



НДР 2606п



Цифрові технології оптимального управління процесами механічного оброблення деталей з аеродинамічними твірними і поверхнями

Науковий керівник роботи Юрій ПЕТРАКОВ



Номер державної реєстрації роботи: 0123U102058

Терміни та тривалість виконання роботи:

Тривалість роботи 24 місяці

Початок *30.03.2023*

Закінчення *31.12.2024*

Обсяги фінансування роботи:

Загальний обсяг фінансування:

за запитом (заявкою) *1275 тис. грн*

фактичний *546 тис. грн. у 2023 році*

Обсяг фінансування звітнього етапу:

за запитом (заявкою) *615 тис. грн*

фактичний *546 тис. грн.*



Мета і задачі дослідження

Метою проекту є розроблення нової технології цифрового управління металорізальними верстатами з ЧПК, що реалізує оптимальне безвібраційне оброблення і створення програмного модуля, який може функціонувати в парі з будь якою САМ системою і on-line, безпосередньо на верстаті з ЧПК, що дозволить вийти на принципово новий рівень виконання операцій оброблення різанням деталей машин з максимально можливою продуктивністю при безумовному виконанні вимог за якістю.



Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити метод визначення каркасно-піксельної моделі заготовки на кожному проході за аналізом управляючої програми у G-кодах;
- розробити чисельні методи моделювання процесу різання за траєкторіями формоутворення, що ідентифіковані з управляючої програми у G-кодах, для визначення головної характеристики процесу – MRR;
- розробити цифрові методи оптимізації процесів різання;
- розробити математичні моделі процесу різання для різних видів оброблення (точіння, фрезерування, шліфування тощо) з урахуванням обробки за слідом та із застосуванням багатомасових динамічних моделей з відповідною кількістю ступенів свободи;



- створити програмне забезпечення для чисельного моделювання і прогнозування сталості (stability) технологічної обробної системи;
- створити прикладну програму чисельного моделювання в часовому і частотному діапазонах з відповідними критеріями сталості;
- створити програмний кіберфізичний модуль, що реалізує комбіноване управління за апіорною та поточною інформацією;
- провести експериментальну перевірку теоретичних результатів і сформулювати практичні рекомендації до використання на виробництві.

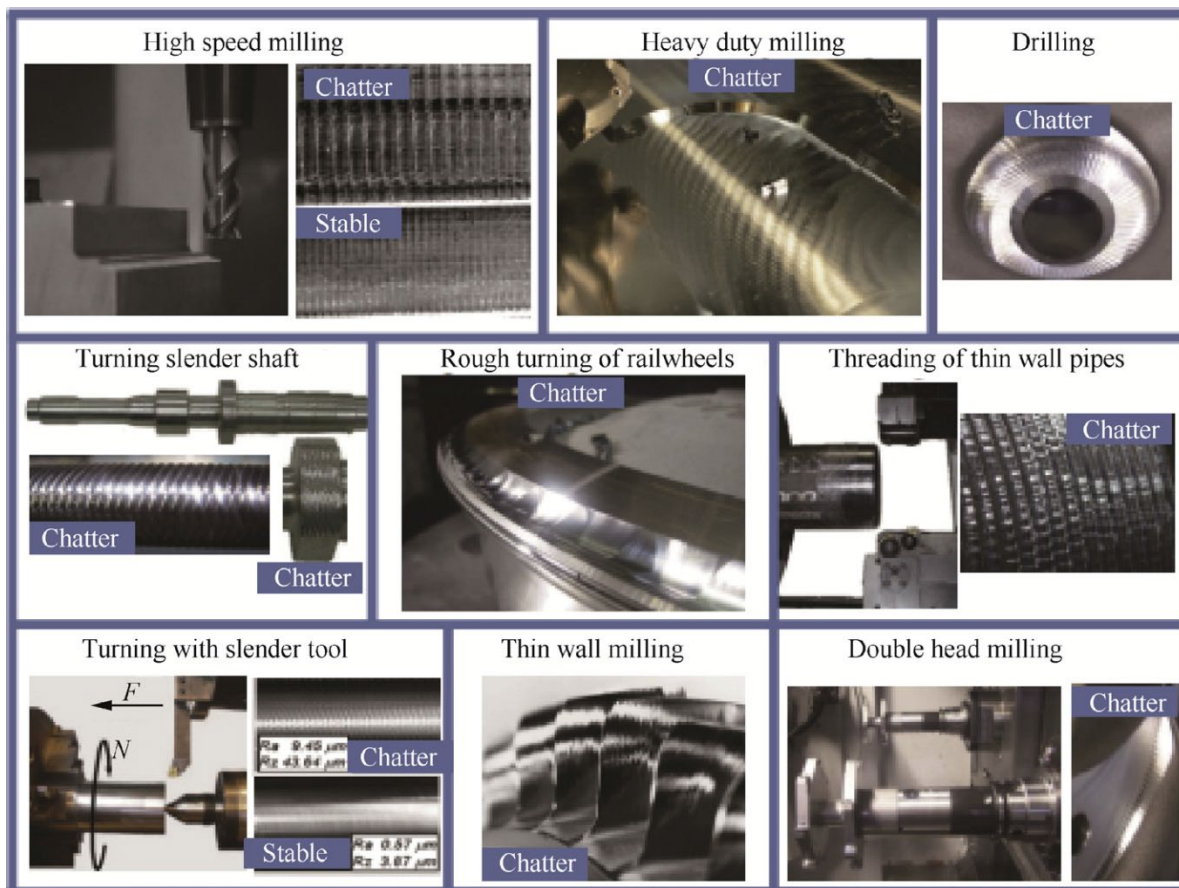


Процес різання відбувається в замкненій пружній обробній системі і завжди супроводжується вібраціями.

Вібрації при різанні стають основним обмеженням продуктивності процесу виготовлення деталей.

Тому забезпечення сталості різання є надзвичайно актуальною науково-технічною проблемою, вирішення якої дозволить значно підвищити ефективність будь-якого процесу оброблення деталей різанням.

