

## Лабораторна робота 7

### Оптимізація конструкції дискової фрези

**Мета роботи:** *автоматизувати процес проектування та оптимізації конструкцій на прикладі компенсаційних отворів дискової фрези використовуючи оптимізаційні інструменти SolidWorks Simulation.*

#### Порядок виконання:

#### **1. Ознайомитися з наступними теоретичними відомостями:**

- 1.1. Оптимізаційні алгоритми SolidWorks Simulation;
- 1.2. Оптимізаційні алгоритми інших CAD/CAE систем;

#### **2. Частотний аналіз.**

- 2.1. Створення частотного аналізу
- 2.2. Формування нового матеріалу в базі матеріалів. Призначення матеріалу.
- 2.3. Створення сітки. Запуск дослідження.
- 2.4. Оцінка результатів дослідження.

#### **3. Статичний аналіз.**

- 3.1. Створення статичного дослідження. Призначення матеріалів і граничних умов.
- 3.2. Запуск дослідження. Оцінка результатів дослідження.

#### **4. Оптимізаційне дослідження**

- 4.1. Створення оптимізаційного дослідження
- 4.2. Визначення змінних, обмежень і цілей
- 4.3. Перегляд результатів процесу оптимізації
- 4.4. Створення графіків локальної тенденції

### **1. Короткі теоретичні відомості**

#### **1.1. Оптимізаційні алгоритми SolidWorks Simulation [1,2].**

Оптимізаційні алгоритми SolidWorks Simulation дозволяють призначити обмеження на основі різних досліджень в межах однієї задачі . Початкові дослідження є основою сценарію процесу оптимізації або оцінки. На кожному етапі оптимізації оптимізаційний алгоритм SolidWorks Simulation виконує

початкові дослідження з урахуванням змінених змінних проектування.

Графік робочого потоку оптимізаційного алгоритму SolidWorks Simulation показаний на рисунку 1.

В модулі оптимізації конструкції SolidWorks використаний метод нелінійного програмування. В загальному випадку задачею нелінійного програмування являється

знаходження максимуму (мінімуму) нелінійної функції багатьох змінних коли на змінні накладаються (або не накладаються) обмеження. В стандартному вигляді задача нелінійного програмування записується в наступному вигляді:

$$\max f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

При наступних обмеженнях:

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \quad i = \overline{1, m}$$

де  $x_i, i = 1, \dots, n$  - параметри;

(2)

$g_j, j = 1, \dots, s$  - обмеження;

$n$  - кількість параметрів;

$s$  - кількість обмежень.

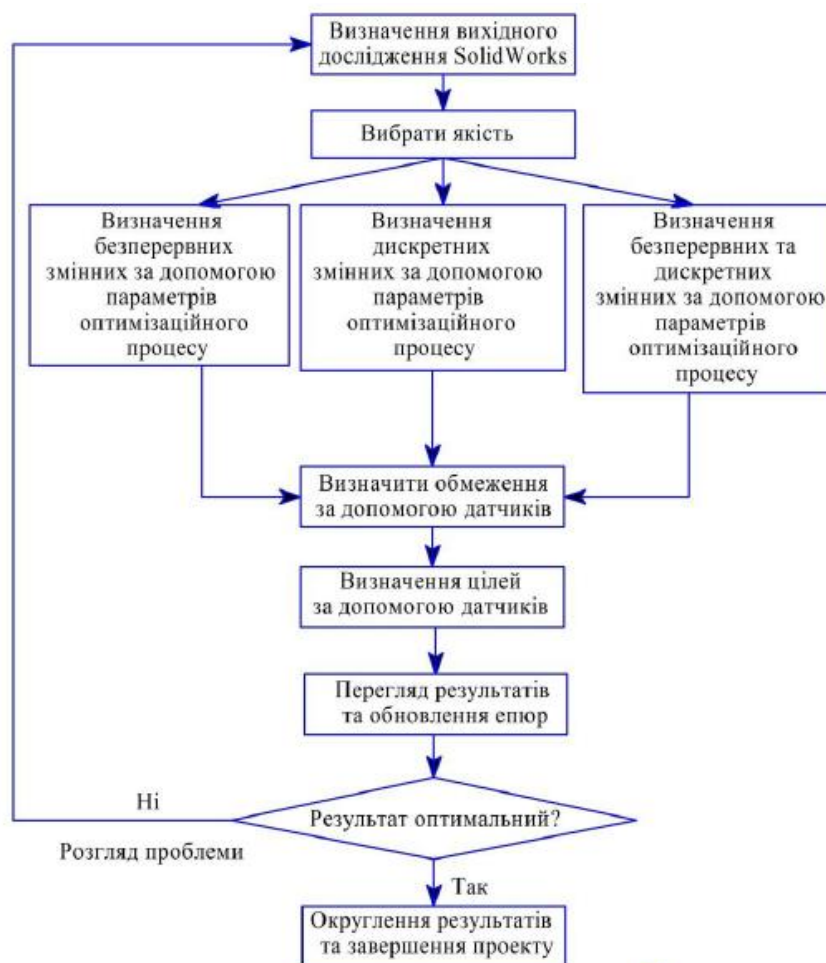


Рис.1. Графік робочого потоку [2]

Під оптимізацією конструкції дискової фрези в середовищі SolidWorks Simulation розуміється знаходження таких величин параметрів (змінних проектування), при яких цільова функція приймає максимальне значення. При цьому на дослідження накладаються обмеження по еквівалентних напруженнях згідно IV теорії міцності (von Mises), що виникають у фрезі при зміні значень змінних проектування. Варто зазначити, що в оптимізаційному дослідженні в якості обмеження можна використати будь-які складові

тензорів напружень, деформацій та переміщень. Проте функціонал SolidWorks Simulation дозволяє як обмеження в оптимізаційному дослідженні застосовувати еквівалентні напруження, визначені лише за IV теорією міцності, хоча для загартованих інструментальних сталей доцільніше використовувати V теорію міцності (Moore-Coulumb). В даній роботі з метою скорочення кількості обчислень допустимим є використання еквівалентних напружень по IV теорії міцності. Значення максимального еквівалентного напруження (1112 МПа), перевищення якого приймається недопустимим, одержано діленням межі міцності на розтяг інструментального матеріалу (для Р6М5  $\sigma_p = 2780$  МПа) на коефіцієнт запасу міцності, прийнятий рівним 2,5. В даному оптимізаційному дослідженні змінними проектування виступають конструктивні параметри компенсаційних отворів та їх кількість, а цільовою функцією, котру потрібно максимізувати, являється перша частота власних коливань фрези. При цьому варто зазначити, що розміри, котрі є змінними проектування, не повинні бути функцією інших розмірів, тобто потрібно використовувати тільки керуючі розміри.

Цільова функція (кількісний показник якості альтернатив вибору) даного оптимізаційного дослідження – максимізація перших п'яти власних частот фрези.

