

О.Л. Мельник, к.т.н.
Н.О. Балицька, к.т.н.
В.В. Серов, к.т.н., доц.
А.В. Соловійов, асп.

Житомирський державний технологічний університет

Параметрична оптимізація конструкції круглих компенсаційних отворів дискової фрези в середовищі Solidworks Simulation

Робота присвячена питанням підвищення якості проектних рішень в ході автоматизації проектування конструкцій за рахунок параметричної оптимізації в середовищі SolidWorks Simulation на прикладі круглих компенсаційних отворів дискової фрези. Визначено можливість підвищення динамічної стійкості дискових фрез від дії сили різання за рахунок впливу на частоту їх власних коливань. В роботі запропоновано забезпечувати підвищення частоти власних коливань дискових фрез за допомогою виконання круглих компенсаційних отворів, конструктивні параметри котрих визначаються за результатами параметричної оптимізації в середовищі SolidWorks Simulation. Показані особливості формулювання інженерної задачі, проведені первинні статичний міцнісний та частотний аналізи, згідно яких встановлені обмеження та ціль цієї оптимізаційної задачі. Досліджено вплив відцентрових сил на власні частоти коливань фрези. Здійснено порівняльну характеристику ітеративного та прямого вирішувального методу SolidWorks Simulation відповідно до результатів розрахунку. Оптимізаційне дослідження виконане в середовищі SolidWorks Simulation з використанням безлічі повторів (згідно плану Бокса-Бенкена), при цьому отримано оптимальні конструктивні параметри компенсаційних отворів дискової фрези для вказаних меж змінних параметрів дослідження. Здійснено аналіз впливу кількості отворів та діаметра колового масиву множини компенсаційних отворів на значення перших n яти частот власних коливань дискової фрези.

Ключові слова: параметрична оптимізація; SolidWorks Simulation; дискова фреза; частотний аналіз; міцність.

Вступ. На сьогодні з урахуванням вимог до скорочення термінів проектування технологічної оснастки та інструменту та одночасними вимогами до підвищення їх якості, актуальним є питання застосування більш ефективних технологій проектування на базі використання САД/САЕ-систем [1].

Існуючі САПР надають досить великий вибір методів пошуку технічних рішень, що дозволяє на етапі проектування при недостатньо чіткому формулюванні технічної задачі проводити уточнення завдання з швидким пошуком інженерних рішень з допомогою САПР [2].

Всі існуючі САПР можна поділити на три рівні за їх функціональною повнотою: легкі, середні та важкі [2–3]. До «легких» САПР відносять T-Flex, КОМПАС-ГРАФІК, CADLT, CADMECH, SputCAD та ін., котрі використовуються для 2-D та 3-D моделювання. До «середніх» САПР належать AutoCAD, Mecanical Desktop, SolidWork, Solid Edge, T-Flex CAD 3D, PATRAN та ін. Найбільш поширеними «важкими» САПР системами є CATIA, ANSYS, PRO/ENGINEER, NX, Nastran, MECHANICA та ін. [2–3].

Модулі оптимізації конструкції присутні в більшості «середніх» та «важких» САПР, котрі використовуються в машинобудуванні.

Варто зазначити, що «важкі» САПР початково були зорієнтовані на великі виробничі підприємства, хоча наразі і спостерігається їх адаптація до середніх та дрібних підприємств. Ширше використання в машинобудуванні для вирішення задач на інженерному рівні знаходять «середні» САПР. Найчастіше «важкі» САПР використовуються прикладними спеціалістами в питаннях міцності, гідро-та газодинаміки, тощо.

Але, як показує огляд літературних джерел [4–7], достатньо якісне вирішення розрахункових інженерних задач загального, важкого та середнього машинобудування можливе з використанням САЕ пакетів «середніх» САПР. Тому на сьогодні розвиток САПР формує чітку тенденцію переносу специфічних методик інженерного аналізу в «загальні» [6]. Так, наприклад, нелінійні статичні та динамічні задачі, імітація протікання середовища в теплових задачах можуть бути вирішені на інженерному рівні, а не тільки на рівні прикладних спеціалістів [6].

В зв'язку з цим вирішення питань підвищення якості проектних рішень при автоматизованому проектуванні виробів, за допомогою параметричної оптимізації в середовищі SolidWorks Simulation, на сьогодні є актуальним завданням.

Мета роботи – розробка інженерної методики параметричної оптимізації конструкції круглих компенсаційних отворів дискових фрез в середовищі SolidWorks Simulation для забезпечення підвищення частот власних коливань фрез при необхідній міцності їх диску.

Для досягнення поставленої мети сформовані наступні задачі:

- проаналізувати місце і роль параметричної оптимізації SolidWorks Simulation в проектних та перевірочних розрахунках та провести порівняння з аналогічними модулями інших сучасних широко використовуваних машинобудівних САПР;
- розглянути альтернативний шлях підвищення динамічної стійкості дискових фрез – вплив на частоту їх власних коливань за рахунок виготовлення круглих компенсаційних отворів;
- сформулювати інженерну задачу та виконати попередні статичні міцнісні та частотні дослідження дискової фрези в середовищі SolidWorks Simulation для подальшої параметричної оптимізації конструкції круглих компенсаційних отворів;
- розробити інженерну методику параметричної оптимізації конструкції круглих компенсаційних отворів дискових фрез в середовищі SolidWorks Simulation;
- виявити тенденції зміни перших п'яти частот власних коливань дискової фрези при зміні конструктивних параметрів компенсаційних отворів із забезпеченням її міцності за допомогою дослідження проектування в середовищі SolidWorks Simulation.