Chatter problem in cutting processes



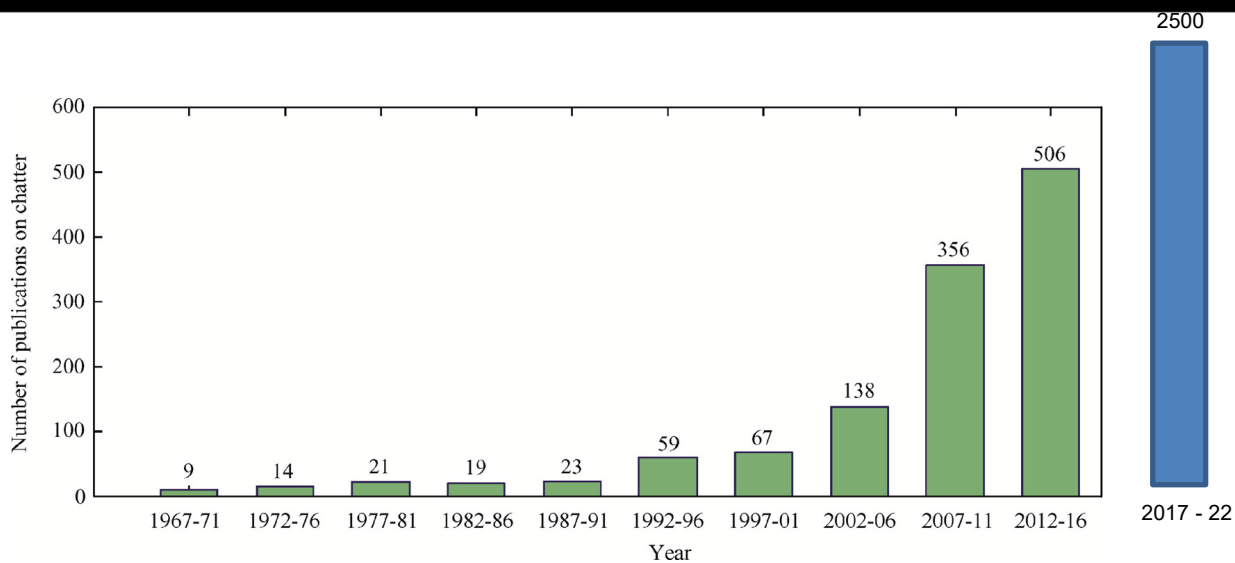


Chinese Journal of Aeronautics, (2019), 32(2): 215–242



Chinese Society of Aeronautics and Astronautics
& Beihang University
Chinese Journal of Aeronautics

cja@buaa.edu.cn
www.sciencedirect.com



Кількість публікацій провідних видань світу з вібрацій при різанні



Методи забезпечення сталості обробних систем

Пасивні (PCC – Passive Chatter Control)

Зміна динамічних параметрів обробної системи шляхом введення динамічних компенсаторів коливань

Активні (ACC – Active Chatter Control)

Введення в обробну систему гармонічних коливань з фазою, протилежною коливанням збурень

Управління режимом різання (SLD – Stability Lobe Diagram)

Визначення «безвібраційних режимів різання» за допомогою діаграми сталості

Проведений аналіз літературних джерел показує, що, незважаючи на велику кількість публікацій на тему дослідження, більшість з них присвячені управлінню процесами периферійного фрезерування через призначення режиму різання відповідно до діаграми сталості. Проте, відсутність надійного критерію сталості обробної системи ускладнює проектування діаграми сталості, яка розраховується за допомогою багатокрокового алгоритму. **Причому запропонований підхід ґрунтується на алгебраїчних критеріях, пов'язаних з коренями характеристичного рівняння, яке отримують з диференціального рівняння із запізненням і яке принципово не має аналітичного рішення.** Користуються наближеними методами, які не можуть бути представлені у вигляді алгоритму, придатного для комп'ютерного використання.

Altintas Y., Manufacturing Automation. Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design 2nd edition, Cambridge University Press, 2012.

<https://doi.org/10.1017/CBO9780511843723>

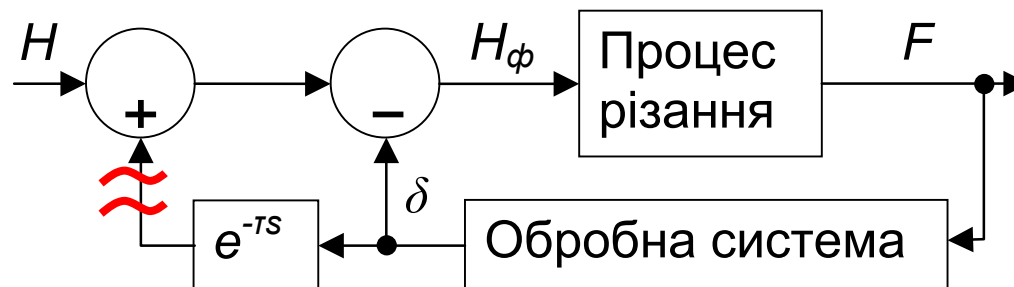
Y. Altintas and E. Budak. Analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Annals*, 44(1):357–362, 1995.

Algorithm design of SLD

- Select a chatter frequency from transfer functions around a dominant mode.
- Solve the eigenvalue from Eq. (4.91).
- Calculate the critical depth of cut from Eq. (4.96).
- Calculate the spindle speed from Eq. (4.99) for each stability lobe $k = 0, 1, 2, \dots$
- Repeat the procedure by scanning the chatter frequencies around all dominant modes of the structure evident on the transfer functions.

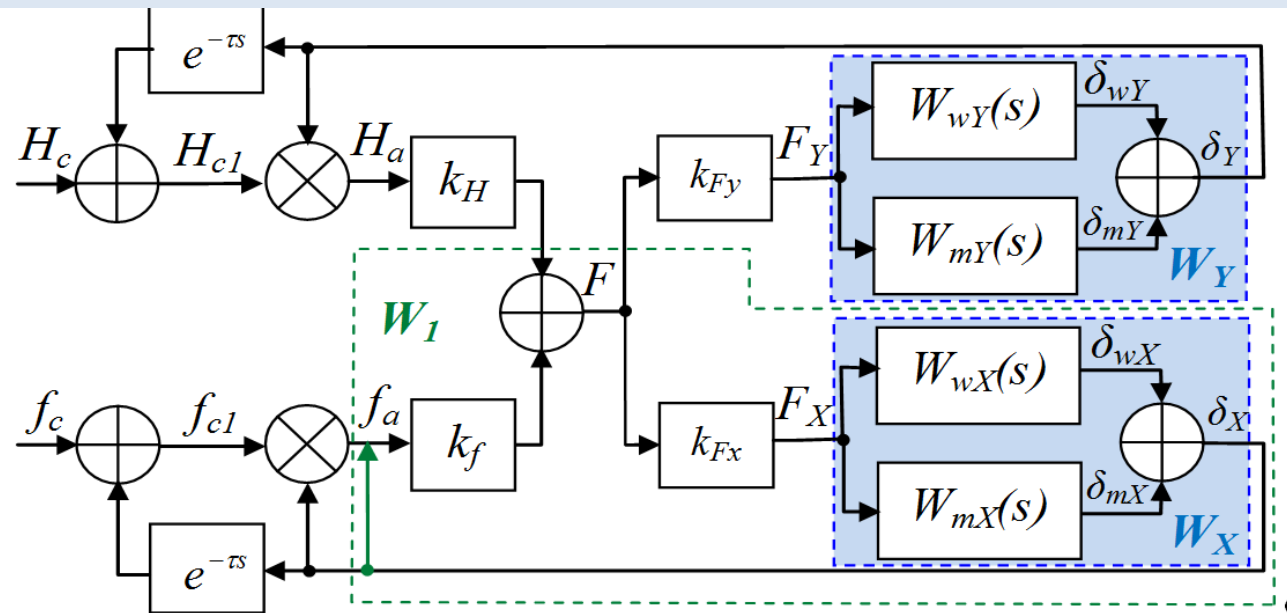
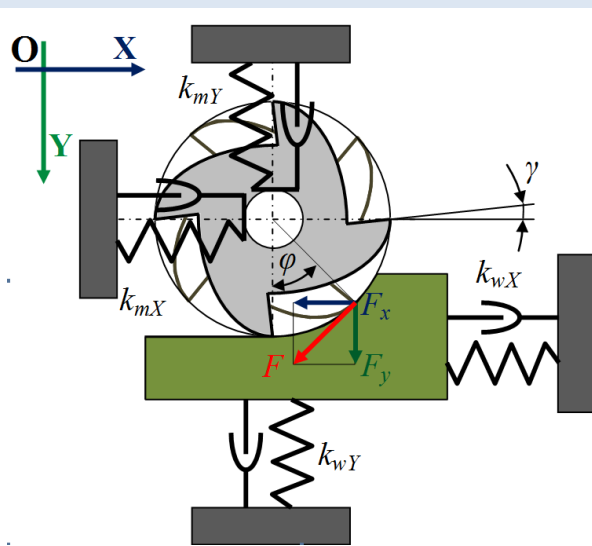
ЗАПРОПОНОВАНИЙ НОВИЙ КРИТЕРІЙ СТАЛОСТІ

