

---

---

# Наука і сучасні технології

---

---

УДК 004.942:621.941-26

## КОМП'ЮТЕРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙ ПРИ ТОКАРНІЙ ОБРОБЦІ НАФТОГАЗОВИХ РІЗЬБ

Л.О. Боруцак, Б.Р. Шуляр, С.Л. Боруцак

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727126;  
e-mail: xzysytk@gmail.com

*Різьби нафтогазового профілю отримують, як правило, шляхом точіння. При цьому якість різьбової поверхні (шорсткість, хвилястість) значною мірою залежать від рівня вібрацій, що виникають в системі верстату, інструменті та деталі (системі різання). Дослідниками вивчались переважно причини появи вібрацій як наслідок процесу різання.*

*Автори статті розглянули можливість виникнення коливань елементів системи різання внаслідок появи резонансу. Останні можливі з наближенням частот збурюючих сил при різанні та власних частот коливань елементів системи різання (різець, різцетримач, супорт та інші вузли). З цією метою було створено твердотільні моделі основних деталей та вузлів системи різання в середовищі SolidWorks та проведено комп'ютерні дослідження щодо визначення резонансних частот коливань елементів та системи загалом з використанням додатка Simulation. Отримані дані дозволять технологам уникнути призначення частот обертання шпинделя верстата, при яких різко зростає імовірність виникнення інтенсивних низькочастотних вібрацій великої амплітуди.*

Ключові слова: точіння, різьбова поверхня, система різання, вібрація.

*Резьбы нефтегазового профиля получают, как правило, путем точения. При этом качество резьбовой поверхности (шероховатость, волнистость) существенно зависят от уровня вибраций, возникающих в системе станка, инструмента и детали (системе резания). Исследователями изучались преимущественно причины возникновения вибраций как следствие собственно процесса резания.*

*Авторы статьи рассмотрели возможность возникновения колебаний элементов системы резания вследствие возникновения резонанса. Последние могут возникать с приближением частот возмущающих сил при резании и собственных частот колебаний элементов системы резания (резец, резцедержатель, суппорт и другие узлы.) С этой целью были созданы твердотельные модели основных деталей и узлов системы резания в среде SolidWorks и проведены компьютерные исследования по определению резонансных частот колебаний элементов и системы в целом с использованием приложения Simulation. Полученные данные позволят технологам избежать назначения частот вращения шпинделя станка, при которых резко возникает вероятность появления низкочастотных вибраций большой амплитуды.*

Ключевые слова: точение, резьбовая поверхность, система резания, вибрация.

*Oil and gas threads are usually obtained by turning. The quality of the thread surface (roughness, waviness) greatly depends on the vibration level that emerge in a working machine, a tool or component (cutting system). The researchers have been studying the reasons of the vibrations in the course of cutting.*

*The possibility of the elements vibrations of the cutting system as a result of resonance formation has been studied. These vibrations are possible by means of the forcing frequencies during cutting and natural frequencies of the cutting system elements (a chisel, a tool post, a toolplate and other components). Solid models of the main cutting system components and units in SolidWorks environment have been developed. The computerized research of defining the vibration resonance frequencies of the elements and the system as a whole with the use of Simulation application has been conducted. The obtained data allow engineers to avoid the frequency assignment of the work spindle rotation, during which there is a possibility of emerging the low frequency vibrations of high amplitudes.*

Key words: turning, thread surface, cutting system, vibration.

## Вступ

У сучасному нафтогазовому машинобудуванні, зокрема при механічній обробці замкових різьб, вирішення проблеми підвищення продуктивності і якості оброблюваних поверхонь виходить на перший план. При цьому значно зростає роль оптимального використання динамічних процесів, які суттєво впливають на стійкість процесу різання в технологічних системах. Щоб одержати високу точність та якість обробленої поверхні і не знизити стійкість інструмента, не можна допускати виникнення надмірних коливань системи “верстат-пристрій-інструмент-деталь” (ВПД), тобто процес різання має бути вібростійким. Вібrazioї погіршують якість оброблюваної поверхні, прискорюють зношення і руйнування інструмента, знижують точність і довговічність верстата і пристрою. Особливе значення мають віброrazioї при різанні важкооброблюваних матеріалів, з яких виготовляють бурові замки, корпуси інструментів тощо.

Виникнення віброrazioї при обробці різанням характеризується збуджуючими силами і властивостями пружної системи, а співвідношення між цими параметрами визначає як можливість виникнення віброrazioї, так і їх інтенсивність. Протистояти появі значних віброrazioї можна лише з глибоким вивченням цього явища.

На даний час існує багато приладів і методик для експериментального вивчення віброrazioї у системах різання із застосуванням різноманітних давачів сигналу, перетворюючих, реєструючих та візуалізуючих приладів, що дає змогу встановити параметри віброrazioї. На даний час розроблено програмні продукти у вигляді моделей твердотільних систем, що дають змогу проводити віртуальні дослідження на схильність об'єктів до віброrazioї.

Однією з таких програм є модуль Simulation програми Solid Works, що дозволяє встановлювати резонансні частоти коливань окремих деталей та вузлів системи різання, визначати максимальні амплітуди деформацій окремих елементів та конструкції загалом, а також виконати візуалізацію коливного процесу з кольоровою диференціацією амплітуд. Характерною особливістю програми є можливість проведення досліджень як у вільному стані, так і з прикладанням окремих видів навантажень до елементів системи (сила, крутний момент, тиск тощо).

З результатів аналізу наукових джерел стало відомо, що досліджень з одночасним проведенням натурних експериментів та комп'ютерного моделювання віброrazioї системи ВПД, по суті, не було. В той же час дуже цікавим і актуальним є визначення основних причин появи коливань.

Коливання, або ж віброrazioї, можуть бути як вимушеними – виникати під впливом постійнодіючої збуджуючої сили, так і вільними – внаслідок вільних коливань системи, які можна дослідити і описати комп'ютерними дослідженнями. Таким чином, **об'єктом нашого до-**

**слідження** є віброrazioї в процесі токарної обробки, а **предметом дослідження** – параметри віброrazioї: амплітуда, частота і віброприскорення).

## Аналіз літературних джерел з теми дослідження

У сучасному машинобудуванні при вирішенні проблеми підвищення продуктивності механічної обробки і якості оброблюваних поверхонь викликало посилення ролі оптимального використання динамічних процесів, які суттєво впливають на стійкість процесу різання в технологічних системах.

Динамічна система токарного верстата, на якому нарізають різьби нафтогазового сортаменту, утворюється сукупністю пружної системи (ПС) верстата і процесів, які виникають під час обробки різанням, та їх взаємодією. ПС складається з верстата, пристосування, інструмента і деталі, а процеси включають різання, тертя тощо. Технологічна система верстата є замкнутою. Розв'язання задач, пов'язаних з динамікою описаних явищ, в першу чергу, спрямовано на забезпечення умов стійкого руху інструменту і заготовки, тобто на усунення віброrazioї. При цьому основним є забезпечення умов для отримання різьбової поверхні з мінімальними похибками, максимальним економічним ефектом обробки та забезпечення достатньої довговічності верстата. Обов'язковою умовою отримання якісної поверхні при застосуванні високопродуктивних режимів є стійкість руху при різанні. Для цього технологічна система повинна бути вібростійкою і не допускати істотних коливань.

Коливання, що виникають в процесі обробки різанням, поділяються на два види: вимушені і самозбудні. Вимушені коливання з'являються під впливом зовнішніх причин, до яких відносять: уривчастість характеру процесу різання; дисбаланс обертових частин верстата; дефекти механізмів частин верстата; нерівномірність і уривчастість припуску, залишеного на обробку; передачу коливань верстата від інших працюючих верстатів або машин. Усунути вимушені коливання не складно [1, 5].

Самозбудні коливання або автоколивання виникають при відсутності видимих зовнішніх причин. До них відносяться такі коливання, при яких змінна сила, яка підтримує коливальний процес, створюється і управляється самими коливаннями.

Автоколивання постійно виникають при обробці деталей. Основними причинами їх появи є: мінливість сил тертя між поверхнею, по якій сходить стружка, та різцем, а також між різцем і заготовкою; нерівномірне зміцнення зрізаного шару за його товщиною; непостійність швидкості наросту товщини, що призводить до зміни товщини наросту; недостатня жорсткість системи тощо.