В роботі буде використано 5 обмежень, котрі базуються на 2-х первинних дослідженнях – статичному та частотному. В якості обмеження по статичному дослідженню буде використано датчик даних моделювання Simulation. Зокрема встановлюється обмеження на значення еквівалентних напружень. В якості обмежень частотного дослідження використано датчики даних моделювання Simulation, котрі відображають значення 2-,3-,4- та 5-ї частоти. При чому для обмеження при частотному дослідженні (датчики 2-,3-,4- та 5-ї частоти) встановлений параметр «Тільки моніторинг», тобто SolidWorks Simulation відслідковує показання датчиків без накладання обмежень.

## 1.2. Оптимізаційні алгоритми інших CAD/CAE систем

Модуль Simulation, котрий являється частиною пакету Premium програмного продукту Solid Edge, дозволяє ефективно проводити оптимізацію конструкції виробів реалізуючи аналогічний оптимізаційний алгоритм до алгоритму оптимізації в програмному продукті SolidWorks.

В програмному продукті Solid Edge основними вихідними даними для оптимізації конструкції являються:

- 1) посилання на існуючий аналіз;
- 2) проектні параметри;
- 3) проектні обмеження;
- 4) проектні змінні;
- 4) керуючі параметри.

У середовищі ANSYS Workbench починаючи з версії 7.0 присутній спеціалізований модуль оптимізації - ANSYS DesignXplorer.

ANSYS Design Xplorer на основі багатокритеріальної методики варіаційного аналізу дозволяє інженеру дослідити конструкцію на чутливість до факторів впливу, виконувати побудову поверхонь відгуку та аналізувати варіанти граничних умов і навантажень.

Найчастіше у ANSYS Design Xplorer використовується алгоритм оптимізації Design of Experiment, крім нього доступними до використання являються також алгоритми Variational Technology, Six Sigma Analysis, Monte-Carlo Analysis і NPQL.

Однією з переваг ANSYS Workbench є можливість проведення основних типів розрахунків, підтримуючи асоціативний зв'язок з геометричною моделлю в CAD-системі, а саме Pro / ENGINEER, SolidWorks і AutoCAD .

Широке використання ANSYS Design Xplorer для оптимізації конструкцій доводить ефективність використання даного програмного продукту для задач оптимізації.

MSC.NASTRAN може бути використаним для оптимізації на основі задач статички, стійкості, сталих і несталих динамічних перехідних процесів, власних частот і форм коливань, аеродинаміки та аеропружності.

## 2. Частотний аналіз

### 2.1. Створення частотного аналізу

#### 2.1.1. Відкрити деталь «Фреза дискова»

2.1.2. Створити нове дослідження, тип дослідження «Frequency», як це показано на рис.1. Назвати дослідження « Frequency».

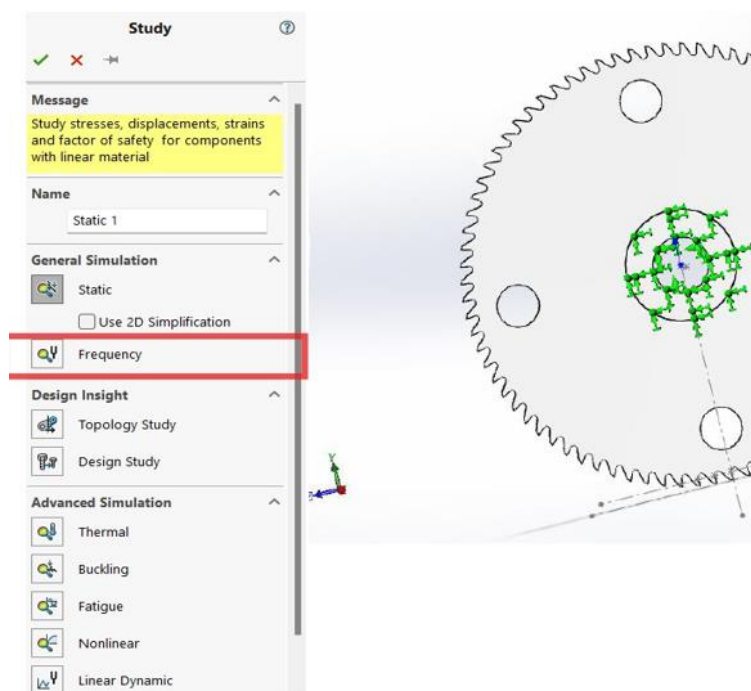


Рис.1. Створення нового частотного дослідження

Для того, що б задати епюру за про мовчанням (див. рис.3):

- вибрати **Simulation > Options**;
- на вкладці **Default Options** вибрати **Frequency/Buckling Study Results**;
- у вікні **Create plots** вибрати **For first 5 mode shapes**;
- в полі **Result type** вибрати **Amplitude: AMPRES: Resultant Amplitude** для генерації епюр переміщення
- натисніть кнопку **Ок**.

