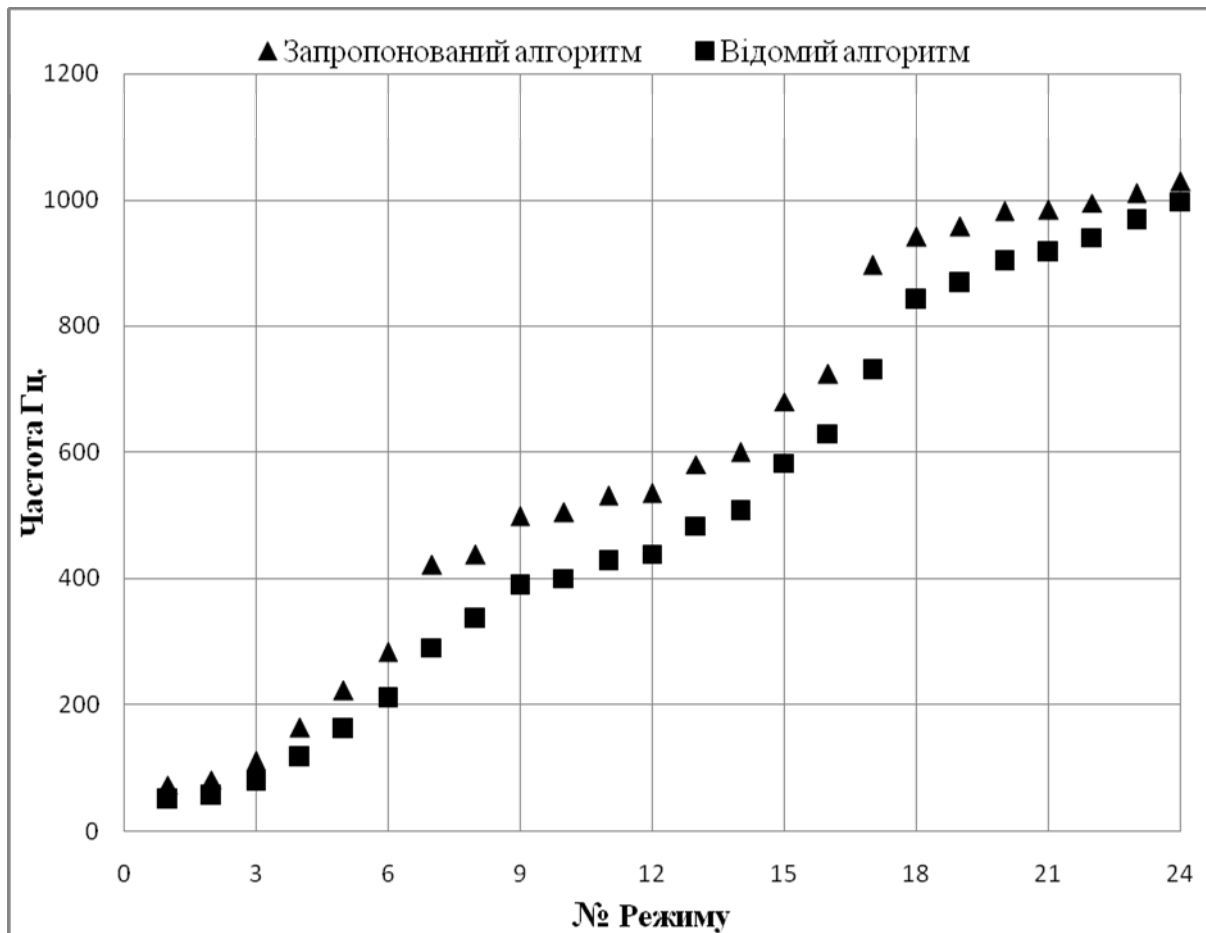


Рис. 6. Частоти власних коливань конструкції МС

Аналіз рис. 6 показує, що запропонований алгоритм дозволяє суттєво покращити визначення частот власних коливань у діапазоні 400–1000 Гц. Середня різниця у результатах розрахунку складає 15%.

## Висновки

Модальний аналіз конструкції МС є ефективним засобом визначення частот власних коливань складних конструкцій.

Запропоновано алгоритм моделювання елементів корисного навантаження, який враховує зміну жорсткісних характеристик елементів силового каркасу, до яких вони приєднуються, і вплив маси елементів корисного навантаження на динамічні характеристики силового каркасу МС. Показано, що розроблений алгоритм дозволяє уточнити визначення частот власних коливань у діапазоні 400-1000 Гц.

### **Список використаної літератури**

1. Янукьян З. А. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния несущих конструкций антенн. – М.: МАИ, 2006. – 88 с.
2. Маденси Е., Гувен И. Конечно-элементный метод и приложения в инженерии с использованием ANSYS. - Springer Science+Business Media, LLC, 2006. – 686 с.
3. Шимкович Д. Г. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: 2008. – 702 с.
4. Цибенко О. С., Крищук М. Г., Конюхов О. С., Коваль В. П., Аксьоненко А. В., Трубін А. В. Розробка адекватної математичної моделі дослідження динаміки стулок головного оптикача ракети-носія у процесі польоту і відділення. – Наукові вісті НТУУ «КПІ». №6, 2006 – 139-148 с.
5. Василенко Н. В. Теория колебаний. – К.: Вища шк., 1992. – 426 с.
6. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984
7. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. — М.: Мир, 1986.