Обробна система буде сталою, якщо графік діаграми Найквіста системи, що розімкнена за позитивним зворотним зв'язком із запізненням не буде охоплювати точку з координатами **[+1, 0]** на комплексній площині.



Кінцеве фрезерування

Математична модель

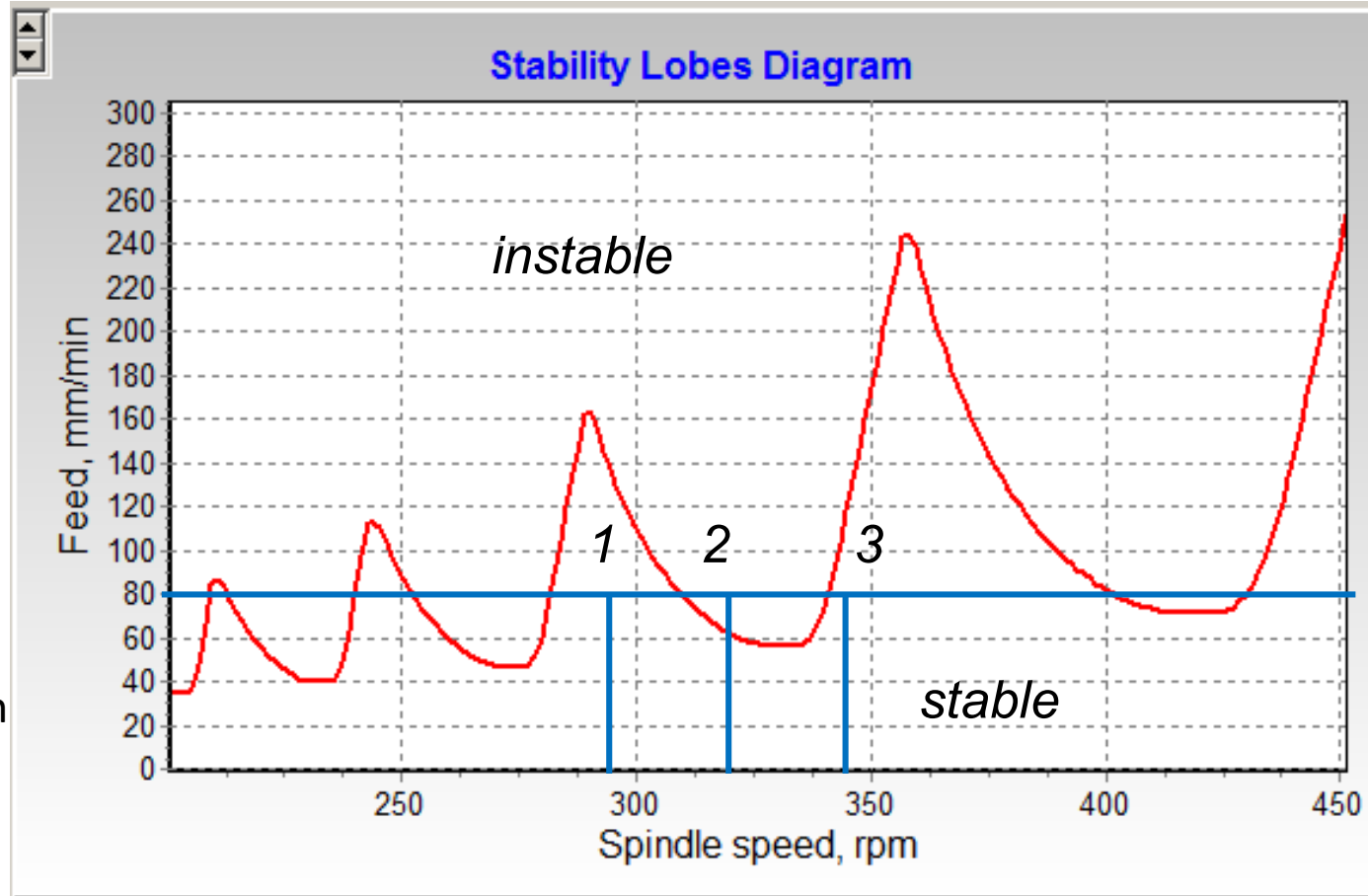


Cutting speed, m/min

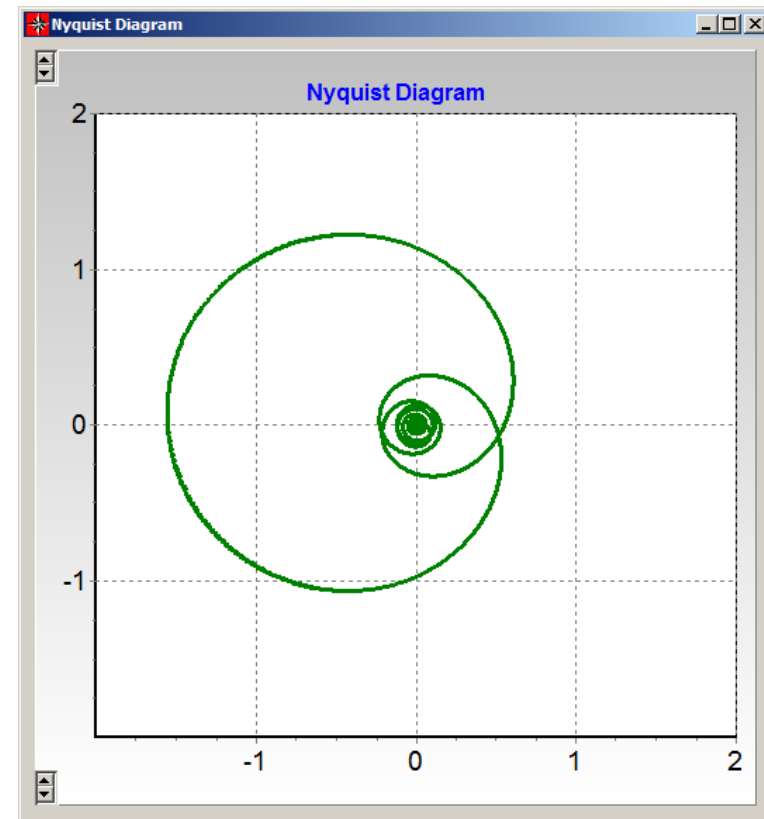
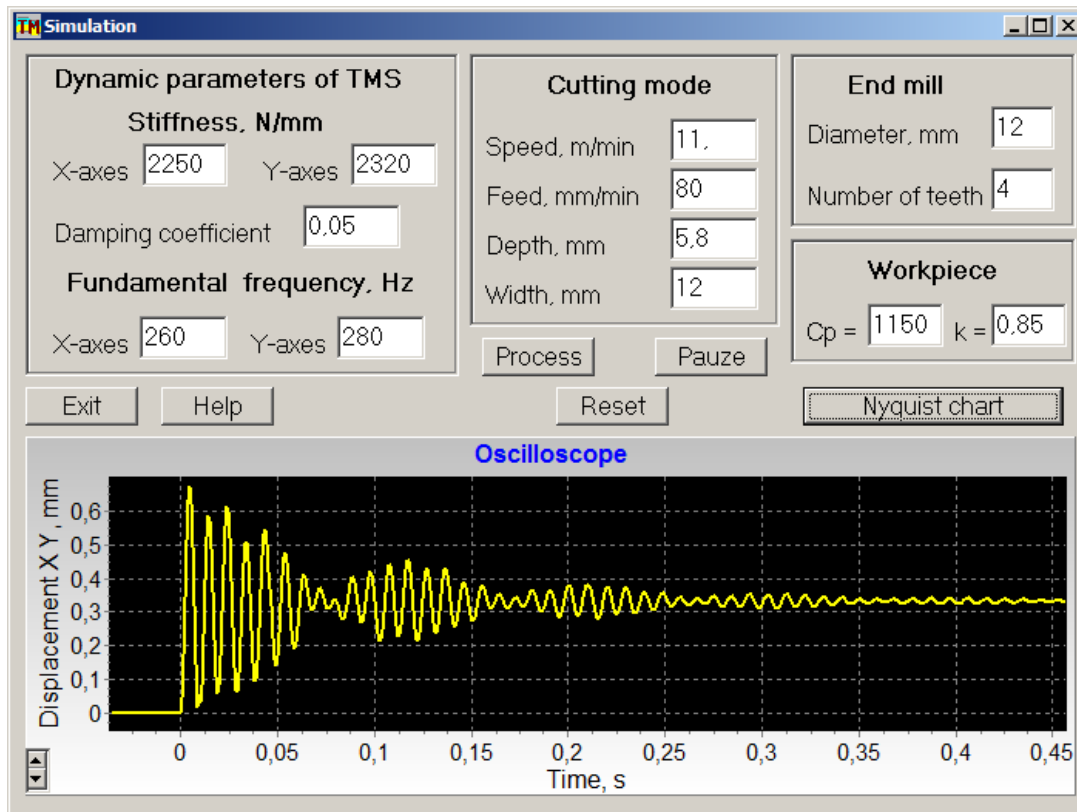
1) 11 m/min (292 rpm)
 stable

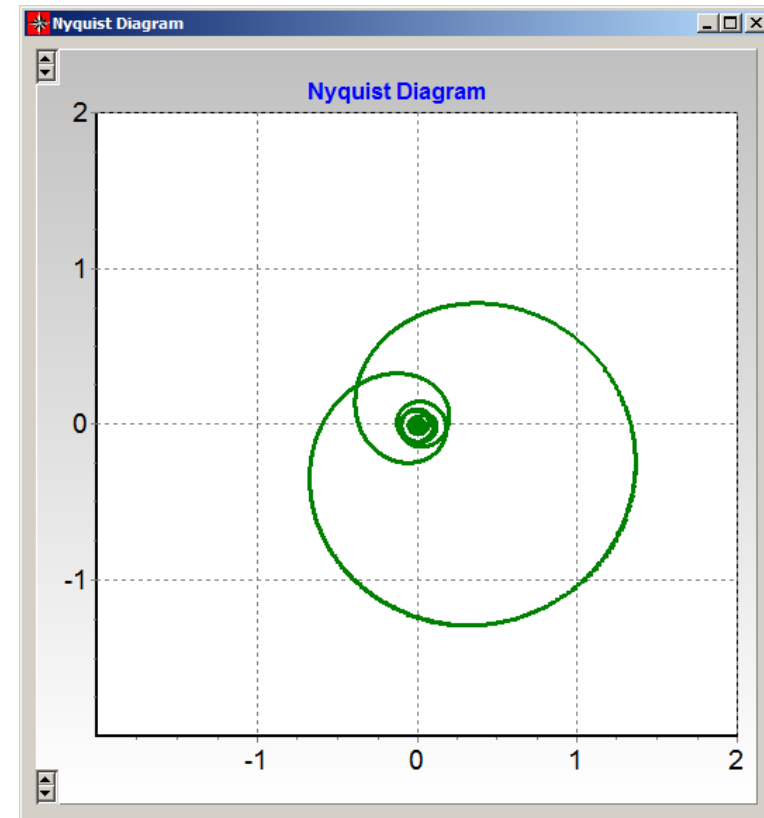
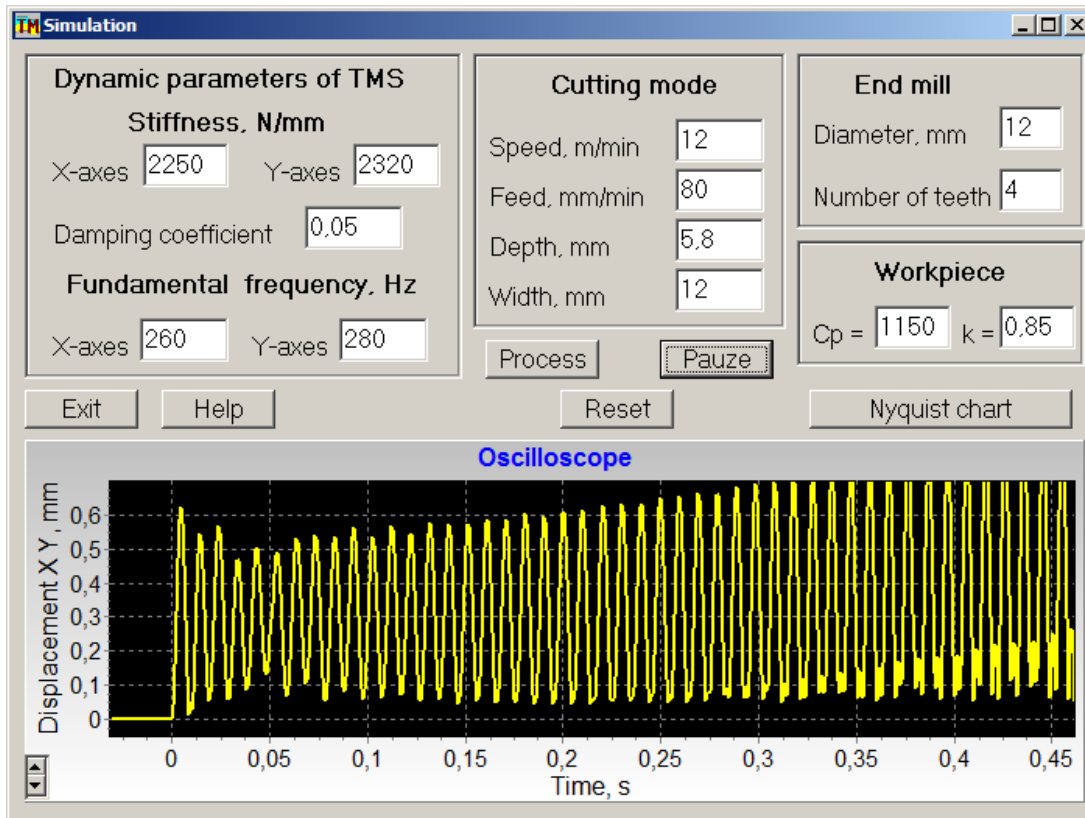
2) 12 m/min (318 rpm)
 instable