Щодо першопричини виникнення автоколивань в пружній системі верстата єдина точка зору відсутня. Досвідом добре підтверджується гіпотеза Н.І. Ташлицького [9]. Вона полягає в

тому, що при врізанні леза інструменту в деталь товщина зрізаного шару зростає, а під впливом відштовхуючих сил – зменшується, миттєва сила різання при врізанні буде дещо меншою, а при відштовхуванні – дещо більшою величини миттєвої сили, відповідної миттєвої товщини зрізаного шару. Таким чином, первинним джерелом енергії збудження автоколивань при різанні є нерівномірність сили різання через запізнювання зміни сили різання при зміні товщини зрізаного шару внаслідок взаємного зближення і віддалення інструменту та деталі в процесі різання. Не зважаючи на короткочасність процесу врізання, він чинить збудливу дію на підсистему “інструмент – деталь” і може при недостатній її жорсткості викликати коливання.

Однак автоколивання не можуть підтримуватися в результаті тільки зміни миттєвої товщини зрізаного шару при взаємному зближенні та віддаленні інструменту і деталі в процесі різання. Адже при рівномірності миттєвої сили різання робота, що здійснюється нею за цикл різання і відходу леза, не залежить від амплітуди і частоти коливань і дорівнює нулю.

Дослідження А.П. Соколовського [3] довели, що сила різання при врізанні різця в метал не дорівнює силі різання при виході різця з металу. Експериментально було доведено нерівномірність зміни сили різання з переміщенням, тобто наявність зсуву по фазі між ними при коливаннях. Він пояснив це тим, що при вході леза інструменту в метал воно рухається по недеформованому металу, а при виході – по частково деформованому. Тому величина сили різання буде неоднаковою при вході і виході різця з металу. Цим і зумовлюється поява змінної сили, що підтримує коливання. Тієї ж точки зору при поясненні появи вібрацій дотримувалися А.Л. Воронов, Л.С. Мурашкін, Тобайс, Фішвік і М.Є. Ельясберг [4,6,7,8,11]. Останній автор зробив спробу фізичного пояснення факту зміни складових сили різання при подібних переміщеннях.

Ільницький І.І. [2], розглядаючи вплив змінних сил, що підтримують коливання, вирішив віднести змінну силу, яка виникає у зв'язку із зміною робочих кутів різального інструменту в процесі вібрації, до розряду первинних сил, оскільки вона формується з виникненням первинних коливань. Причиною виникнення вібрації автор вважає силу, що підтримує автоколивання, позитивна робота якої буде сумірною з роботою сил, що перешкоджають виникненню автоколивань. При розгляді можливих сил першої групи автор приходять до висновку, що після збуджуючого впливу процес коливань підтримується, в основному, змінною силою, що виникає у зв'язку зі зміною переднього кута при коливаннях заготовки, і змінною силою, що виникає у зв'язку з періодичною зміною заднього кута (при коливаннях різця).

Проте в роботі Н.А. Дроздова [4] вказується, що на низьких і середніх частотах коливань (а в більшості випадків автоколивання виникають саме на цих частотах) вплив зміни кутів

інструменту при його зміщенні несуттєвий. Він стає істотним при обробці крихких матеріалів і в області коливань з високою амплітудою.

У роботі В.А. Кудінова [1,6] розглядаються питання руху інструменту і заготовки при токарній обробці. Наявність багатьох ступенів свободи пружної системи призводить до того, що коливання інструмента відносно заготовки є результатом накладання кількох пов'язаних між собою найпростіших коливань. Стосовно токарного верстата маємо систему з двома ступенями свободи. У цьому випадку накладаються два поступальних коливання. Між цими коливаннями існує той чи інший зсув у часі (фазовий зсув), тому сумарна траєкторія руху інструмента і заготовки має форму замкненої кривої у вигляді еліпса.

Рухаючись по еліпсу переміщень, різець змінює товщину шару, що зрізається, а отже, і силу різання таким чином, що при русі в сторону дії сили різання знімається шар більшої товщини, ніж при русі інструмента назустріч силі різання. Робота, що здійснюється силою різання, витрачається на подальший розвиток коливань. Вібрації наростають до тих пір, доки дисипативні сили не компенсують повністю сили різання. Встановлюються стабільні коливання автоколивання з частотою, яка визначається властивостями самої коливальної системи і близькою до однієї з власних частот коливань системи.

Аналіз впливу вібраційних слідів на стійкість динамічної системи дозволив встановити такі особливості регенеративних автоколивань:

1) обробка слідами вібрацій знижує граничне значення ширини зрізаного шару (граничну стружку) не менше, ніж у два рази (верхня межа цього зменшення не обмежена) [3,7,10];

2) динамічна система, що є стійкою за відсутності запізнювання (при обробці «по чистому»), залежно від величини запізнювання може ставати нестійкою або залишатися стійкою (із збільшенням часу запізнювання зони стійкої і нестійкої роботи верстата чергуються) [12,15,17];

3) нестійка динамічна система при різанні «по чистому» внаслідок впливу слідів може набути стійкості [18,20].

На думку Ю.Г. Кабардіна, збурення при врізанні інструменту в заготовку слід вважати первинною змінною початкового стану системи. При цьому траєкторія руху різального леза інструмента, як зазначалося вище, описує у фазовому просторі стійкий граничний цикл. В результаті врізання реалізується режим м'якої втрати початкової стійкості ПС. Внаслідок зношування інструменту і рухомих з'єднань, відбувається перерозподіл енергії зовнішнього впливу через зміну властивостей підсистем пружної системи. В результаті подальших змін формотворна траєкторія руху різального леза ускладнюється, граничний цикл стає нестійким, а режим роботи обладнання – хаотичним. При цьому реалізується жорсткий режим втрати стійкості пружної системи на певному інтервалі роботи технологічної системи. У результаті ро-

бота сил різання в основному трансформується у внутрішню енергію, а частина її витрачається на незгасаючі коливання. При цьому було встановлено, що чим менша в'язкість матеріалу, тим більша амплітуда коливань пружної системи.

В основі теорії А.І. Кашіріна [5,16] лежить спадаюча залежність сили різання від швидкості. Це особливо проявляється у порівняно в'язких матеріалів.

Узагальнюючи описане вище, можемо стверджувати:

- первинним джерелом енергії збудження автоколивань при різанні є нерівномірність сили різання внаслідок запізнювання зміни сили різання при зміні товщини зрізаного шару через зближення і віддалення інструменту і деталі в процесі різання;

- інтенсивність вібрацій суттєво залежить від положення переднього кута різця. Даний вплив починає простежуватися при обробці матеріалів, які мають невисоку пластичність, а також в області високих частот. Зменшення переднього кута призводить до збільшення зони швидкостей різання, при яких виникають вібрації із зростаючою амплітудою автоколивань.

- із збільшенням головного кута в плані амплітуда коливань зменшується, що пов'язано із зменшенням ширини зрізаного шару і збільшенням товщини. Задній кут, якщо він більший 8-10°, на інтенсивність вібрацій істотного впливу не чинить. Зменшення заднього кута до значень, менших 3°, зменшує амплітуду коливань;

- наростоутворення і зрив нестійкого наросту призводять до періодичності стружкоутворення і зміни сили різання. Періодичний зрив наросту є автоколивальним явищем, в якому коливання верстата взаємодіють з автоколиваннями процесу різання. Причому амплітуда автоколивань має максимум при швидкості різання, що перевищує швидкість, при якій нарост має максимальну величину. При великих і менших швидкостях різання амплітуда автоколивань зменшується. При зміні жорсткості пружної системи відповідно змінюється амплітуда автоколивань: при зменшенні жорсткості вона зростає. Аналогічним чином змінюються амплітуди і при збільшенні ширини зрізаного шару. Однак зриви наросту не є основною причиною виникнення автоколивань. Даний висновок підтверджується і тим, що при обробці металів, які не схильні до наростоутворення, автоколивання таки відбуваються. Вплив стружкоутворення на стійкість процесу різання залежить від типу оброблюваного матеріалу;

- слід, що залишається різцем на поверхні різання, є «механізмом», який передає енергію коливання системі. Зворотній зв'язок між переміщеннями системи і силою різання здійснюється через елемент запізнювання, яким є поверхня різання. Перехідний процес розвитку автоколивань по сліду при точінні відбувається за 10-12 оборотів заготовки, після чого встановлюється постійний рівень автоколивань. Для поширених конструкційних матеріалів коливання на кожному наступному обороті відста-

ють від коливань попереднього обороту на величину від 0.1 до 0.25 довжини хвилі коливань, що пояснюється відставанням сили різання від зміни припуску. Сила різання викликає пружні відтискання заготовки від різця, при цьому утворюється слід на поверхні різання із зсувом фази коливань. Порівняння величини зсуву коливань з фазовою характеристикою сили різання показало, що вони близькі один до одного. Відставання зміни сили різання від зміни припуску чинить істотний вплив на розвиток автоколивань. При досягненні величиною запізнювання значення, близького до періоду коливання технологічної системи, відбувається три-чотириразове збільшення амплітуди коливань, тому що при цьому системі передається максимум енергії на підтримання коливань.