Огляд літературних джерел. Для здійснення параметричної оптимізації можуть використовуватися такі програмні продукти як ANSYS Workbench, CATIA, MSC.NASTRAN, Solid Edge, SolidWorks та ін.

У середовищі ANSYS Workbench починаючи з версії 7.0 присутній спеціалізований модуль оптимізації - ANSYS DesignXplorer [8].

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

Найчастіше у ANSYS DesignXplorer 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 при підтримці асоціативного зв'язку з геометричною моделлю в CAD-системі, а саме Pro/ENGINEER, SolidWorks і AutoCAD [8].

Широке використання ANSYS DesignXplorer для оптимізації конструкцій доводить ефективність використання даного програмного продукту для задач оптимізації [9].

MSC.NASTRAN може бути використаним для оптимізації на основі задач статичної, стійкості, сталей і несталей динамічних перехідних процесів, власних частот і форм коливань, аеродинаміки та аеропружності [2].

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

В програмному продукті Solid Edge основними вихідними даними для оптимізації конструкції являються [10]: посилання на існуючий аналіз; проектні параметри; проектні обмеження; проектні змінні та керуючі параметри.

На сьогодні в Україні одним з найбільш широко використовуваних САПР є SolidWorks, котрий дозволяє створювати єдиний інформаційний простір машинобудівного підприємства, що забезпечує паралельно розробку конструкторської та технологічної документації.

Параметрична оптимізація в середовищі SolidWorks Simulation дозволяє призначити обмеження в межах однієї оптимізаційної задачі на основі різних початкових досліджень. На кожному етапі оптимізації SolidWorks Simulation виконує початкові дослідження з урахуванням наборів значень змінних проектування [11].

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

Викладення основного матеріалу. В модулі оптимізації SolidWorks використаний метод нелінійного програмування [4]. 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:

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \quad j = \bar{1}, \bar{m}, \quad (2)$$

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

$g_j, j = 1, \dots, s$ – обмеження;

n – кількість параметрів;

s – кількість обмежень.

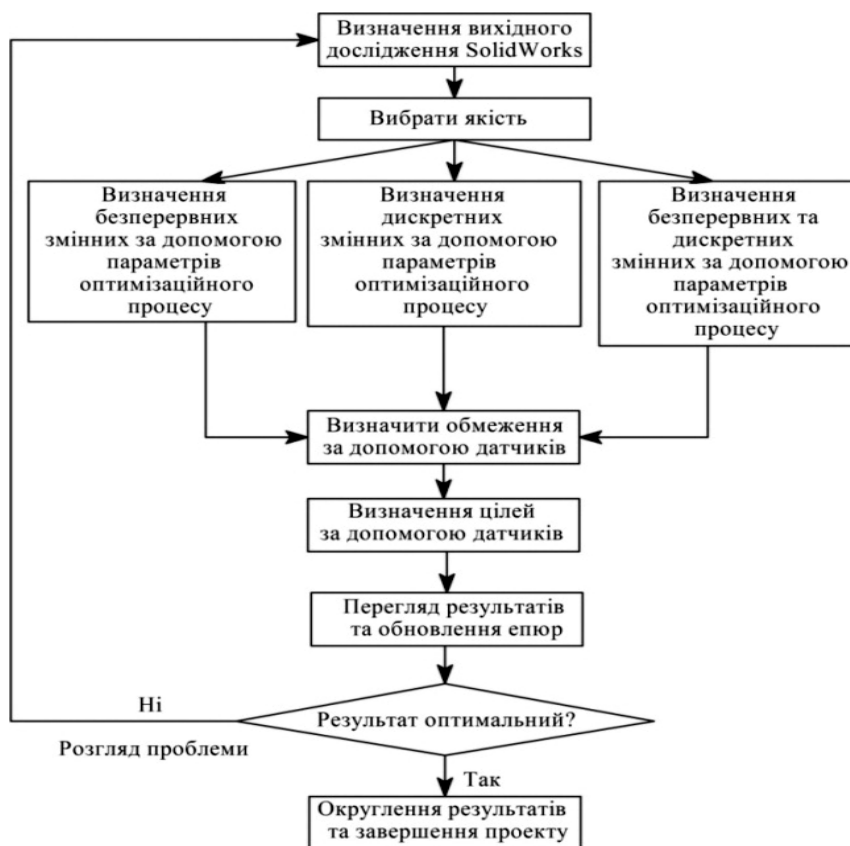


Рис. 1. Графік робочого потоку оптимізаційного алгоритму SolidWorks Simulation [11]

Даний модуль був застосований для оптимізації конструктивних параметрів компенсційних отворів дискової фрези, оскільки за рахунок виконання таких конструктивних елементів може бути підвищена працездатність цього різального інструмента.

Виробнича практика вказує на недостатню працездатність дискових фрез, про яку свідчить значний відсоток повної відмови в результаті руйнування їх диска. Це призводить до зростання витрат на інструмент та відсотку браку продукції, що, в свою чергу, підвищує її собівартість. Наукові напрацювання та практичний досвід щодо недостатньої працездатності дискових фрез ґрунтуються переважно на дослідженні та аналізі динамічних характеристик процесу оброблення. Відповідно до [12] низькою динамічною стійкістю характеризуються як відрізи так і прорізи дискових фрез всіх товщин в діапазоні діаметрів 200–315 мм, товщиною до 5 мм діаметром 160 мм, товщиною до 2 мм діаметром 100 мм, товщиною до 1,2 мм діаметром 80 мм та товщиною до 0,3 мм діаметром 63 мм (рис. 2).