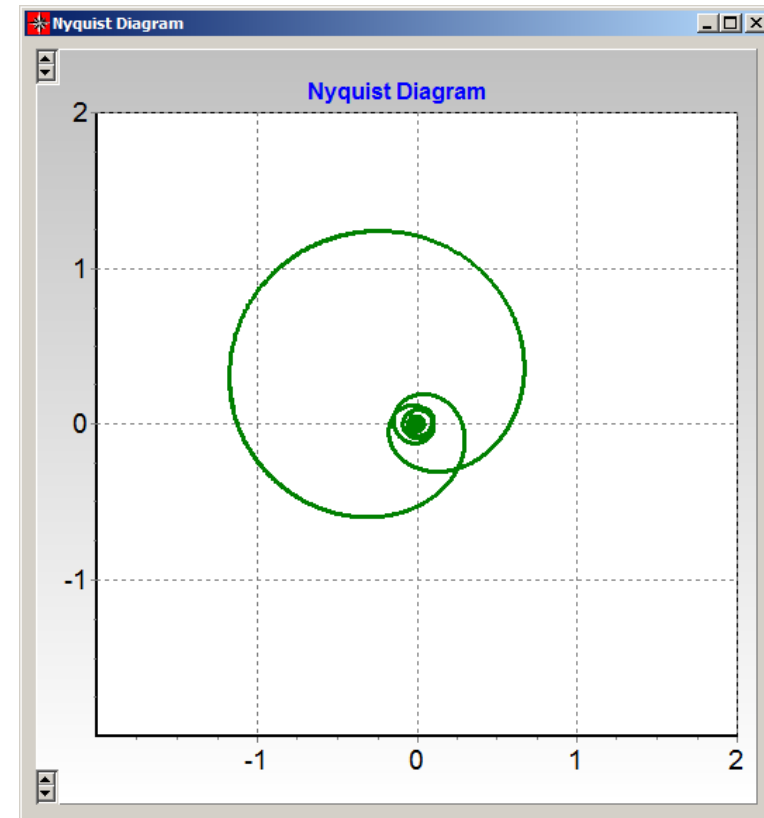
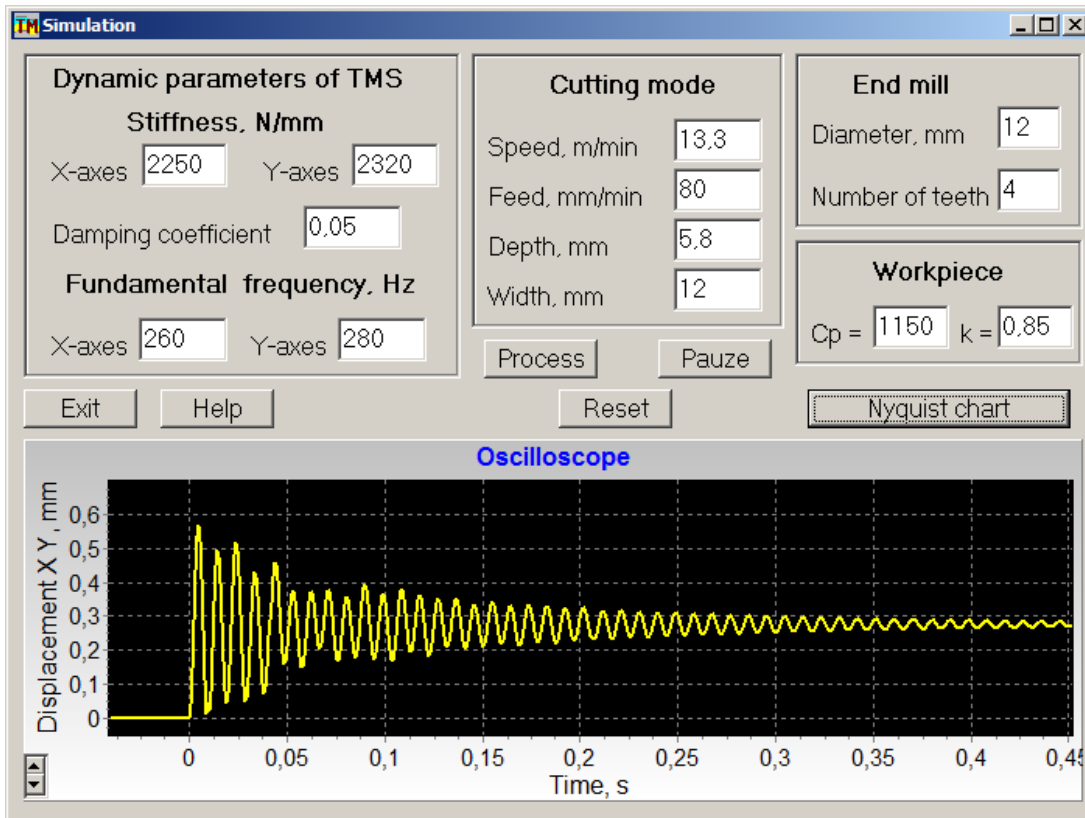
3) 13,3 m/min (345 rpm)
 stable