### Постановка задачі і методів досліджень

З вищесказаного можемо зробити висновок, що всі дослідження причин появи вібрацій при токарній обробці спрямовані на вивчення їхньої інтенсивності та характеру залежно від технологічних параметрів обробки та геометричних і конструкційних параметрів інструменту. В той же час вплив на вібраційні процеси фізико-механічних, конструктивних та розмірних характеристик окремих деталей та вузлів системи ВПД практично на розглядався. На нашу думку, вказані характеристики можуть суттєво впливати на можливість виникнення вібрацій та їхню інтенсивність.

На даному етапі розвитку IT-технологій створено достатньо програмного забезпечення, яке дозволяє не тільки створити віртуальні 3D моделі матеріальних об'єктів (наприклад, деталей і вузлів машинобудування), а й провести з цими моделями дослідження як статичного, так і динамічного характеру. Також можна дослідити коливальні властивості систем.

Одним з таких редакторів є програма SOLIDWORKS з додатком Simulation. Перша дає можливість створити практично будь-які віртуальні моделі твердотільних об'єктів, а другий призначений для виконання над цими об'єктами різноманітних досліджень, включаючи задачі теплообміну тощо. Зокрема, в категорії вібрацій можна встановити частоти власних коливань як окремих складових, так і механічної системи загалом. Доцільно зауважити, що при цьому ми можемо встановити не тільки резонансні частоти коливань, а й гармоніки до десятого порядку. В наших дослідженнях обмежимося гармоніками четвертого порядку.

Отже, метою нашого дослідження є вивчення коливних процесів під час токарної обробки різьбових поверхонь деталей нафтогазового обладнання. При цьому необхідно вирішити наступні задачі:

- провести огляд літератури та проаналізувати результати досліджень коливань, що виникають при токарній обробці;

- виявити характер і частотний спектр коливань різця (як елемента системи ВПД, що формує оброблену поверхню) із застосуванням

вимірного комплексу, що включає п'єзоелектричний давач вібрацій та аналоговий прилад для визначення віброприскорення;

- провести дослідження системи ВПІД токарного верстату із використанням модуля Simulation програми Solid Works для встановлення значень резонансних частот коливань системи, амплітуд та напрямку коливань її окремих елементів;

- зіставити дані експериментальних і комп'ютерних досліджень і зробити висновок про можливість застосування комп'ютерних технологій для вивчення вібрацій при токарній обробці деталей нафтогазового обладнання та інструментів.

### Комп'ютерні дослідження вібрацій при токарній обробці

Авторами статті проводились дослідження вібрацій токарного різця при точінні поверхні під замкову різьбу з використанням давача вібросигналу KD13, аналогового віброметра VM-20 та широкосмугового осцилографа С1-77. Нами були зафіксовані вібрації різця у звуковому діапазоні частот від 80 до 2000 Гц. При цьому частота і амплітуда вхідного сигналу залежала здебільшого від робочої частоти обертання шпинделя верстату.

### Створення 3D моделей системи ВПІД та окремих її елементів у середовищі SOLID WORKS

Попередньо ми отримали осцилограми вібрацій верхньої частини різцетримача у напрямі дії радіальної складової сили різання, по суті вздовж осі різця, встановили значення основних частот цих вібрацій, орієнтовні частоти вищих гармонік та форму коливань. Щоб виконати поставлені задачі, необхідно у середовищі SOLID WORKS створити 3D моделі складових системи ВПІД і системи загалом, а потім застосувати додаток Simulation для визначення амплітудно-частотних характеристик системи.

Створимо тривимірні моделі токарного різця, різцетримача, супорта, станини, правої електротумби, коробки передач і коробки подач, передньої бабки, шпинделя та заготовки з круглого прокату з реальними розмірами. Модель задньої бабки не виконуємо, оскільки при точінні заготовки в трикулачковому патроні без підтримки центром остання практично лежить на станині і суттєвого впливу на коливальний процес не має. Окрім того, приймемо припущення, що різцетримач є монолітним, оскільки при роботі різець кріпиться із значним зусиллям, і всі зазори у ньому вибрані також під дією радіальної складової сили різання. Коробки подач, швидкостей, електротумба і передня бабка виконані порожнистими з товщинами стінок згідно з конструкцією верстата. На рисунках 1-9 зображено вигляд створених моделей.