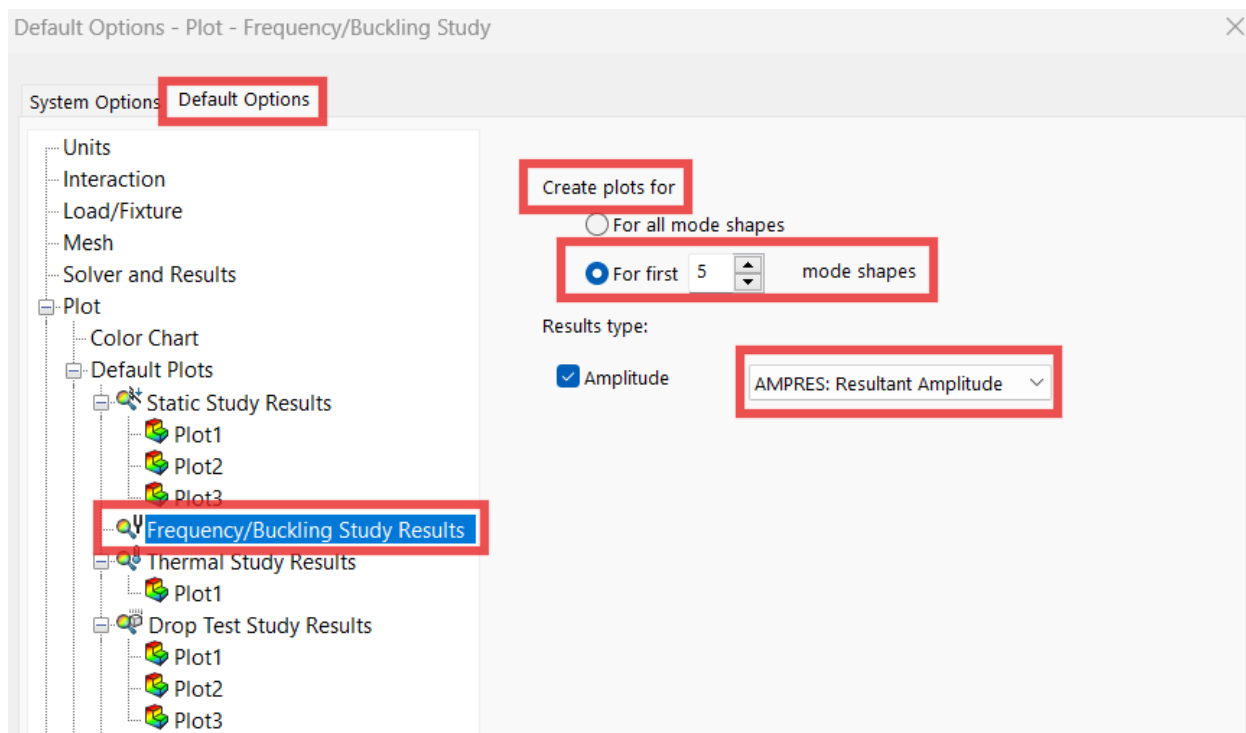


Рис.3. Налаштування частотного дослідження

### 2.1.3. Призначення граничних умов.

До маточини фрези застосувати кріплення «**Fixed Geometry**» по плоскій та циліндричній гранях, як це показано на Рис.4.

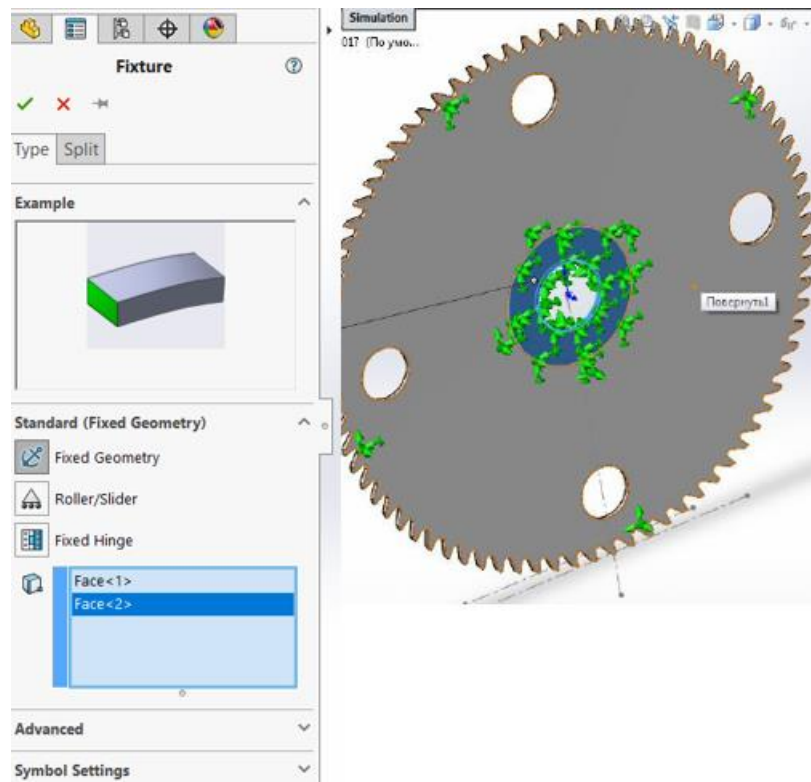


Рис.4. Закріплення фрези

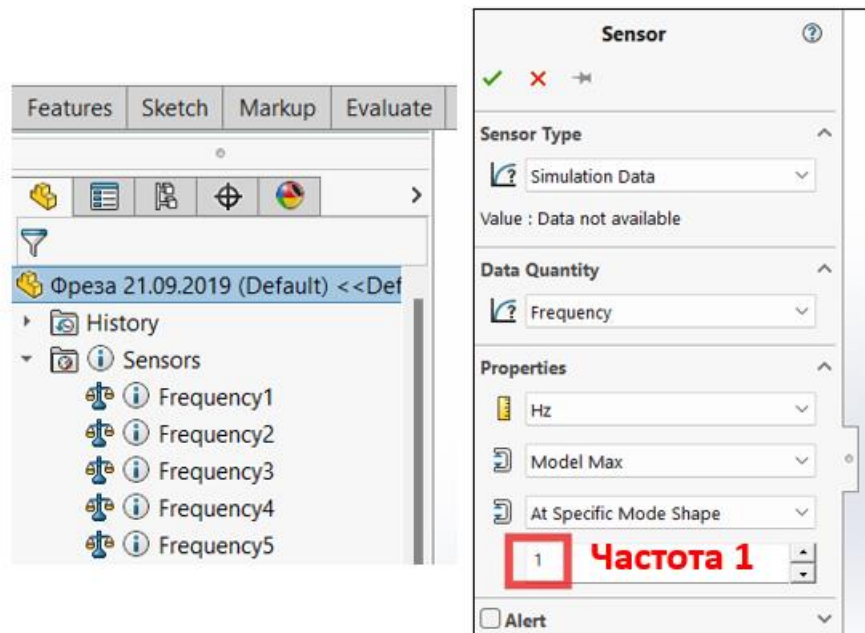
#### 2.1.4. Створення датчиків

Створити 5 датчиків, котрі будуть відображати 5 перших власних частот коливання фрези (рис. 2,а).

- У дереві конструювання натисніть правою клавішею миші на **Sensor** → **Add sensor**. Тип датчика – **Simulation Data**, кількість даних - **Frequency**, критерій – **Model Max**. Таким способом створити датчики для 5-ти власних частот.

Всі інші налаштування згідно рисунку 2,б.

На рисунку 2,б червоним виділено цифру «1», котра позначає 1-шу частоту, відповідно для наступних 4-х датчиків дане значення має бути змінене на 2,3, 4 та 5.



а)

б)

Рис. 2. Датчики частотного дослідження

## 2.2. Формування нового матеріалу в базі матеріалів. Призначення матеріалу.

Фреза виготовлена з матеріалу Р6М5. Властивості матеріалу показані на рис.5.

- в дереві дослідження FeatureManager натиснути правою кнопкою на деталі «Фреза дискова» і обрати «Edit Material»;
- в дереві матеріалів необхідно вибрати матеріал на основі якого буде створений новий користувацький матеріал Р6М5, для цього підійде будь-яка сталь;
- натиснути правою кнопкою миші на будь-яку сталь і вибрати Copy;
- в дереві матеріалів обрати Custom Materials і натиснути правою кнопкою миші, обрати New Category (2), натиснути правою кнопкою миші на New Category (2) та вибрати Add;
- після цього перейменувати матеріал та редагувати значення властивостей, котрі відображені на рисунку 5.