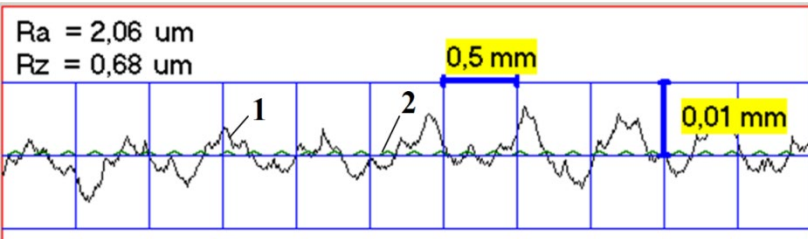
Програма моделювання



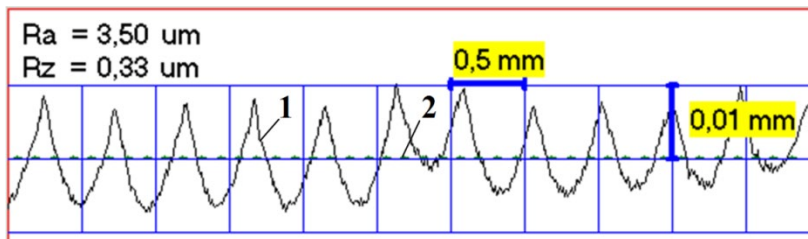




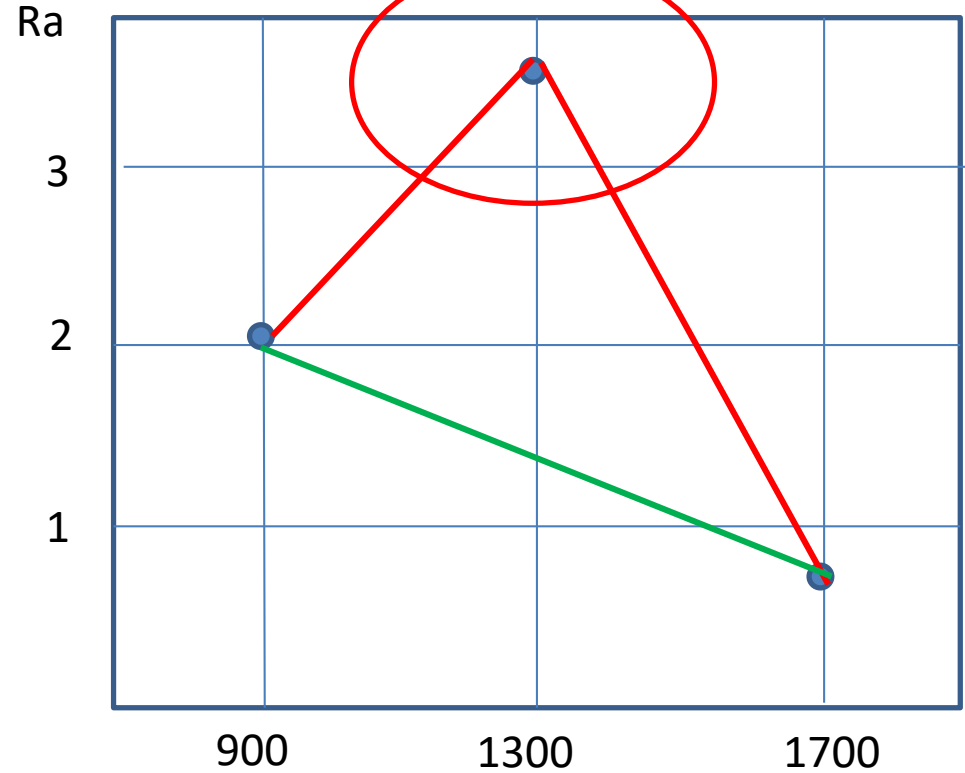
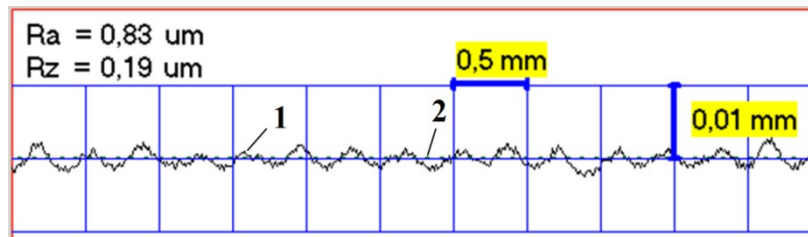
$f=650\text{mm/min}, n_s=900\text{rpm};$



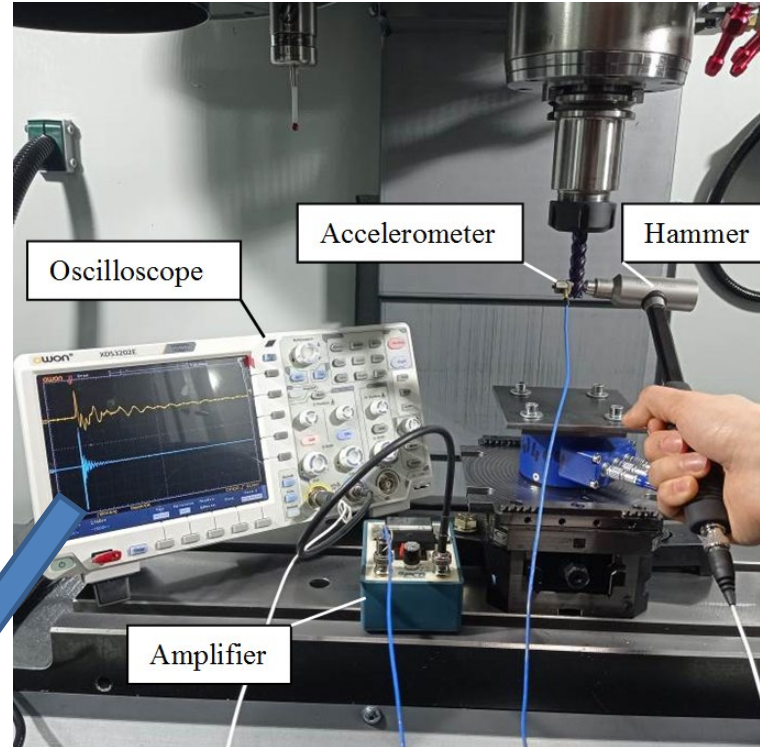
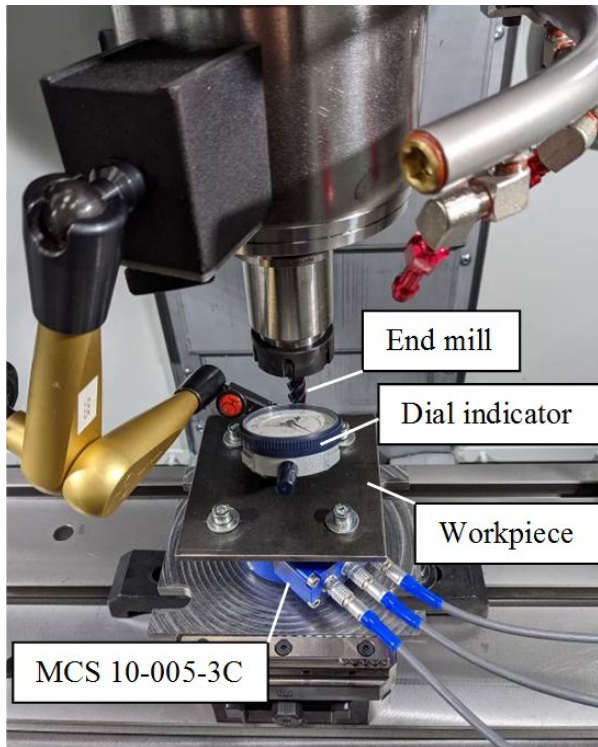
$f=650\text{mm/min}, n_s=1300\text{rpm};$