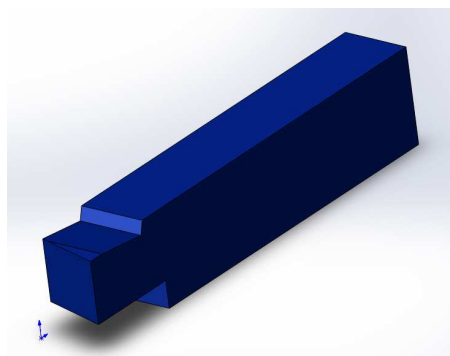


Рисунок 1 – Тривимірні моделі токарного прохідного різця

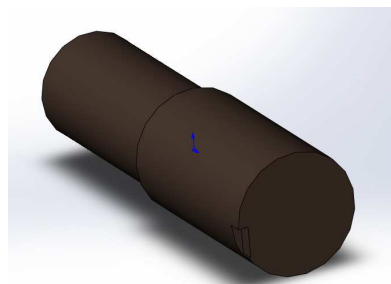


Рисунок 2 – Тривимірні моделі заготовки бурового замка з круглого прокату

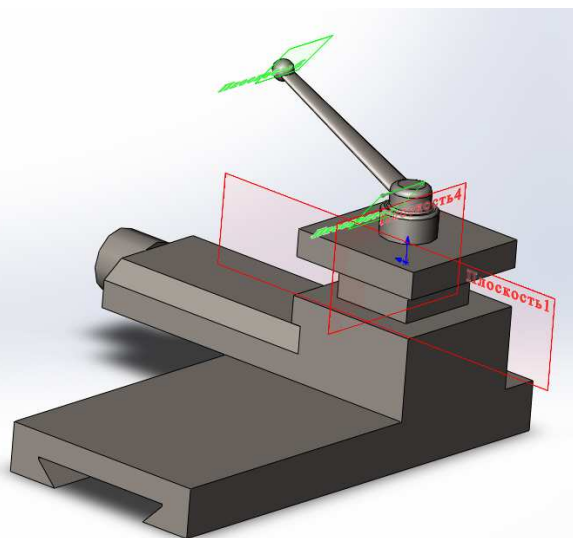


Рисунок 3 – Тривимірні моделі різцетримача

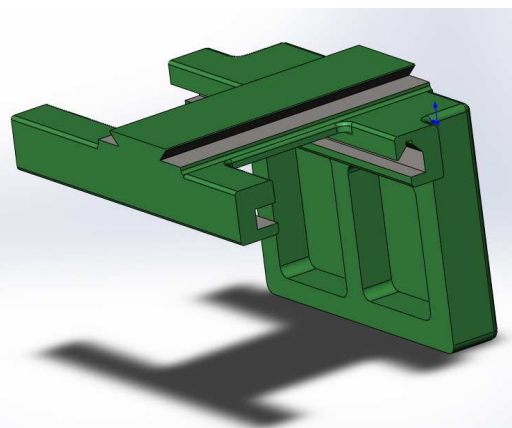


Рисунок 4 – Тривимірні моделі супорта

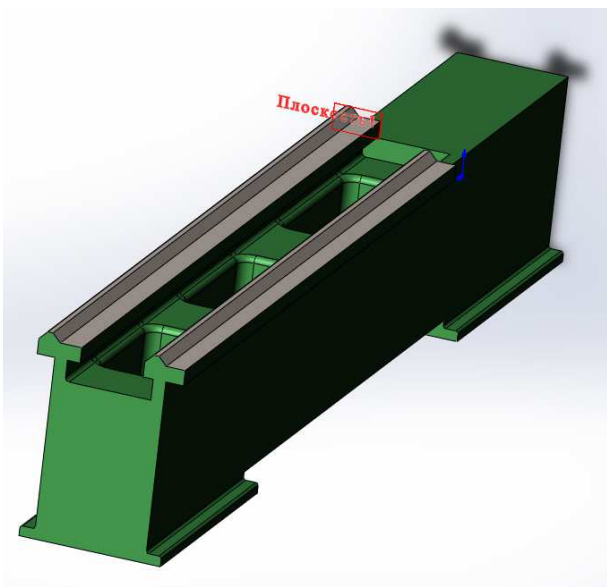


Рисунок 5 – Тривимірна модель станини токарно-гвинторізного верстата

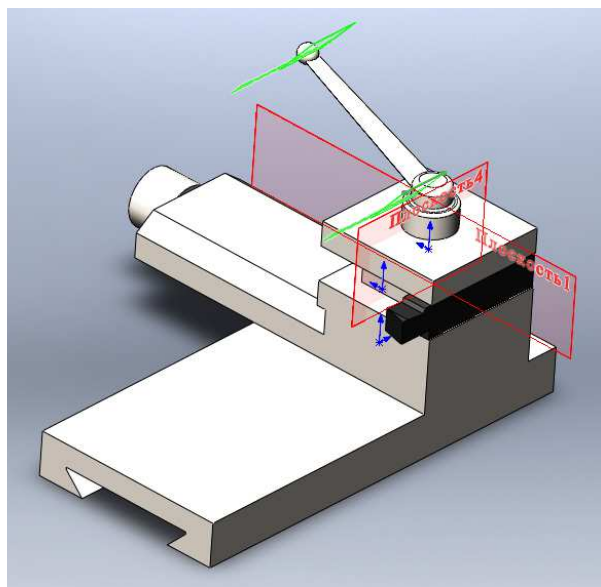


Рисунок 8 – Тривимірна збірна модель різця і різцетримача

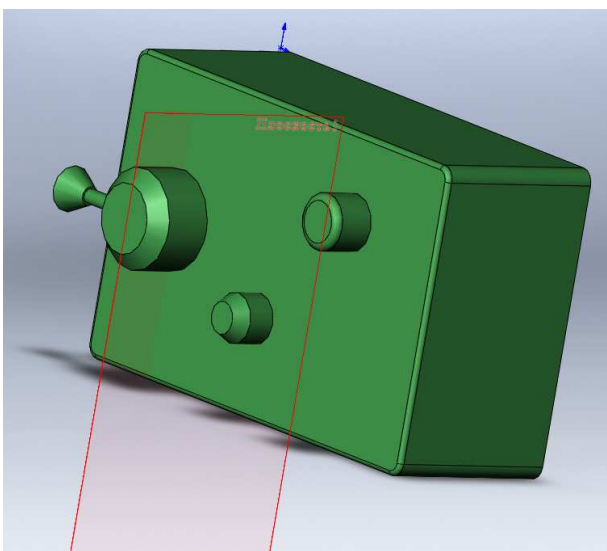


Рисунок 6 – Тривимірна модель коробки подач

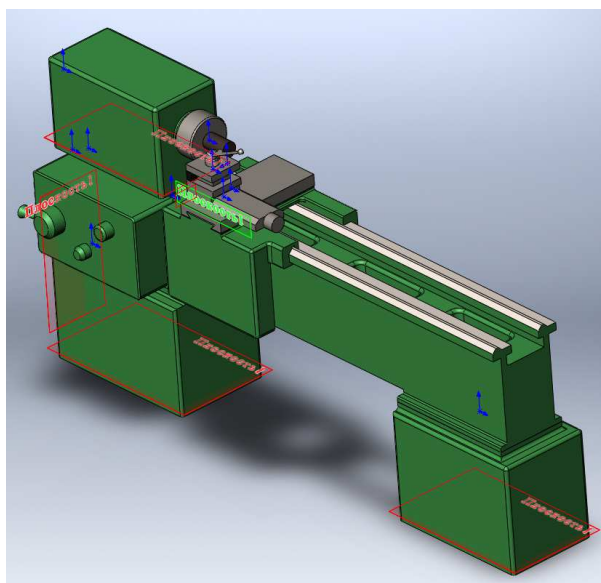


Рисунок 9 – Тривимірна збірна модель токарно-гвинторізного верстата 1A616

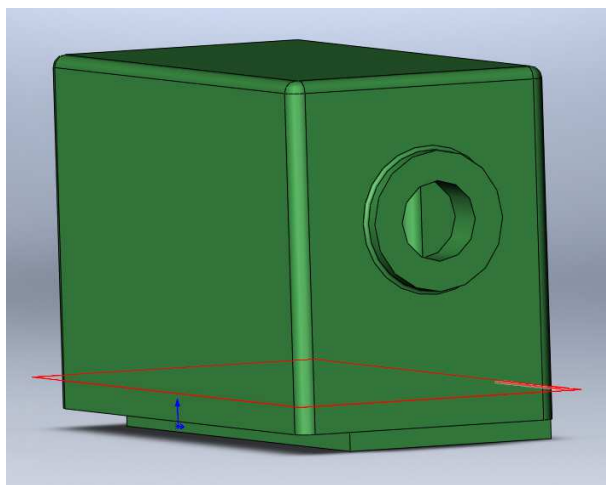


Рисунок 7 – Тривимірна модель передньої бабки

Моделі решти конструктивних елементів є досить простими, тож їхнє зображення окремо ми не подаємо.

#### Методика виконання комп'ютерних досліджень характеристик вібрацій у додатку Simulation

Додаток до програми SOLID WORKS дозволяє виконати частотні дослідження тривимірних моделей і збірок твердотільних об'єктів з використанням скінченно-елементного аналізу розмірних і масових параметрів об'єктів з врахуванням силових факторів, що діють на елементи системи. Для проведення досліджень необхідно виконати кілька етапів:

- присвоїти кожному з елементів системи характеристики реального матеріалу, з якого він виконаний;

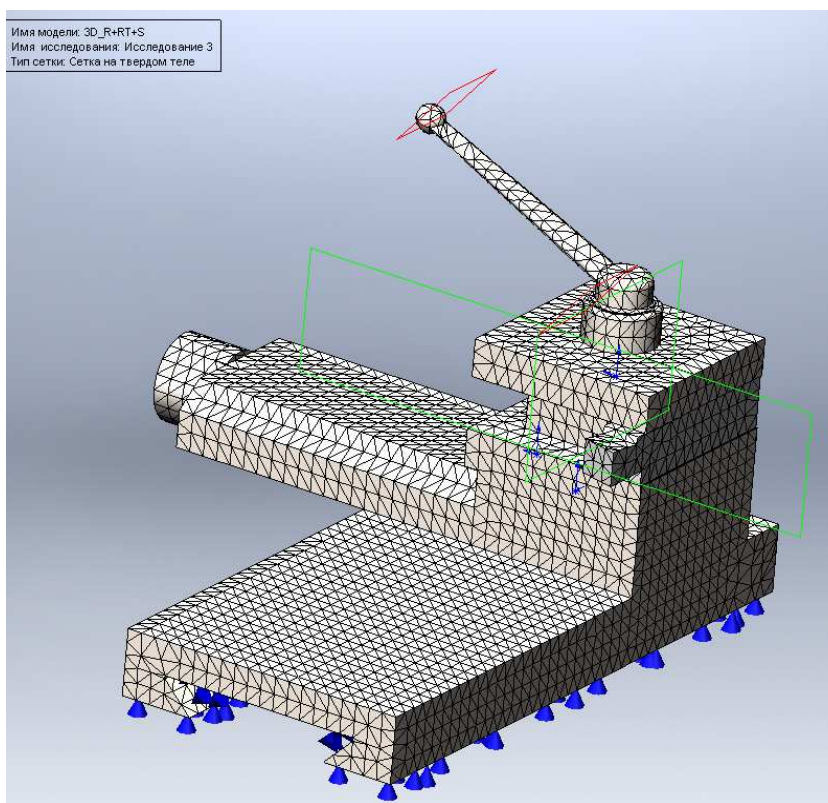


Рисунок 10 – Модель збірки, характер закріплення та сітка елементів

- задати типи спряжень у збірці (характер контакту між окремими компонентами), у нашому випадку це глобальний контакт, що не допускає взаємного проникнення елементів і виключає їхнє взаємне переміщення один відносно одного;

- визначаються умови закріплення елемента або окремих компонентів збірки – жорстке, ковзне, пружне тощо;

- прикладаються силові фактори – сили, крутні моменти, тиски, розподілене навантаження тощо;

- створюється у твердотільних моделях сітка скінчених елементів (бажано мінімального розміру), що підвищує точність і достовірність розрахунків;

- виконується розрахунок параметрів процесу.