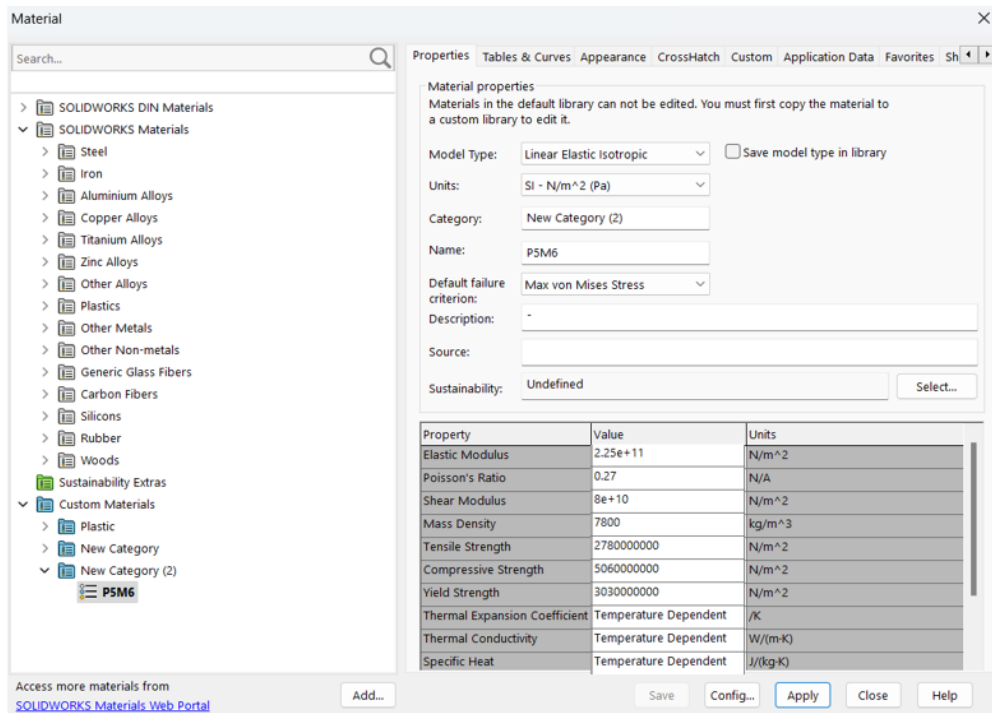


Рис. 5. Властивості користувацького матеріалу фрези

### 2.3. Створення сітки. Запуск дослідження

- в дереві FeatureManager натиснути правою кнопкою на Mesh і обрати Create Mesh, повзунок Mesh Density дещо пересунути в сторону Fine. Запустити дослідження.

### 2.4. Оцінка результатів дослідження. Виведення списку масової участі. Оцінка точності результатів

- клацніть стрілку зверху поруч з параметром Result Advisor (Simulation CommandManager) та виберіть List Resonant Frequencies (див. рис. 6);

Форми коливань, що відповідають першим п'яти частотам, відображено на рисунку 7.

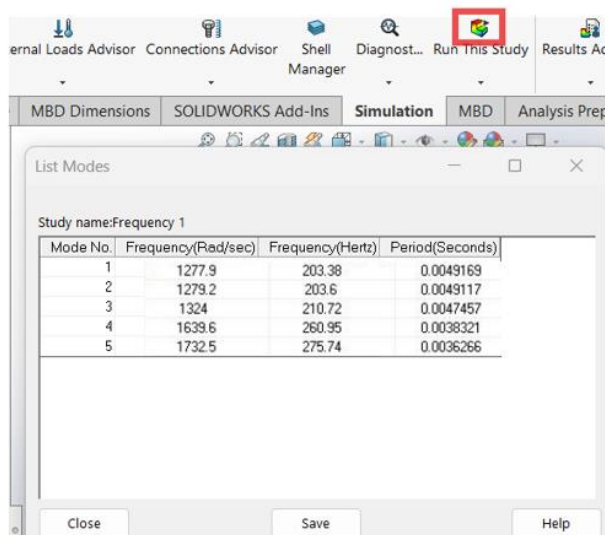




Рис. 6. Значення власних (резонансних) частот коливання

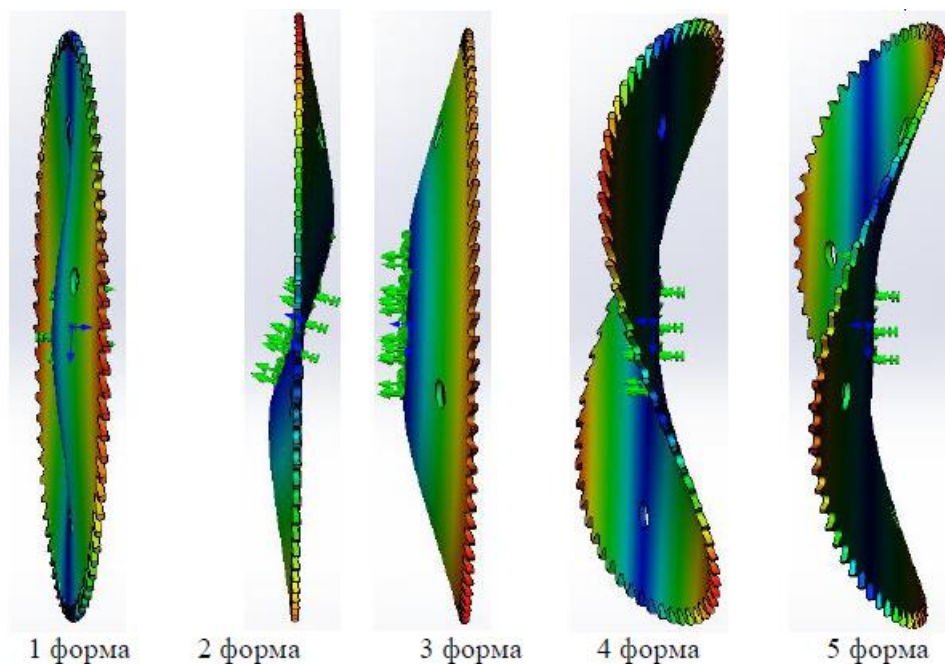


Рис. 7. Форми коливань дискової фрези\*

\* - Варто зазначити, що у відповідності до функціоналу модуля Simulation моди коливань демонструють тільки форму коливань і переміщення вузлів один відносно одного. Так як демпфування не враховується, то теоретично переміщення при коливаннях є безкінечними в місцях відсутності кріплення, тому абсолютні величини переміщень не мають фізичного змісту.

Розтягуючі зусилля підвищують власні частоти, стискаючі – знижують. Тому для аналізу впливу відцентрових сил на власні частоти потрібно проводити частотний аналіз з використанням вирішуючої програми Direct sparse. Дана програма використовує прямий метод для розріджених матриць, який базується на алгоритмі Холеського. Прийнята частота обертання фрези складає 200 об/хв (20,94 рад/с), тому відцентрові сили незначно впливають на її власні частоти і для пришвидшення подальших обчислень їх можна не враховувати. Але при більших колових швидкостях (фрези більшого діаметру чи частота обертання вища) доцільно враховувати відцентрові сили.