$f=650\text{mm/min}, n_s=1700\text{rpm}$



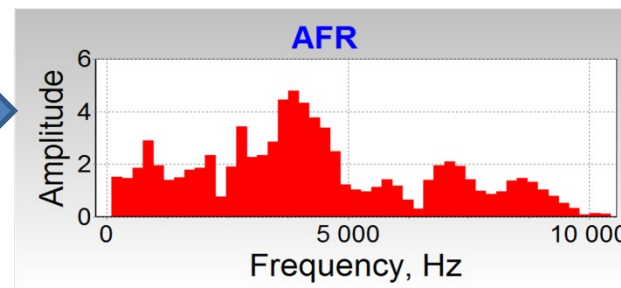
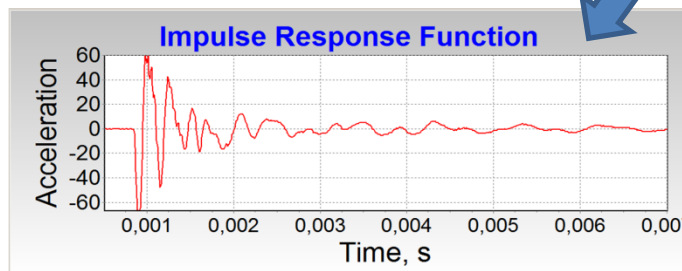
Визначення динамічних характеристик ТОС



EMA

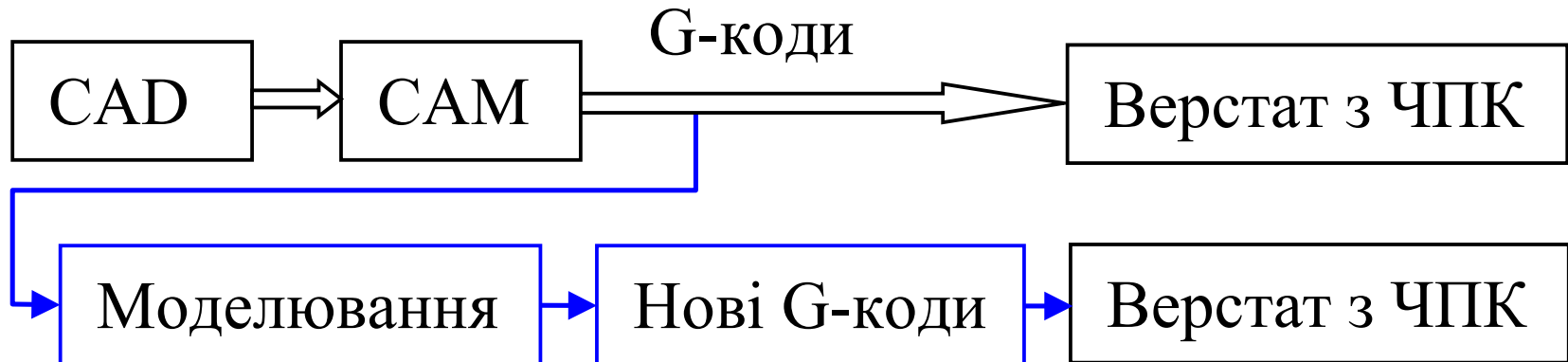


OMA



Оптимізація

Структура підготовки виробництва



Підготовка нового управління

NC-програма в G-кодах

```

%
O1000
G90 G17 G40 G80 G00
M06 T1 ()
G00 G54 G90 X46.5 Y80. S822 M03
G43 H1 Z70.
S822
Z50.
Z2.
G01 Z-5. F138.
G01 Y62.
G02 X50.5 Y58. R4.
G01 X68.5
G03 X84.5 Y42. R16.
G01 Y24.
G00 Z50.
M05
G00 G28 G91 Z0
G00 G28 G91 X-15.0 Y0.
G90
M06 T1
M30
%
```

Моделювання

ВИХІДНІ ДАНІ

Фреза
 Діаметр, мм 12
 Кількість зубів 4

Заготовка
 Припуск, мм 1,5
 Товщина, мм 5
 Сталь Ст3

Завантажити Кресленник
 Зберегти Ok

Time = 36,00 s

Вихід Help

Осцилограф

MRR, mm²
 Довжина траєкторії, мм
 Fx, H, Подача, мм/хв Sp, об/хв

Структура файлу моделювання

Довжина	xe	ye	MRR
3.450	46.500	78.650	0.063
5.500	46.500	78.600	0.063
3.550	46.500	78.550	0.063
22.100	46.610	61.067	0.146
22.150	46.616	61.045	0.147
22.200	46.621	61.022	0.145
53.200	70.925	57.815	0.042
53.250	70.994	57.804	0.041
53.300	71.063	57.793	0.041
84.950	84.500	26.550	0.051
85.000	84.500	26.500	0.051
85.050	84.500	26.450	0.050