В наших дослідженнях розглянемо дві збірки – різець з різцетримачем без прикладання сили різання, змонтований на поперечних напрямних супорта з певним зазором, що дає нам можливість використати опцію пружної підвіски. Метою виконання цього етапу є встановлення ряду резонансних частот вібрацій (низької і високої частоти) вузла як монолітної конструкції і порівняти ці частоти з отриманими даними лабораторних експериментів – параметрами осцилограм.

На наступному етапі досліджень розглядаємо систему ВПІД у загальному випадку та з прикладанням тангенційної складової сили різання. Іншими складовими можемо знехтувати. На цьому етапі розглянемо два варіанти:

- жорстке закріплення верстата на основі, що дасть можливість виявити частоти і внутрішні переміщення елементів та вузлів системи;

- пружний монтаж верстату на віброопорах, що дасть змогу оцінити глобальні переміщення системи. Її деформації і частоти коливань.

Порівняння результатів дасть змогу оцінити роль способу монтажу обладнання на рівень вібрацій про обробці.

### Результати виконання комп'ютерних досліджень характеристик вібрацій

#### Дослідження локальної збірки різець – різцетримач

Задамо характеристики матеріалів компонентів збірки: для різця – інструментальна сталь, для різцетримача – конструкційна сталь, аналог сталі Сталь35Л, задамо пружний контакт по поверхнях напрямних різцетримача та створимо сітку елементів. Результат зображено на рис. 10.

Після виконання обчислень ми отримаємо значення ряду резонансних частот коливань вибраної системи (п'ять значень) у Герцах, переміщення елементів збірки у п'яти напрямках (моди переміщень) у міліметрах.

Нас цікавитимуть два основних напрями – вертикальний (підсакування різцетримача, особливо при зношених напрямних) та перевіряння відносно напрямних. Результати обчислень зображені на рис. 11-12.

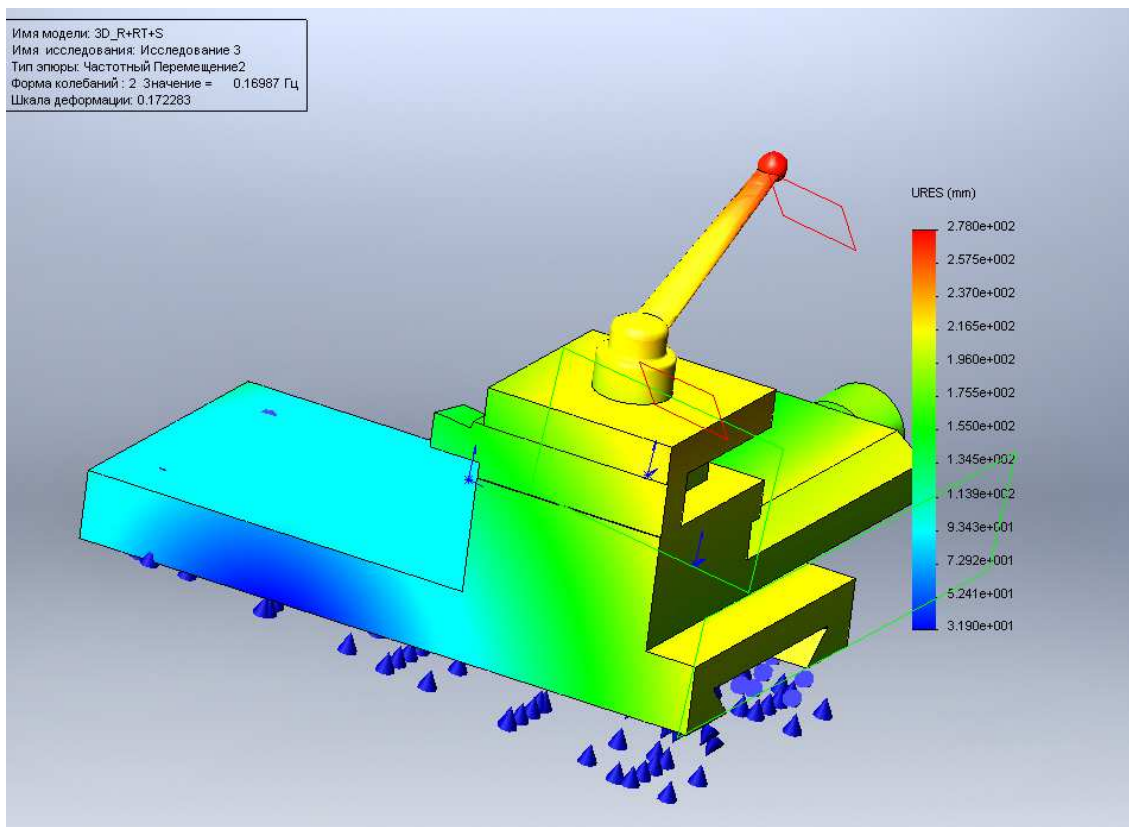


Рисунок 11 – Результати переміщень вузла у вертикальному напрямі

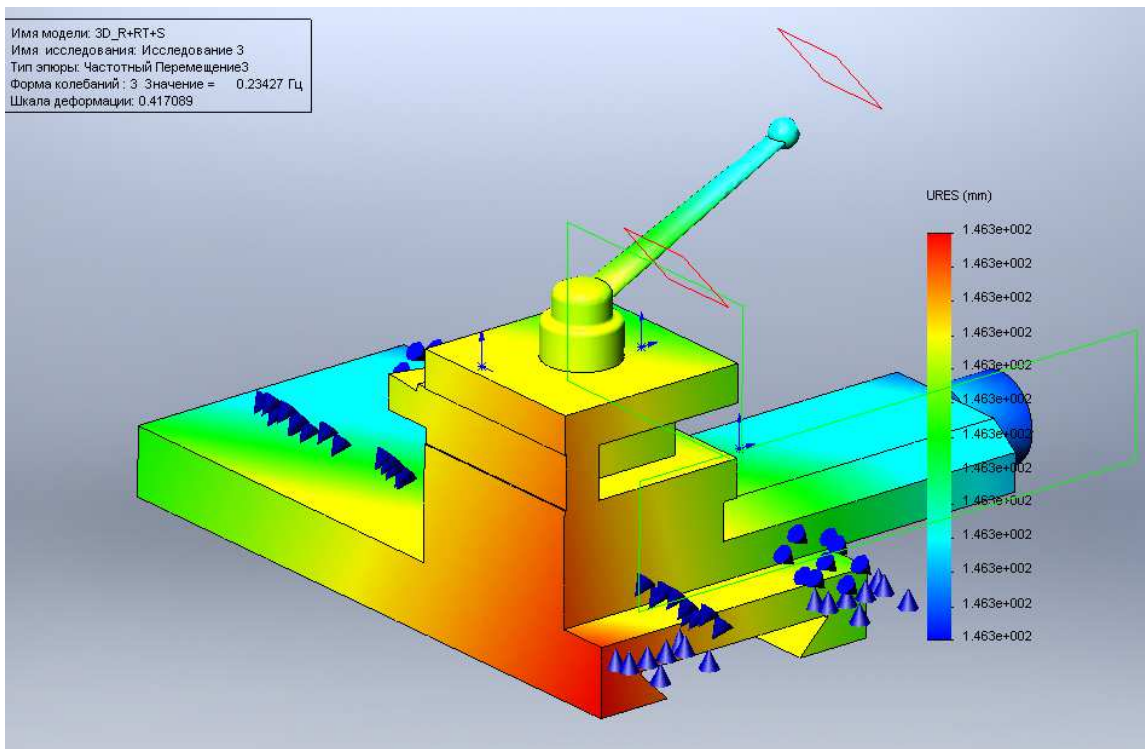


Рисунок 12 – Результати повертання відносно напрямних

Нами отримано резонансні частоти коливань вузла, рівні 0,127, 0,163, 0,234, 0,237 та 0,316 Гц при максимальній амплітуді коливань крайніх точок 278 та 146 мм відповідно.

Порівнюючи ці дані з частотами на осцилограмах, можемо зробити висновок про мінімальний вплив масово-частотних характеристик вузла на параметри вібрацій різця, зокрема через реальні умови його закріплення.