З огляду на особливості роботи дискових фрез, а саме низьку швидкість різання, малі товщини зрізу, зазвичай коротку дугу контакту тощо, як основний навантажувальний фактор доцільно розглядати силу різання. Проблема підвищення динамічної стійкості фрез від дії сили різання може бути вирішена наступними шляхами: впливом на частоту вимушених коливань і впливом на частоту власних коливань фрези.

Питання, що пов'язані з підвищенням працездатності дискових фрез за рахунок впливу на збуджуючу силу різання (а разом з тим і на частоту вимушених коливань) в результаті кінематичного збудження поперечних коливань у процесі відрізання вирішені в роботах Равської Н.С., Панчука В.Г., Бабенка А.Є., Балицької Н.О. [13–15] та ін. Другий шлях вирішення зазначеної проблеми є не достатньо дослідженим і тому актуальним.

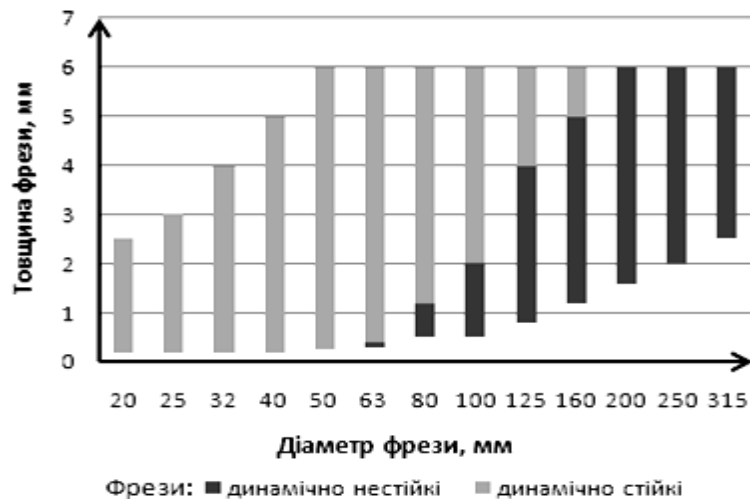


Рис. 2. Якісна оцінка динамічної стійкості відрізних та прорізних фрез у всьому діапазоні конструктивних розмірів

При розгляді коливань фрези необхідно врахувати вплив тих форм коливань і частот, які погіршують процес різання. Процес різання погіршується при контакті бічної поверхні фрези з поверхнею різа. Так як в конструкції фрези присутній допоміжний кут в плані ϕ_1 , тобто мається піднутрення, то дотик фрези з поверхнею різа буде відбуватися по зовнішньому ободу диска фрези. Найбільш небезпечними є перші три форми власних коливань фрези, оскільки максимальні амплітуди коливань на зовнішньому ободі досягаються саме на цих формах, але з метою підвищення точності розрахунків пропонується враховувати власні частоти перших п'яти формах.

Оскільки при співпадінні власної частоти фрези та частоти збуджуючої сили динамічна стійкість фрез різко зменшується, то одним з методів впливу на неї є зміна власної частоти фрези за рахунок конструктивних рішень, при яких власні коливання знаходяться в діапазоні високих частот (вище 200 Гц.). Тому були розглянуті відомі конструктивні рішення, що можуть бути застосовані для дискових фрез великих діаметрів, а саме: компенсаційні отвори.

Під оптимізацією конструктивних параметрів компенсаційних отворів 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 фрези 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 (Moog-Coulumb. В даній роботі з метою скорочення кількості обчислень допустимим є використання еквівалентних напруженнях 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 [4]. Цільова функція (кількісний показник якості альтернатив вибору) даного оптимізаційного дослідження – максимізація перших п'яти власних частот фрези. В роботі використано 5 обмежень, котрі базуються на 2-х первинних дослідженнях – статичному та частотному. В якості обмеження по статичному дослідженню 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.

В параметрах дослідження проектування в даній роботі обрано 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 некомпозиційних 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 [16]. 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.

Оцінка результатів початкових досліджень. Статичне дослідження. На основі попередніх робіт [12–15] сформоване статичне дослідження для дискової відрізної фрези (діаметр $D = 250$ мм, товщина $B = 2,5$ мм, кількість зубців $z = 80$), в якому прийнято, що складові сили різання становлять: радіальна – 1810 Н; дотична – 750 Н. Такі значення складових сил різання отримано за допомогою модуля розрахунку сил різання пакету прикладних програм імітаційної моделі процесу оброблення дисковими фрезами [15] для наступних умов різання: подача $S_z = 0,01$ мм/зуб, $n = 50$ об/хв, радіальне биття зубців – 0,12 мм, глибина різання $t = 40$ мм, оброблюваний матеріал – сталь 45, зубці фрези не мають зносу.

Кінцевоелементна модель та умови закріплення фрези (зафіксована геометрія на маточині фрези та в отворі) показані на рисунку 3.

Матеріал фрези – швидкорізальна сталь P6M5. Даний матеріал був внесений в базу даних SolidWorks Simulation (рис. 4), причому значення коефіцієнта теплового розширення, теплопровідності та питомої теплоємності задані таблично залежно від температури.