### 3. Статичний аналіз.

#### 3.1. Створення статичного дослідження. Призначення матеріалів і граничних умов

Статичний розрахунок потрібно провести на стандартній сітці, в якості вирішуючої програми використати FFEPlus.

Дана ітераційна вирішуюча програма базується на методі спряжених градієнтів для задач статички. Вирішуюча програма FFEPlus має менший функціонал ніж Direct Sparse та Large Problem Direct Sparse, зокрема функціонал FFEPlus не дозволяє врахувати вплив навантажень на власні частоти фрези. Але FFEPlus потребує в середньому в 10 разів менше оперативної пам'яті EOM ніж Direct Sparse та дозволяє проводити розрахунки значно швидше. З урахуванням того, що параметричне оптимізаційне дослідження SolidWorks Simulation, залежно від змінних дослідження та налаштувань може десятки разів перезапускати первинні дослідження, використання вирішуючої програми FFEPlus може суттєво скоротити час оптимізаційного дослідження.

- Перейти у вкладку **Simulation** та запустити **New Study**, Назвати дослідження «**Static**».
- Натиснути кнопку виклику меню «**SolidWorks**», перейти у меню **Simulation** – **>Options**;
- У вікні, що відкрилося, перейти у вкладку **Default Options**:
- Система одиниць вимірювання – **SI (MKS)**;
- Довжина – **mm**;
- Тиск/напруження – **N/mm<sup>2</sup> (MPa)**.
- Натиснувши правою кнопкою миші на назву деталі, перейти у меню **Edit Material**;
- Обрати **R6M5**.
- Натиснувши правою кнопкою миші на **Fixtures**, обрати пункт **Fixed Geometry** та зафіксувати грань, як показано на рис.3
- Натиснувши правою кнопкою миші на **External Loads**, обрати пункт **Force\*** та прикласти навантаження до зубів фрези, як це показано на рис. 7

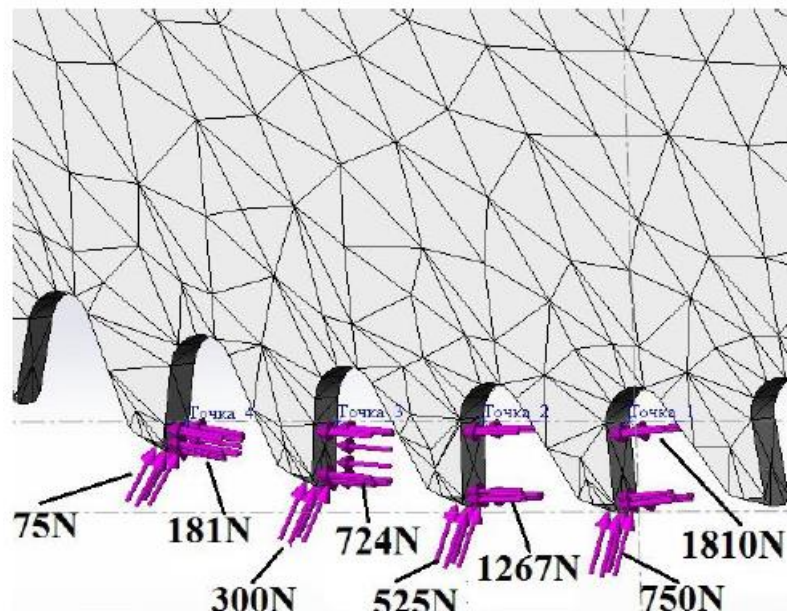


Рис. 7. Умови навантаження

- в дереві **FeatureManager** натиснути правою кнопкою на **Mesh** і обрати **Create Mesh**, повзунок **Mesh Density** дещо пересунути в сторону **Fine**.

\* - глибина різання приймається рівною 5 мм, при цьому у процесі різання беруть участь 4 зуби, навантаження на зуби розподіляється нерівномірно: на перший найбільш навантажений зуб 100%; на другий зуб 70%; третій – 50% і 30% на останній. Причому такий розподіл застосований для нормальної і дотичної складових. Така постановка інженерної задачі спрощена, тому що на фрезу діють динамічні, а не статичні фактори. Для того, що б наблизити імітаційну модель та силові фактори до реального стану, вводиться коефіцієнт запасу міцності, котрий рівний 2,5.

- У дереві побудови натисніть правою клавішею миші на **Sensor** → **Add Sensor**. Тип датчика – **Simulation Data**, компоненти – **Stress Von Mises**, критерій – **Model Max** (див. рис. 8).

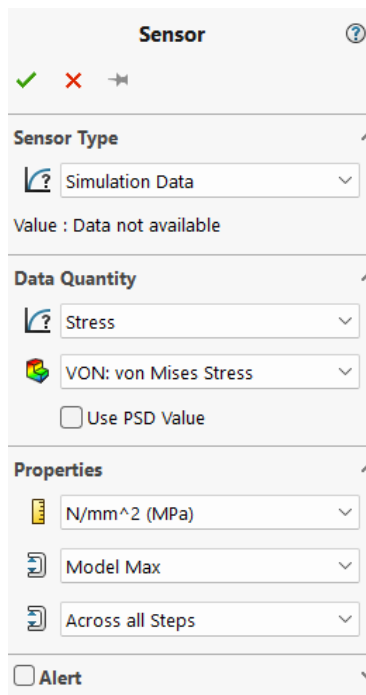


Рис.8. Датчик еквівалентних напружень

Як вже було зазначено, датчик «Еквівалентні напруження» в оптимізаційному дослідженні використовується як обмеження.

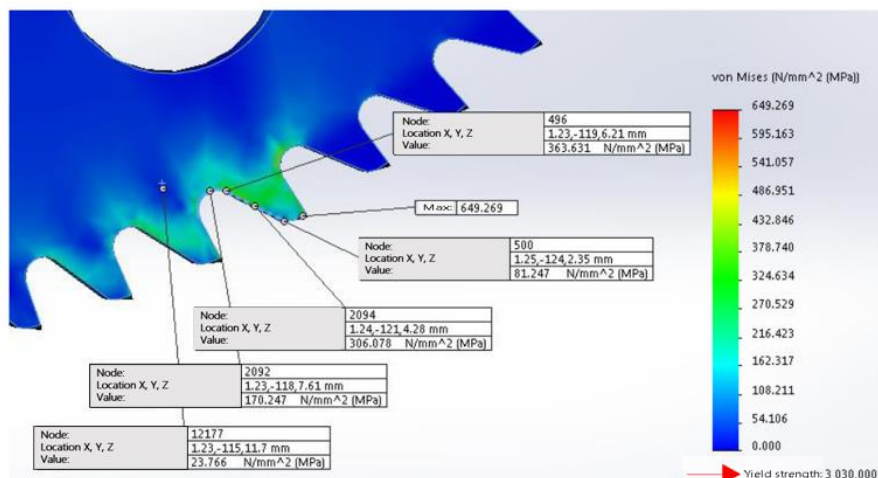


Рис. 9. Напружений стан дискової фрези при статичному навантаженні

Аналіз напруженого стану дискової фрези (рис. 9) показує, що максимальні еквівалентні напруження (650 МПа) значно нижчі максимально допустимого напруження (1112 МПа).