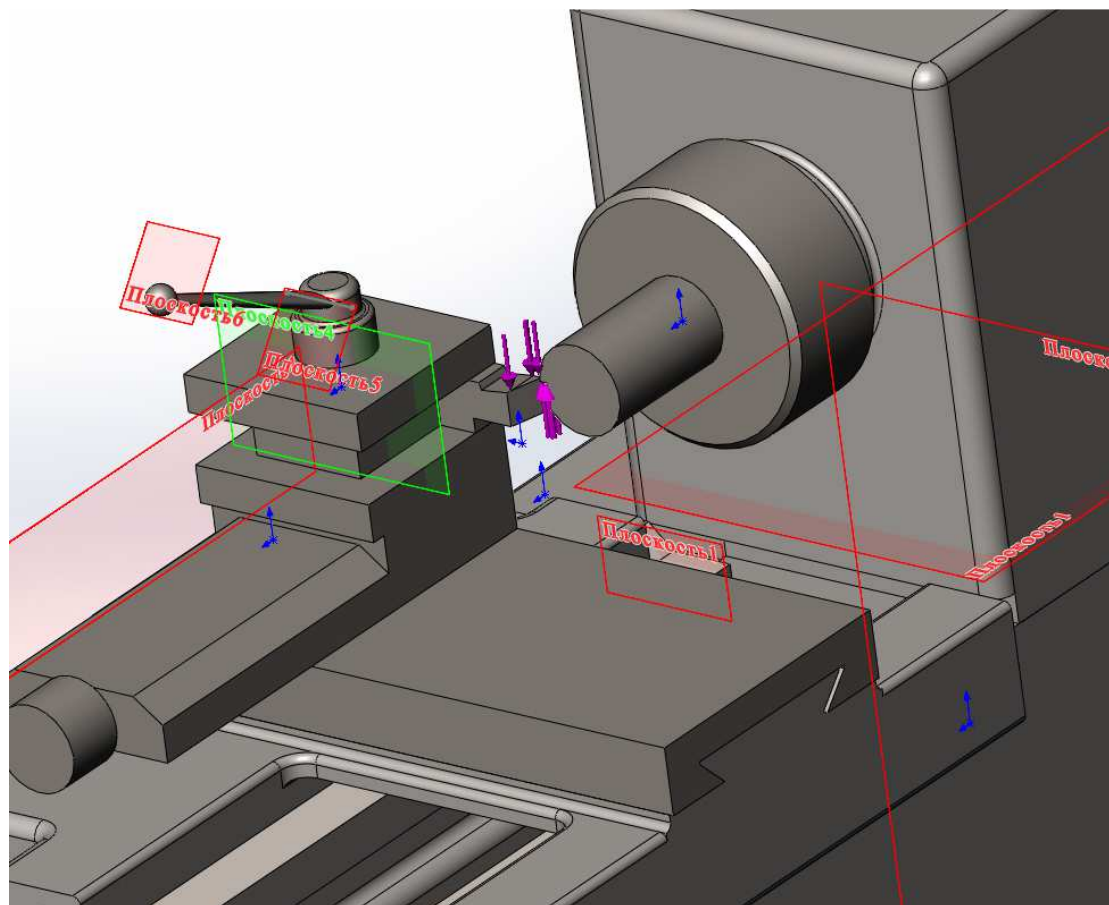


Рисунок 13 – Прикладення сили до різця і заготовки

**Дослідження збірки верстата у загальному вигляді**

Для виконання досліджень прикладемо тангенційну складову сили різання, рівну за величиною та протилежну за напрямом, до передньої поверхні різця і, відповідно, до заготовки. Також задамо умови закріплення збірки – жорстке встановлення на фундаменті та монтаж на віброопорах (рисунки 13-17).

При виконанні сітки елементів теж намагось надати їм мінімального розміру для отримання більш точних результатів.

Резонансні частоти отримали значення 148, 228, 268, 297 та 298 Гц, що корелюється із значеннями частот, отриманих за осцилограмами процесу точіння. Максимальні переміщення окремих елементів збірки становлять відповідно 5,0 та 3,1 мм. Як бачимо, дані переміщень нерéalні.

**Дослідження збірки при монтажі верстата на віброопорах**

Схема монтажу та створення сітки елементів зображені на рис. 18-19.

Отримані значення резонансних частот становлять 0,00047, 0,00049, 0,00064, 0,15 та 0,43 Гц, що досить ймовірно. В той же час ми отримали значення переміщень окремих елементів збірки у першому, другому, четвертому та п'ятому напрямках відповідно 2,46, 2,46, 3,43, 4,77 та 3,47 мм (рис. 20-23).

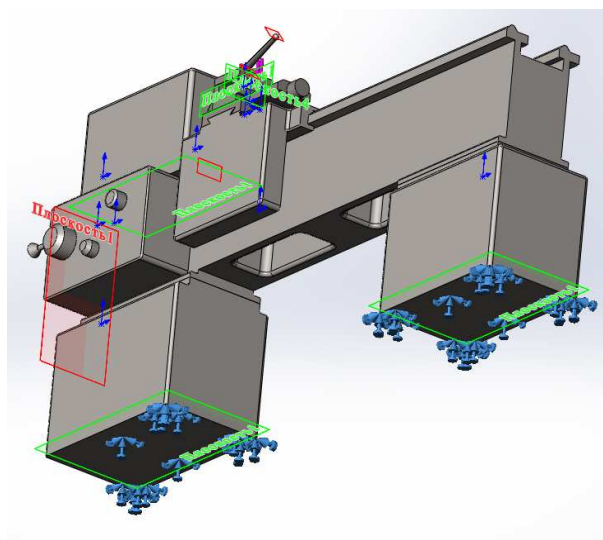


Рисунок 14 – Схема жорсткого монтажу верстата на фундаменті

Під час проведення експериментів таких коливань верстата, заготовки або інструменту не спостерігалось, очевидно з тієї причини, що частоти збуджуючих сил, які могли б виникати внаслідок руху елементів привода верстата та кінематичних ланок за рахунок дисбалансу обертових мас, є набагато вищими за отримані дані.