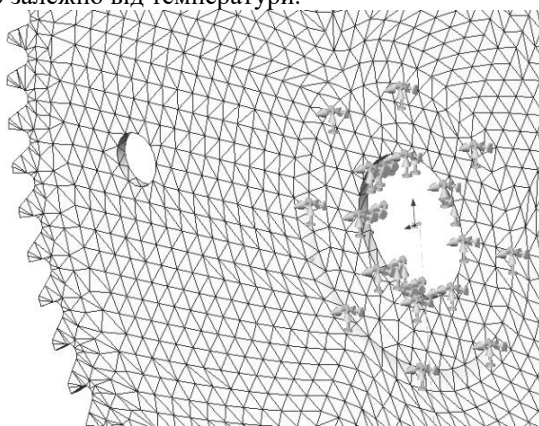


Рис. 3. Кінцево елементна модель та умови закріплення дискової фрези

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.25e-011	Н/м ²
Коеффициент Пуассона	0.27	Не применимо
Модуль сдвига	8e-010	Н/м ²
Массовая плотность	7800	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	2780000000	Н/м ²
Предел прочности при сжатии	5060000000	Н/м ²
Предел текучести	3030000000	Н/м ²
Коеффициент теплового расширения	Температурно-зависим	/К
Теплопроводность	Температурно-зависим	W/(м·К)
Удельная теплоемкость	Температурно-зависим	J/(кг·К)
Коеффициент демпфирования матери		Не применимо

Рис. 4. Характеристики матеріалу фрези (P6M5) внесеного в базу матеріалів SolidWorks

Статичний розрахунок проводився на стандартній сітці, в якості вирішуючої програми було використано 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 ЕОМ 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.

Результати статичного дослідження для оцінки напруженого стану диска фрези показані на рисунку 5.

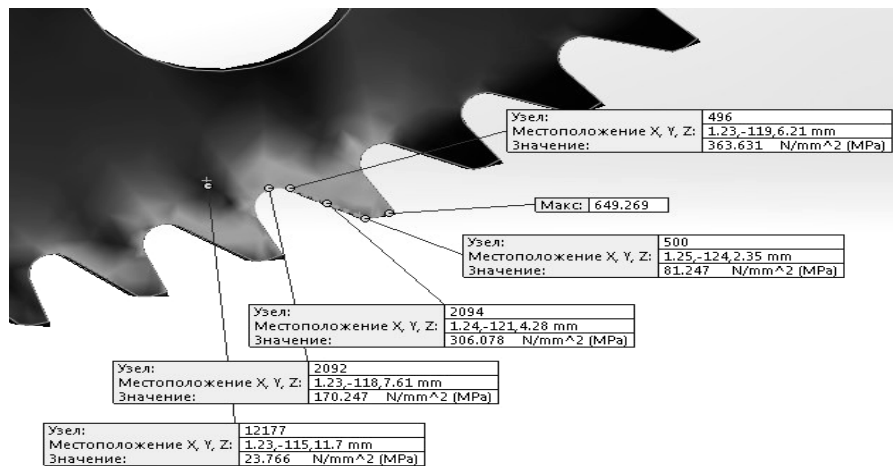


Рис. 5. Напружений стан дискової фрези при статичному навантаженні

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

В дереві побудови SolidWorks Simulation створено датчик «Еквівалентні напруження», котрий базуючись на даних моделювання відображає значення максимальних напружень, що виникають в моделі фрези при зміні конструктивних параметрів компенсаційних отворів. Як вже було зазначено, датчик «Еквівалентні напруження» в оптимізаційному дослідженні використовується як обмеження.

Розрахунок резонансних (власних) частот та відповідних їм форм коливань в середовищі SolidWorks Simulation. Використання частотного аналізу модуля Simulation, який ґрунтується на методі скінченних елементів, має певні обмеження, оскільки в ньому не враховується явище демпфування. Дане обмеження не дозволяє одержати інформацію про стан фрези в момент резонансу. Проте дана робота орієнтована на унеможливлення настання резонансу за рахунок впливу на частоти вимушених коливань фрези таким чином, щоб вони не співпадали з частотою коливань збуджуючої сили (сили різання).

Варто зазначити, що для частотного аналізу кінцево-елементне розбиття сітки має деякі особливості, а саме: ущільнення сітки у місцях концентрації навантаження та використання адаптивних методів (h і r -адаптивного), як правило, є недоцільними. Для частотного аналізу згідно [4] рекомендовано ущільнення сітки у місцях найменшого опору досліджуваного об'єкту навантаженням. Отже, ущільнення сітки варто проводити у місцях, на котрі діють найбільші інерційні навантаження.

Параметри налаштування частотного дослідження:

- кількість частот – 5;
- вирішуючі програми – FFEPlus для дослідження без врахування відцентрових сил та Direct sparse – з врахуванням відцентрових сил;
- тип результатів – частота та результуюча амплітуда.

Відомо, що розтягуючі зусилля підвищують власні частоти, стискаючі – знижують. Тому для аналізу впливу відцентрових сил на власні частоти був проведений частотний аналіз з використанням вирішуючої програми Direct sparse. Дана програма використовує прямий метод для розріджених матриць, який базується на алгоритмі Холеського [4].

Результати частотного аналізу, що наведені на рис. 6, свідчать, що відцентрові сили при частоті обертання фрези 200 об/хв незначно впливають на її власні частоти (збільшення на 0,018 %) і для пришвидшення подальших обчислень їх можна не враховувати. Форми коливань, що відповідають першим п'яти власним частотам дискової фрези, показані на рисунку 6.