## 4. Оптимізаційне дослідження

### 4.1. Створення оптимізаційного дослідження

- натиснути правою кнопкою миші на будь-якому дослідженні і виберіть **Создать новое исследование проектирования**, назвіть дослідження «Оптимізація»;

- на вкладці дослідження «Оптимізація» виберіть **Параметры исследования проектирования** і у вікні **PropertyManager** в розділі **Качество исследования проектирования** виберіть **Высокое качество (медленнее)\***;

\* - В параметрах дослідження проектування в даній роботі необхідно обрати ступінь якості «Висока якість», що забезпечує пошук оптимального розв'язку з використанням безлічі повторів згідно плану Бокса-Бенкена. План Бокса-Бенкена є одним з різновидів статистичних планів та належить до симетричних некомпозитивних трирівневих планів другого порядку, які являють собою поєднання дворівневого (-1, +1) повного факторного експерименту з неповноблочним збалансованим планом. План Бокса-Бенкена застосовується при плануванні наукових та, найчастіше, промислових експериментів. В даному випадку такий план дозволяє отримувати максимальну кількість об'єктивної інформації про вплив конструктивних параметрів компенсаційних отворів на частотні характеристики за допомогою найменшого числа дослідів.

#### 4.2. Визначення змінних, обмежень і цілей

Необхідно визначити розміри моделі, які можуть змінюватися як параметр. Необхідно визначити параметри, щоб використовувати їх в якості змінних для Дослідження проектування. Можна визначити будь-які параметри Simulation і керуючі глобальні змінні в якості змінних.

Першим параметром буде кількість елементів масиву (кількість компенсаційних отворів). Для того, що би додати даний параметр спочатку необхідно його відобразити в моделі.

- натиснути правою кнопкою миші на паці «**Примітки**» в дереві конструювання і вибрати «**Відобразити приміток**»

- після того як в моделі відобразяться розміри від центру координат моделі за допомогою миші перемістити всі позначення і розміри. Одним з таких розмірів буде число «4», яке відображає число елементів масиву. Доданому розміру додати надпис, як показано на рис. 10.

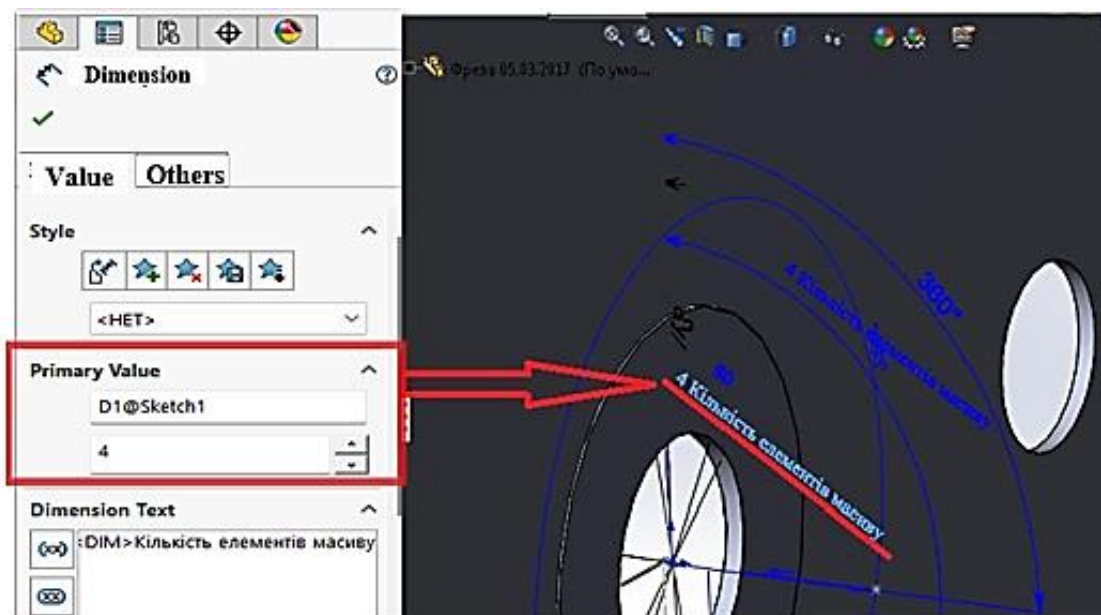


Рис. 10. Відображення кількості елементів масиву

- на вкладці **Type of Variable** вкладки **Оптимізація** в розділі **Variable** вибрати пункт **Add Parameter** як це показано на рис. 11;

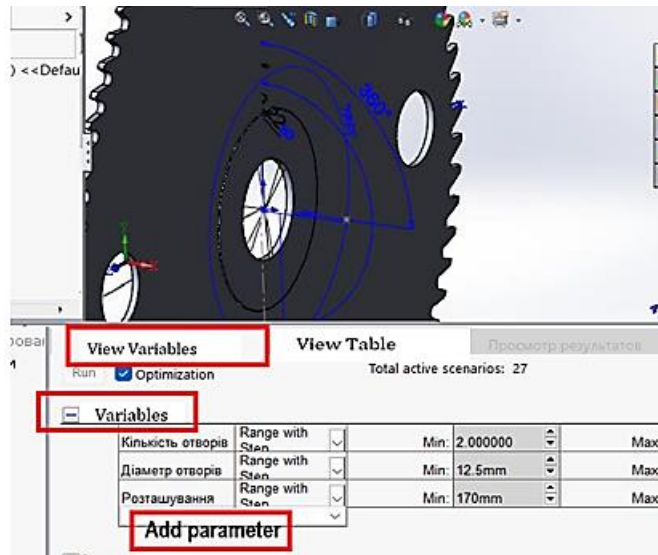


Рис.11. Визначення змінних проектування

- в графічній області вибрати розмір моделі «4 Кількість елементів масиву», назвати параметр «К-ть отворів» як це показано на рис. 12.