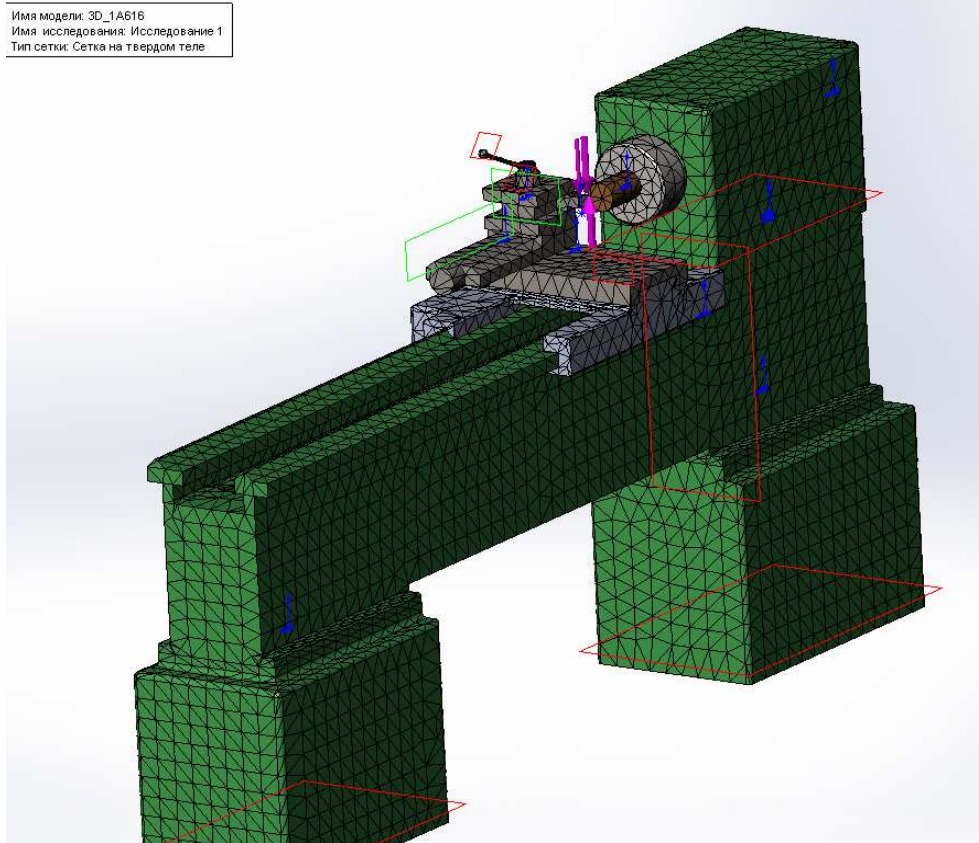


Рисунок 15 – Створення сітки скінчених елементів у збірці для досліджень

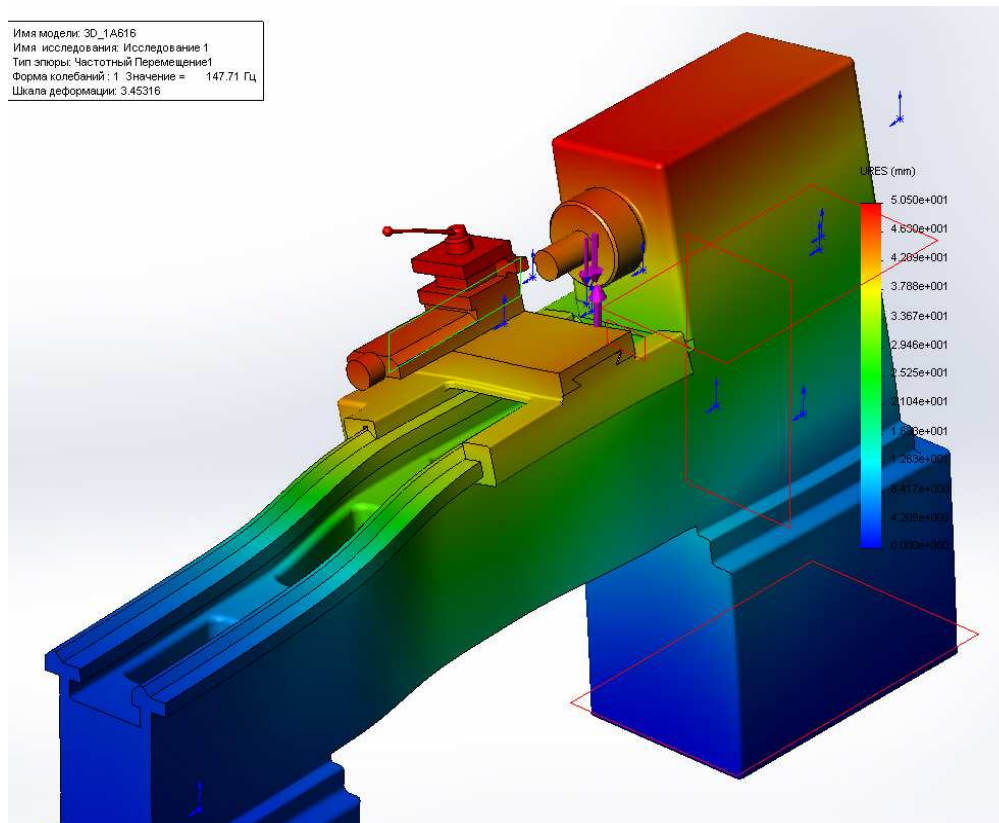


Рисунок 16 – Результати розрахунку резонансних частот та епюри переміщень елементів системи ВПД при скручуванні станини та жорсткому монтажі верстата

Имя модели: 3D\_1A816  
 Имя исследования: Исследование 1  
 Тип элюры: Частотный Перемещение3  
 Форма колебаний: 3 Значение = 267.88 Гц  
 Шкала деформации: 0.901648

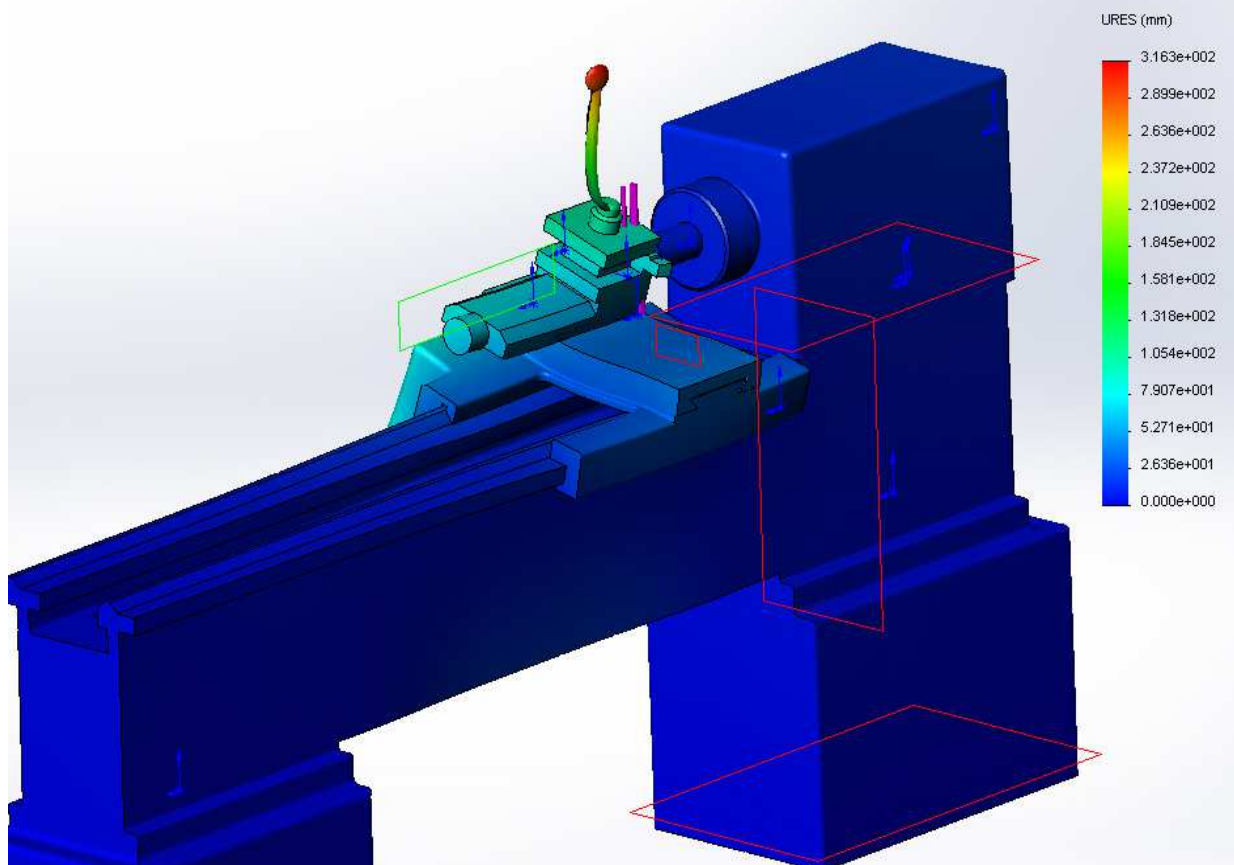


Рисунок 17 – Результати розрахунку резонансних частот та епюри переміщень елементів системи ВПД у нормальному до осі шпинделя напрямі при жорсткому монтажі верстата

Имя модели: 3D\_1A816  
 Имя исследования: Исследование 2  
 Тип сетки: Сетка на твердом теле