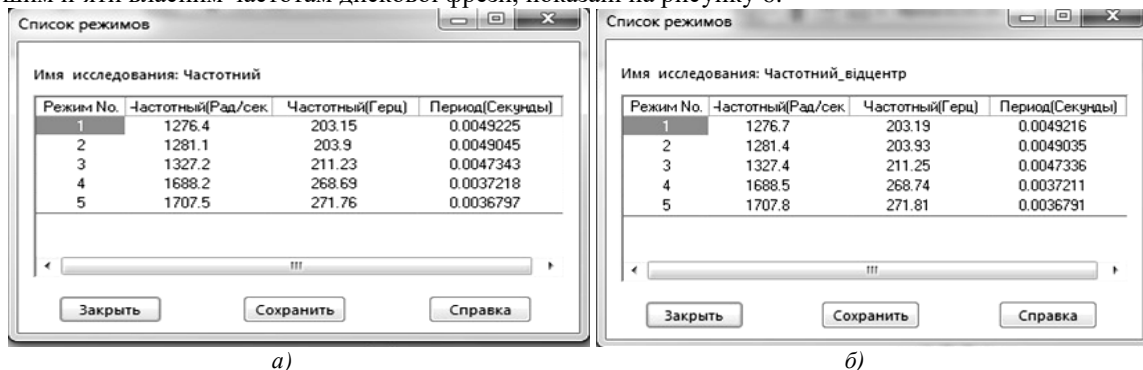


Рис.6. Результати первинного частотного аналізу з використанням вирішуючих програм:
а) FFEPlus (без врахування відцентрових сил), б) Direct sparse (з врахуванням відцентрових сил)

Прийнята частота обертання фрези складає 200 об/хв (20,94 рад/с).

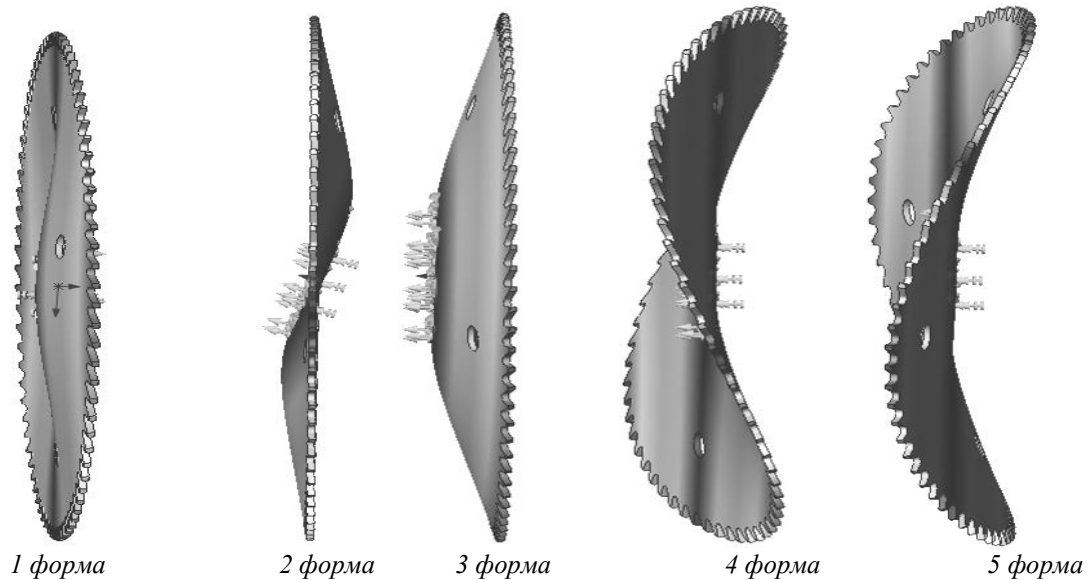


Рис. 7. Форми коливань дискової фрези, що відповідають першим п'яти власним частотам

Особливістю функціоналу модуля Simulation є те, що 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.

Параметрична оптимізація конструкції круглих компенсаційних отворів дискової фрези

Для виконання оптимізації було використано три конструктивні параметри: діаметр компенсаційних отворів, їх кількість (кількість елементів колового масиву) і радіальне розташування відносно осі обертання фрези, як це умовно показано на рис. 8, а.

В даній статичній задачі навантаженими завжди є одні і ті ж зубці фрези, а розташування компенсаційних отворів відносно зубців з реалізацією різних сценаріїв оптимізації змінюється. Така постановка задачі обумовлює зміну товщини стінки між компенсаційним отвором і впадинами навантажених зубців фрези, і як наслідок – коливання значень напружень.

У зв'язку з цим для достовірності визначення значень напружень і використанні їх як обмежень необхідно забезпечувати однакове розташування компенсаційних отворів відносно навантажених зубів фрези. Тому в даній роботі пропонується за допомогою накладення додаткових управляючих розмірів зафіксувати центр базового кола відносно навантажених зубів, як це показано на рис. 8, б. Для цього створюється допоміжна лінія – вертикальна дотична до компенсаційного отвору (рис. 8, а). При цьому величина відстані від допоміжної лінії до центра довідкової системи координат задається рівнянням 1, таким чином, дана відстань завжди рівна радіусу компенсаційного отвору фрези. Аналогічним рівнянням задається така ж відстань з іншої сторони отвору.