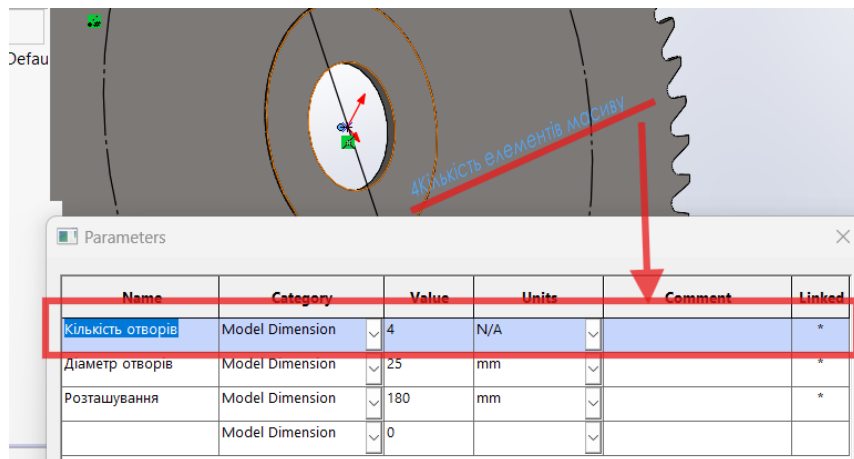


Рис. 12. Вибір параметру «К-ть отворів» в графічній області

- встановити для параметра **Category** значення **Model Dimension** (див. рис. 12);  
 Аналогічно вибрати 2 інші параметри: діаметр компенсаційних отворів та діаметр, на якому розташовані центри компенсаційних отворів як це показано на рисунках 13 та 14.

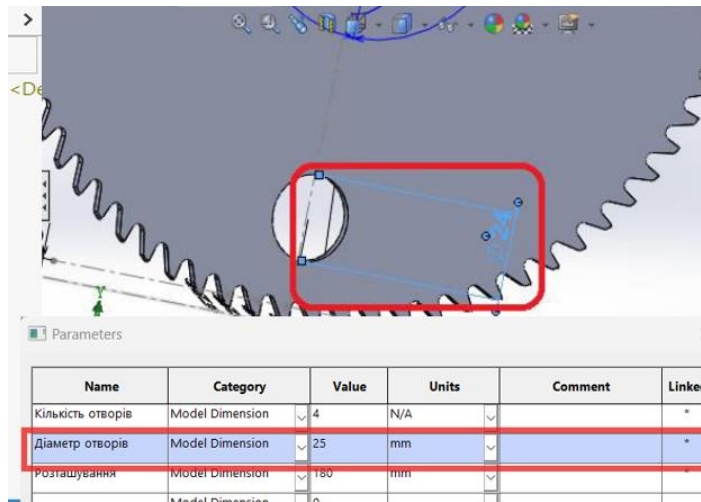


Рис. 13. Вибір параметру «Діаметр отворів» в графічній області

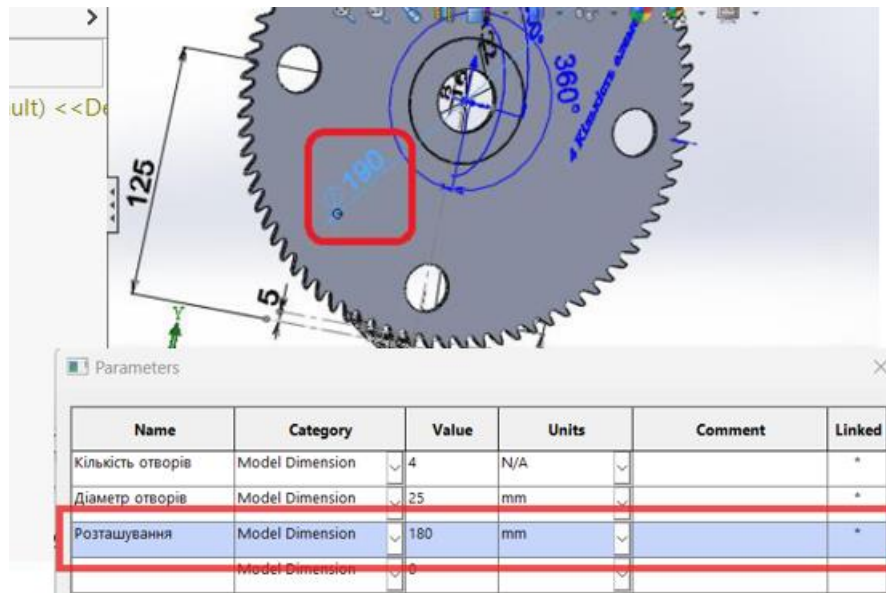


Рис. 14. Вибір параметру «Розташування» в графічній області

Необхідно визначити датчики для їх використання в якості обмежень в Дослідженні проектування. Дослідження проектування запускає відповідне вихідне дослідження **Simulation** для поновлення значення датчика. Наприклад, воно запускає частотне дослідження для відстеження значень резонансних частот. На наступному етапі визначається датчик для відстеження напруги по Мизесу.

- на вкладці **Variable View** вкладки **Optimization** в розділі **Constraints** виберіть по чергово датчики «**Frequency 2**», «**Frequency 3**», «**Frequency 4**», «**Frequency 5**» та «**Еквівалентні напруження**» як показано на рисунку 15;

Для частотних датчиків встановити варіант «**Monitor Only**», для датчика напружень обмеження по максимальних напруженнях «**Is Less than**», як це показано на рис. 16.

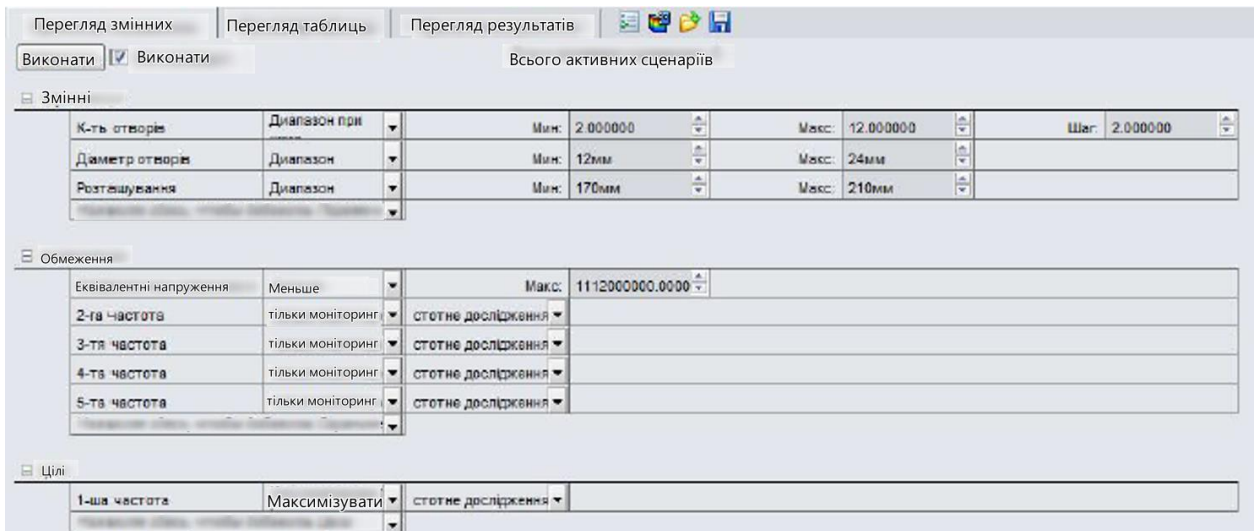


Рис. 15. Перегляд змінних оптимізації

- навпроти кожного датчика встановити відповідний тип первинного дослідження, для датчиків частоти це «Частота», а для датчика напружень «Статика» (див. рис. 15)

Ціль даного дослідження – максимізація власних частот, зокрема 1-ї частоти.