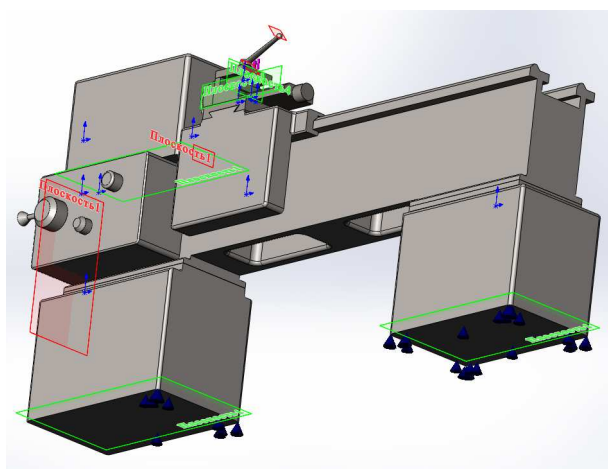


Рисунок 18 – Схема монтажу верстата на віброопорах

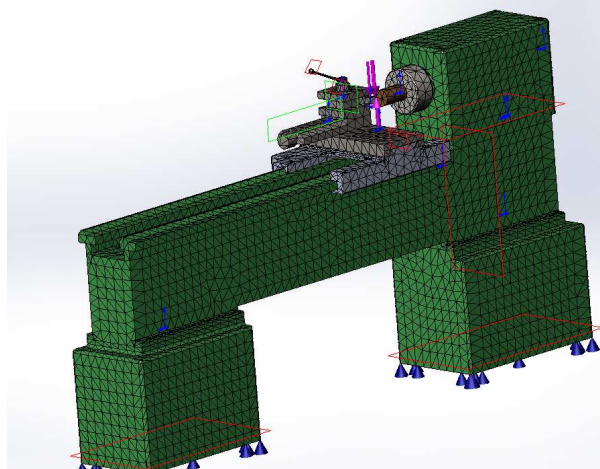


Рисунок 19 – Створення сітки елементів при монтажі верстата на віброопорах

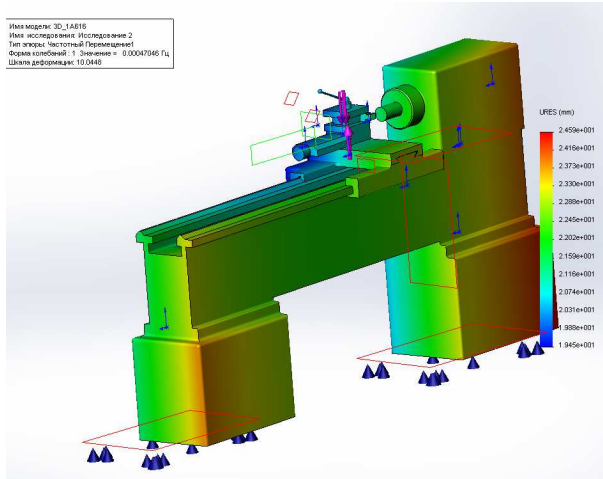


Рисунок 20 – Епюра переміщень елементів верстата у першому напрямі

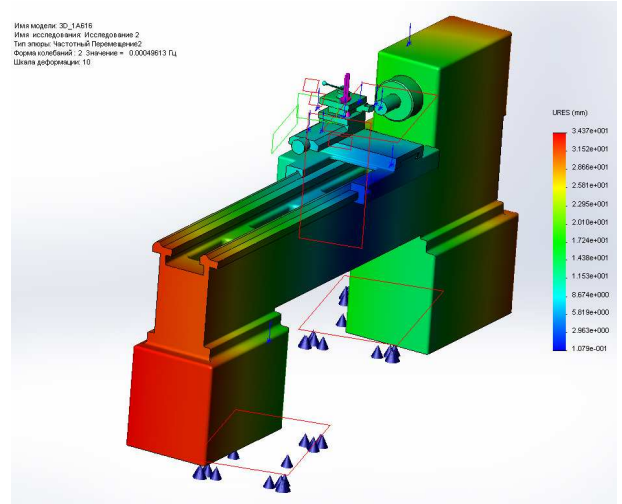


Рисунок 21 – Епюра переміщень елементів верстата у другому напрямі

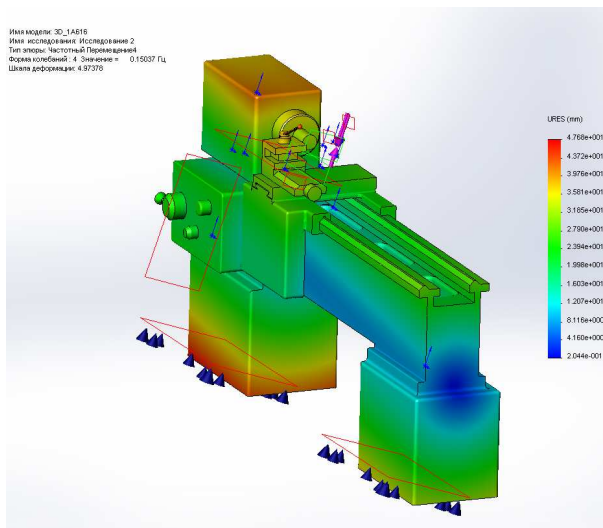


Рисунок 22 – Епюра переміщень елементів верстата у четвертому напрямі

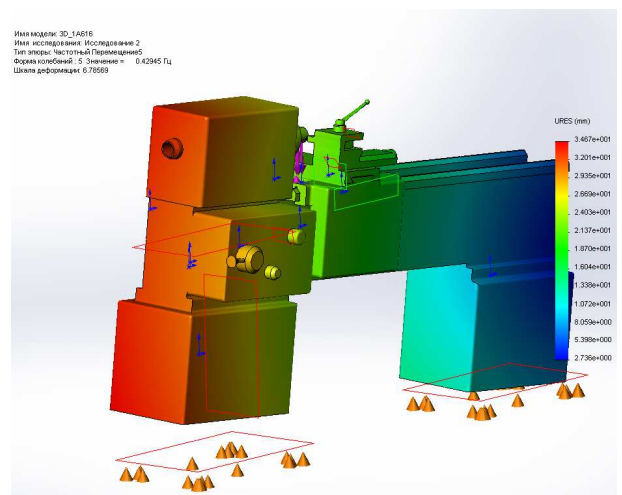


Рисунок 23 – Епюра переміщень елементів верстата у п'ятому напрямі

Проведені авторами дослідження мають практичну цінність, оскільки дозволяють встановити недопустимі для обробки в конкретних умовах режими різання.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що основним джерелом вібрацій різця, які були зафіксовані експериментальним шляхом, є сам процес різання металів. Цей процес відбувається в умовах динамічних навантажень і тому вимагає застосування комплексних і більш тонких методів досліджень.

### Висновки

Експериментально отримано осцилограми та значення частот вібрацій токарного різця як замикаючої ланки технологічної системи ВПД;

Величини і характер отриманих результатів свідчать, що до появи вібрацій при токарній обробці призводять, в основному, динаміка процесів, що виникають саме в зоні різання, жорсткість замикаючих компонентів системи

ВПД та нестабільність кінематичних процесів у приводах токарно-гвинторізного верстата.

Рівень власних коливань окремих вузлів та системи ВПД загалом настільки невисокий, що цих коливань не було зафіксовано нашими приладами в лабораторних експериментах. Очевидно, в системі відсутня дія збурюючих сил з частотами, близькими до резонансних частот коливань системи;

Комп'ютерні дослідження вібрацій при токарній обробці в пакеті програм SolidWorks дозволяє з достатнім рівнем точності встановити резонансні частоти коливань окремих складових та системи ВПД загалом.

Отримані результати комп'ютерних досліджень дають можливість уникнути призначення таких частот обертання шпинделя верстата, при яких можливі резонансні явища і, як наслідок, суттєве погіршення якості обробки та навіть руйнування окремих вузлів.

Література

- 1 Кудинов В.А. Динамическая характеристика резания / В.А. Кудинов // Станки и инструмент. – 1963. – № 10.
- 2 Ильницкий И.И. Колебания в металло-режущих станках и пути их устранения / И.И. Ильницкий. – М. Свердловск. Машгиз, 1958.
- 3 Асташев В.К. О моделях возбуждения колебаний при резании металлов / В.К. Асташев, Г.К. Корендяев // Вестник научно-технического развития. – 2012. – № 5 (57).
- 4 Дроздов Н.А. К вопросу о вибрации станка при токарной обработке / Н.А. Дроздов // Станки и инструмент. – 1937. – № 22.
- 5 Каширин А.И. Исследование автоколебаний при резании металлов / А.И. Каширин. – М.-Л.: изд-во АН СССР, 1944.
- 6 Кудинов В.А. Автоколебания на низких и высоких частотах и устойчивость движений при резании / В.А. Кудинов // Станки и инструмент. – 1997. – № 2.
- 7 Альбрехт П. Автоколебания при резании металлов / П. Альбрехт // Конструирование и технология машиностроения. – 1962. – № 3. – С. 11-25.
- 8 Ташлицкий Н.И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов / Н.И. Ташлицкий // Вестник машиностроения. – 1960. – № 2.
- 9 Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение, 1987. – 184 с.
- 10 Воронов АЛ. Высокочастотные вибрации резца при точении / АЛ. Воронов. – М.: Оборонгиз, 1956.
- 11 Кудинов В.А. Схема стружкообразования (динамическая модель процесса резания) / В.А. Кудинов // Станки и инструмент. – 1992. – № 10.
- 12 Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – М.: Машиностроение, 1986. – 179 с.
- 13 Дас М. Автоколебания станков: пер. с англ. Кушнир З.Ф. // Автоматические линии и металлорежущие станки. – 1982. – Вып. 17. – С 10-18.
- 14 Эльясберг М.Е. Основы теории автоколебаний при резании металлов / М.Е. Эльясберг // Станки и инструменты. – 1962. – № 10, № 11.
- 15 Бармин Б.П. Вибрации и режимы резания / Б.П. Бармин. – М.: Машиностроение, 1972. – 71 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
06.12.16

Рекомендована до друку  
професором **Карнашем М.О.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. фіз.-мат. наук **Осипчуком М.М.**  
(Прикарпатський національний університет,  
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)