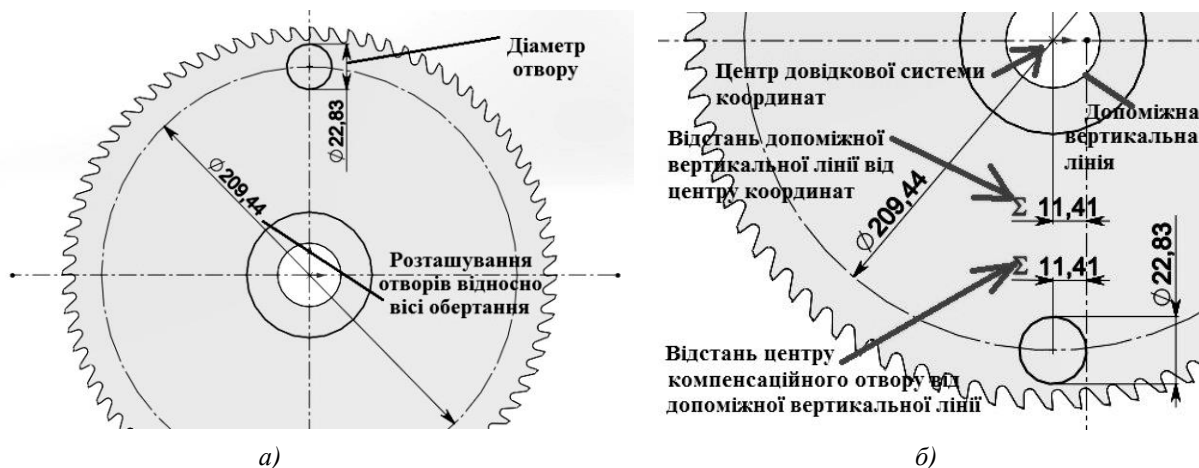


Рис. 8. Взаємозв'язки конструкційних параметрів дискової фрези:
а) схема розташування компенсаційних отворів;
б) спосіб фіксації центра базового кола компенсаційних отворів

Діапазони зміни параметрів та характеристики обмежень (датчиків) відображені в таблицях 1 та 2 (таблиці сформовані за допомогою процедури формування звітів модуля Simulation).

Таблиця 1

Параметри оптимізації

Ім'я	Тип	Значення	Одиниці вимірювання
Розташування отворів	Діапазон	Мін:170 Макс:210	mm
Діаметр отворів	Діапазон	Мін:12 Макс:24	mm
Кількість отворів	Діапазон при кроці	Мін:2.000000 Макс:12.000000 Шаг:2.000000	N/A

Оптимізаційний алгоритм після введення значень параметрів, обмежень та формування цілі генерує 13 ітерацій і запускає розрахунок.

Таблиця 2

Обмеження оптимізаційної задачі

Ім'я датчика	Умова	Границі	Одиниці вимірювання	Ім'я дослідження
Еквівалентні напруження	Менше	Макс:1112	N/mm ² (MPa)	Статичне дослідження
1-ша частота	Тільки моніторинг	-	-	Частотне дослідження
2-га частота	Тільки моніторинг	-	-	Частотне дослідження
3-тя частота	Тільки моніторинг	-	-	Частотне дослідження
4-та частота	Тільки моніторинг	-	-	Частотне дослідження

Максимальне значення (220,995 Гц) першої частоти коливання фрези (в заданих діапазонах параметрів дослідження) досягається при 12-ти компенсаційних отворах діаметром 23,82 мм, центри котрих розташовані на колі діаметром 209,6 мм. При цьому максимальні напруження, що виникають в моделі, становлять 961,72 МПа.

Таким чином вирішення оптимізаційної задачі в середовищі SolidWorks Simulation при встановлених обмеженнях допустимих напружень дозволило підвищити власні частоти дискової фрези за рахунок виконання компенсаційних отворів в середньому на 8–10 %.

Для виявлення тенденцій зміни значень власних частот фрези, базуючись на результатах оптимізаційного дослідження, додатково проведені два дослідження проектування в середовищі SolidWorks Simulation. В дослідженнях проектування були введені дискретні значення параметрів проектування: в першому дослідженні – кількість компенсаційних отворів; в другому – діаметральне розташування компенсаційних отворів.

Аналіз результатів дослідження проектування показує, що збільшення кількості отворів діаметром 23,82 мм до 17 дозволяє підвищити власні частоти, зокрема 1-шу частоту до 232,9 Гц, при цьому максимальні напруження у фрезі становлять 982 МПа, тобто умова забезпечення міцності виконується.

Графічні залежності частот власних коливань та еквівалентних напружень від кількості отворів та діаметра їх розташування показані на рисунках 9, 10.

Отримані результати (рис. 9) свідчать про поступове зростання частот власних коливань фрези при збільшенні кількості компенсаційних отворів та зростанні діаметра їх розташування. Зміна ж еквівалентних напружень не є плавною, графічна залежність (рис. 10) дає можливість виділити діапазон зміни зазначених факторів, на якому напруження різко зростають, і, який може бути небезпечним.