- на вкладці **Variable View** вкладки **Optimization** в розділі **Goals** виберіть **Sensor «1 Frequency»** встановіть «**Max**» та «**Frequency**» у відповідних полях розділі «**Goals**», як показано на рис.15. Запустити дослідження.

Програма виконує 13 ітерацій (виключаючи вихідний і оптимальний сценарії) після визначення дослідження Високої якості та трьох розрахункових змінних. Після виконання експериментів програма розраховує оптимальні розрахункові параметри шляхом створення функції відгуку.

### 4.3. Перегляд результатів процесу оптимізації

Результати на різних ітераціях показані на рис. 16. Система визначила оптимальну комбінацію змінних, котра дозволяє максимізувати власні частоти при цьому не перевищуючи прийнятих допустимих напружень.

		Поточна	Початкова	Оптимальна	Ітерація 1	Ітерація 2	Ітерація 3
К-ть отворів	<input type="text"/>	12.000000	4.000000	12.000000	2.000000	12.000000	2.000000
Діаметр отворів	<input type="text"/>	23.8284302мм	24мм	23.8284302мм	4мм	12мм	24мм
Розташування	<input type="text"/>	209.6038818мм	190мм	209.6038818мм	90мм	190мм	190мм
Еквівалентні напруження	< 1112 Н/мм <sup>2</sup>	961.7254 Н/мм <sup>2</sup>	649.2636 Н/мм <sup>2</sup>	961.7254 Н/мм <sup>2</sup>	46.5089 Н/мм <sup>2</sup>	639.1776 Н/мм <sup>2</sup>	653.1558 Н/мм <sup>2</sup>
2-га частота	Тільки моніторинг	221.0652057 Hz	203.595561 Hz	221.0652057 Hz	11.5924558 Hz	202.7980572 Hz	204.2915725 Hz
3-тя частота	Тільки моніторинг	225.7194581 Hz	210.7177836 Hz	225.7194581 Hz	16.7217639 Hz	210.4154436 Hz	209.2671656 Hz
4-та частота	Тільки моніторинг	281.541131 Hz	260.9545207 Hz	281.541131 Hz	72.7914753 Hz	267.2339137 Hz	263.8013581 Hz
5-та частота	Тільки моніторинг	281.7740156 Hz	275.7383091 Hz	281.7740156 Hz	72.9998222 Hz	267.3961189 Hz	271.7631463 Hz
1-ша частота	Максимізація	220.9956531 Hz	203.3797343 Hz	220.9956531 Hz	11.4935085 Hz	202.5971707 Hz	199.5023531 Hz

Рис.16. Результати дослідження

#### 4.4. Створення графіків локальної тенденції

Можна створити графіки локальної тенденції для перегляду варіацій обмеження або цілі і розрахункового параметра.

- у лівій рамці вкладки Дослідження проектування натисніть правою кнопкою миші папку Results and Graphs і виберіть Define Local Trend Graphs

Не допускається створення графіка локальної тенденції для оптимізаційного дослідження проектування з безперервними змінними.

- у вікні PropertyManager в розділі Ось X виберіть К-ть отворів.

- у PropertyManager в розділі Ось Y виберіть Constraints і в Constraints виберіть Еквівалентні напруження.

- у розділі Local Trend Graphs виберіть Optimal.

Натисніть Ок.

Програма створює графік варіації максимального напруження в порівнянні з розрахунковою змінною (див. рис. 17).

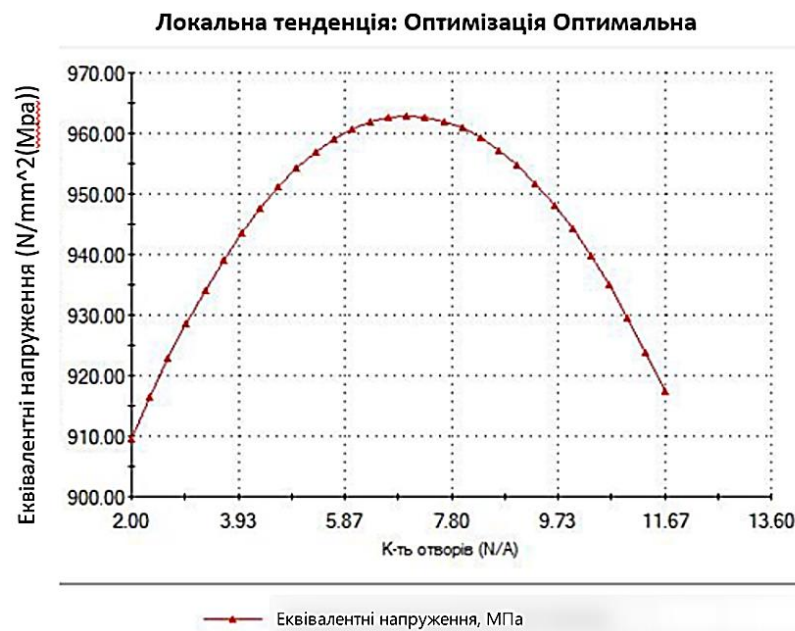


Рис. 17. Графік локальної тенденції

Таким чином можна будувати графіки локальних тенденцій для інших параметрів і обмежень.

#### Літературні джерела

1. Мельник, О. Л., Балицька, Н. О., Серов, В. В., & Соловійов, А. В. (2017). Параметрична оптимізація конструкції круглих компенсаційних отворів дискової фрези в середовищі Solidworks Simulation. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*, 1(2(80)), 49–59. [https://doi.org/10.26642/tn-2017-2\(80\)-49-59](https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-49-59)



2. SOLIDWORKS Web Help [Электронный ресурс] // Dassault Systèmes. – 2029. – Режим доступа до ресурсу: [https://help.solidworks.com/2019/English/SolidWorks/sldworks/r\\_welcome\\_sw\\_online\\_help.htm?verRedirect=1](https://help.solidworks.com/2019/English/SolidWorks/sldworks/r_welcome_sw_online_help.htm?verRedirect=1) .

3. SOLIDWORKS Tech Blog [Электронный ресурс] // Dassault Systèmes. – 2024. – Режим доступа до ресурсу: <https://blogs.solidworks.com/tech/>

4. J. Ed A. Finite Element Analysis Concepts via SolidWorks [Электронный ресурс] / Akin J. Ed // Rice University. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: [https://www.clear.rice.edu/mech403/HelpFiles/FEAC\\_final.pdf](https://www.clear.rice.edu/mech403/HelpFiles/FEAC_final.pdf).