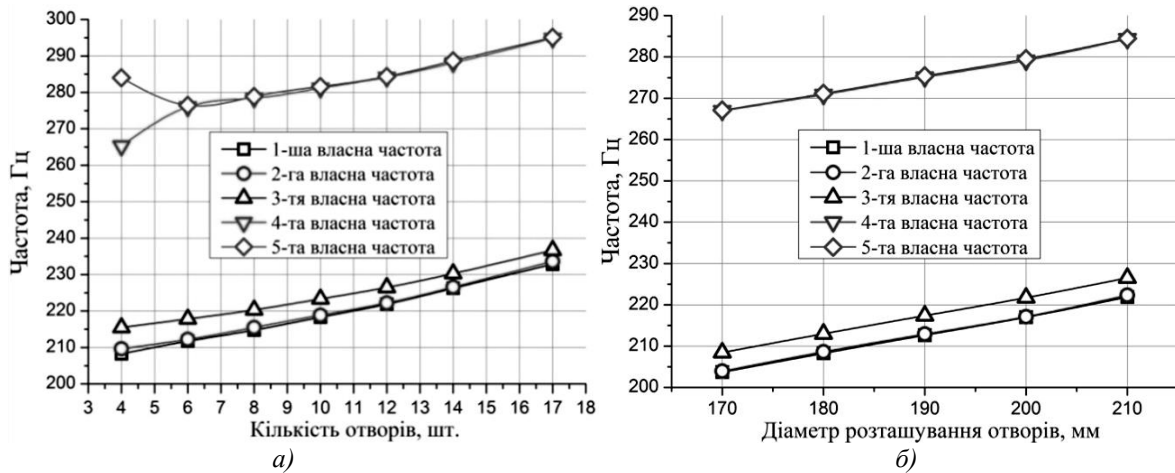


Рис. 9. Залежність власних частот фрези від кількості отворів (а) та їх розташування відносно вісі обертання фрези (б)

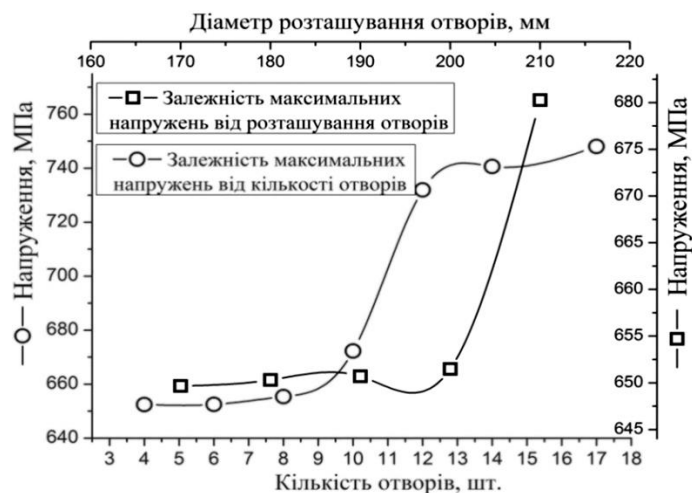


Рис. 10. Залежність величини еквівалентних напружень від кількості отворів (а) та діаметра колового масиву множини отворів (б)

Висновки та перспективи подальших досліджень.

1. Достатньо якісне вирішення розрахункових інженерних задач загального, важкого та середнього машинобудування можливе з використанням САЕ пакетів «середніх» САПР, в зв'язку з цим відпрацювання алгоритму інженерного аналізу в середовищі SolidWorks Simulation має як прикладне так і наукове значення.

2. Визначено можливість підвищення динамічної стійкості дискових фрез за рахунок зміни частот їх власних коливань шляхом виготовлення круглих компенсаційних отворів в їх диску.

3. Показані особливості формування кінцево-елементних моделей для статичних міцнісних та частотних досліджень дискової фрези.

4. Розроблена інженерна методика та проведена параметрична оптимізація конструкції круглих компенсаційних отворів дискової відрізної фрези (діаметр 250 мм, товщина 2,5 мм, кількість зубців 80) в середовищі SolidWorks Simulation для підвищення частот власних коливань фрез при забезпеченні їх міцності (коефіцієнт запаса міцності – 2,5). Це дозволило отримати оптимальні конструктивні параметри компенсаційних отворів: діаметр кола отворів 23,82 мм, кількість отворів 17 (максимальна з вказаного діапазону), діаметр колового масиву множини отворів 209,6 мм. При цьому перша власна частота зростає з 203,15 до 232,87 Гц.

5. Проведено аналіз впливу кількості отворів та діаметра колового масиву множини компенсаційних отворів з діаметром 23,82 мм на значення перших п'яти частот власних коливань дискової фрези. Встановлено, що власні частоти дискової фрези зростають при збільшенні їх діаметра, їх кількості та діаметра їх розташування.

6. В подальших дослідженнях планується дослідити вплив компенсаційних отворів на динамічні характеристики дискових фрез та оцінити достовірність отриманих результатів за допомогою експериментальних досліджень.

Список використаної літератури:

1. Сквозное проектирование сборного режущего инструмента / В.Малыгин, П.Перфильев, М.Худяков, Н.Лобанов // САПР и графика. – 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://sapr.ru/article/7991>.
2. Бажанова А.Ю. Моделі та методи аналізу пружно-дисипативних систем в САПР : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.12 / А.Ю. Бажанова. – Одеса, 2015. – 146 с.
3. Козлова О.С. Современные тенденции развития САПР в механике / О.С. Козлова, С.И. Гоменюк // Вісник Запорізького національного університету. Серія : Фізико-математичні науки. – 2014. – № 1. – С. 38–51.
4. Алямовский А.А. COSMOS Works. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks / А.А. Алямовский. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 784 с.
5. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. – СПб : БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
6. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А.А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
7. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А.А. Алямовский. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.
8. ANSYS Workbench and ANSYS Design Explorer // ANSYS. – 2012. – Access mode : <https://support.ansys.com/staticassets/ANSYS/Conference/Confidence/San%20Jose/Downloads/optimization-design-explorer-7.pdf>.
9. Журавков М.А. Использование пакетов Ansys Workbench, Adams, Visual Nastran и Pro/ENGINEER для исследования механики роботов / М.А. Журавков, О.В. Громыко, А.А. Царева. – Минск : БГУ, 2010. – С. 209–214.
10. Lombard M. Design Optimization in Solid Edge / M.Lombard // Siemens. – 2017. – Access mode : <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Solid-Edge-Blog/Design-Optimization-in-Solid-Edge/ba-p/389500>.
11. Исследования проектирования в SolidWorks // Dassault Systèmes. – 2014. – Access mode : http://help.solidworks.com/2014/russian/SolidWorks/sldworks/c_Design_Studies_in_SolidWorks.htm?id=28972ac315024e9c99a52518e8a68de3#Pg0&ProductType=&ProductName=.
12. Балицька Н.О. Підвищення працездатності прорізних фрез : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / Н.О. Балицька. – К., 2015. – 25 с.
13. Балицька Н.О. Працездатність дискових пил, відрізних та прорізних фрез / Н.О. Балицька // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2011. – № 4 (59). – С. 3–6.
14. Балицька Н.О. Динамічна стійкість відрізних та прорізних фрез / Н.О. Балицька // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2011. – № 2 (73). – С. 3–5.
15. Панчук В.Г. Теоретичні основи проектування відрізних фрез : дис. докт. техн. наук : спец. 05.03.01. – К., 2009. – 285 с.
16. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер. – Москва : Металлургия, 1969.

References:

1. Malygin, V., Perfil'ev, P., Khudyakov, M. and Lobanov, N. (2010), «Skvozhnoe proektirovanie sbornogo rezhushchego instrumenta», available at: <http://sapr.ru/article/7991>
2. Bazhanova, A.Yu. (2015), *Modeli ta metody analizu pruzhno-dissipativnykh sistem v SAPR*, dissertation, Odesa, 146 p.
3. Kozlova, O.S. and Gomenyuk, S.I. (2014), «Sovremennyye tendentsii razvitiya SAPR v mekhanike», *Visnik Zaporiz'kogo natsional'nogo universitetu*, No 1, pp. 38–51.
4. Alyamovskiy, A.A. (2010), *COSMOS Works. Osnovy rascheta konstruktсий na prochnost' v srede SolidWorks*, DMK Press Publ., Moskva, 784 p.
5. Alyamovskiy, A.A., Sobachkin, A.A., Odintsov, E.V., Kharitonovich, A.I. and Ponomarev, N.B. (2008), *SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike*, BKhV-Peterburg Publ., SPb, 1040 p.
6. Alyamovskiy, A.A. (2010), *Inzhenernyye raschety v SolidWorks Simulation*, DMK Press Publ., Moskva, 464 p.
7. Alyamovskiy, A.A. (2012), *SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskie zadachi*, BKhV-Peterburg Publ., SPb, 448 p.
8. «ANSYS Workbench and ANSYS Design Explorer», available at: <https://support.ansys.com/staticassets/ANSYS/Conference/Confidence/San%20Jose/Downloads/optimization-design-explorer-7.pdf>.
9. Zhuravkov, M.A., Gromyko, O.V. and Careva, A.A. (2010), «Yspol'zovanye paketov Ansys Workbench, Adams, Visual Nastran y Pro/ENGINEER dlja yssledovaniya mehanyky robotov», BGU, pp. 209–214.
10. Lombard, M. (2017), «Design Optimization in Solid Edge», available at: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Solid-Edge-Blog/Design-Optimization-in-Solid-Edge/ba-p/389500>
11. «Issledovaniya proektirovaniya v SolidWorks», available at: http://help.solidworks.com/2014/russian/SolidWorks/sldworks/_Design_Studies_in_SolidWorks.htm?id=28972ac315024e9c99a52518e8a68de3#Pg0&ProductType=&ProductName=
12. Balytska, N.O. (2015), *Pidvyshhenniya pracezdatnosti proriznyh frez*, Kyi'v, 25 p.
13. Balytska, N.O. (2011), «Pracezdatnist' diskovyh pyl, vidriznyh ta proriznyh frez», *Visnyk ZDTU, Serija Tehnichni nauky*, Vol. 59, pp. 3–6.
14. Balytska, N.O. (2011), «Dynamichna stijkist' vidriznyh ta proriznyh frez», *Visnyk ZDTU, Serija Tehnichni nauky*, Vol. 73, pp. 3–5.
15. Panchuk, V.G. (2009), *Teoretychni osnovy proektuvannya vidriznyh frez*, Kyi'v, 285 p.
16. Adler, Yu.P. (1969), *Vvedenie v planirovanie eksperimenta*, Metallurgiya, Publ., Moscow, 276 p.

Мельник Олександр Леонідович – доцент кафедри галузевого машинобудування Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- інтегровані CAD/CAE системи в конструкторських задачах;
- вуглецеві наноматеріали;
- електропровідні композиційні матеріали.

Балицька Наталія Олександрівна – доцент кафедри прикладної механіки і комп'ютерно-інтегрованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- теорія проектування різальних інструментів;
- процеси фрезерування;
- методи підвищення працездатності різальних інструментів.

Серов Володимир Володимирович – доцент кафедри галузевого машинобудування Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- удосконалення вимірювальної техніки та металорізальних верстатів;
- теплотехнічні процеси в машинобудуванні;
- технологія виробництва заготовок деталей машин.

Соловійов Андрій Володимирович – аспірант кафедри галузевого машинобудування Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- точність металорізальних верстатів;
- комп'ютерне моделювання металорізальних верстатів та інструментів.

Стаття надійшла до редакції 04.10.2017.