Проектування нового NC-файлу

Створення управління

Завантажити файл Дискретизація

Вхідні дані Крок 10 Ok Зберегти управління

0.160 мм²

Формування управління

Подача Оберти

100 Ok 0

Коефіцієнт контролю

Вихід Help

Довжина різання, мм

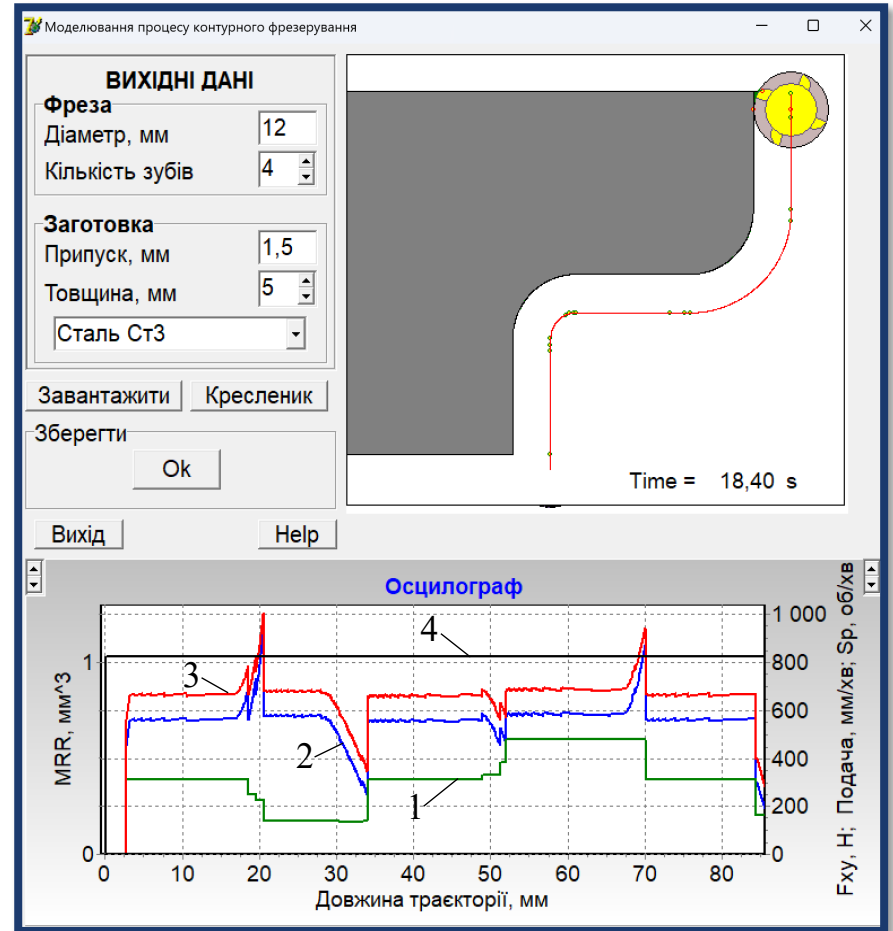
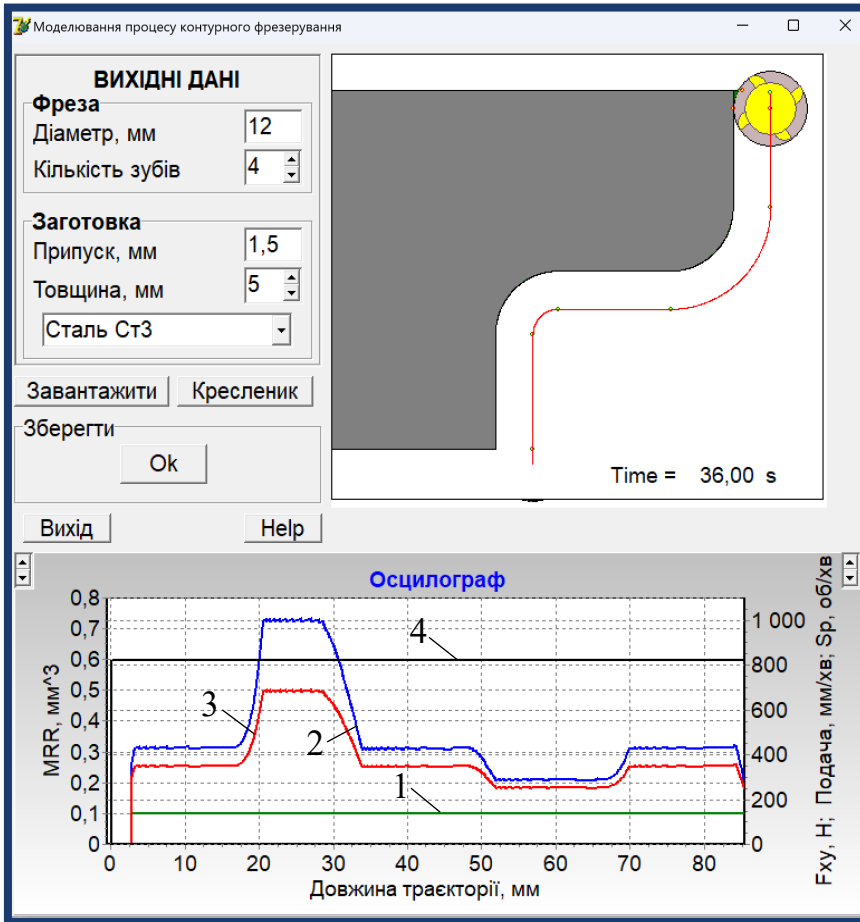
Файлів з новим керуванням

46.500	79.350	519.513	822.000
46.500	79.050	453.393	822.000
46.500	64.300	383.640	822.000
46.500	63.250	315.653	822.000
46.500	62.400	246.897	822.000
46.504	61.812	180.700	822.000
49.590	58.105	249.366	822.000
50.194	58.012	315.653	822.000
50.573	58.000	383.640	822.000
66.673	58.000	453.393	822.000
67.673	58.000	519.513	822.000
68.639	57.999	593.729	822.000
84.469	42.993	519.513	822.000
84.500	42.089	453.393	822.000
84.500	26.550	519.513	822.000

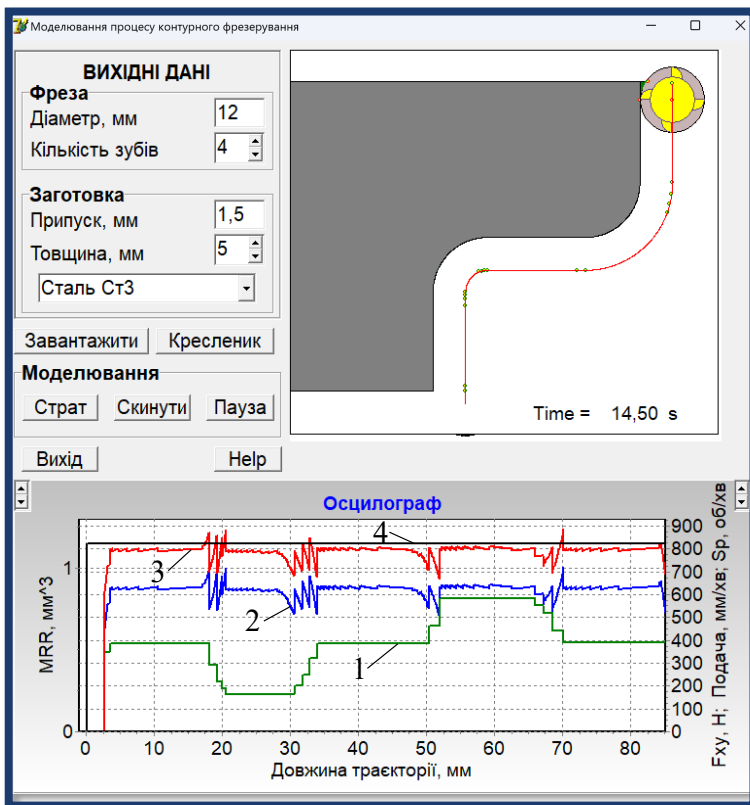
Нові G-коди

```

%
O1000
G90 G17 G40 G80 G00
M06 T1 ()
G00 G54 G90 X46.5 Y80. S822 M03
G43 H1 Z70.
S822
Z50.
Z2.
G01 Z-5.
G01 X46.5 Y79.1 F356.
G01 X46.5 Y64.45 F406.
G01 X46.5 Y63.3 F303.
G01 Y62.55 F230.
G01 Y62. F200.
G02 X49. Y58.292 R4. F185.
G02 X49.5 Y58.127 R4. F220.
G02 X50. Y58.031 R4. F260.
G02 X50.5 Y58. R4. F330.
G01 X66.876 Y58. F407.
G01 X68.5 Y58. F475.
G03 X83.5 Y47.568 R16 F612.
G03 X84. Y45.969 R16. F562.
G03 X84.35 Y44.186 R16. F530.
G03 X84.5 Y42. R16. F450.
G01 Y24. F406.
G00 Z50.
M05
G00 G28 G91 Z0
G00 G28 G91 X-15.0 Y0.
G90
M06 T1
M30
%
```



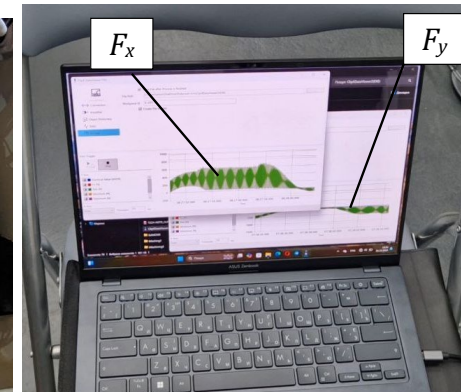
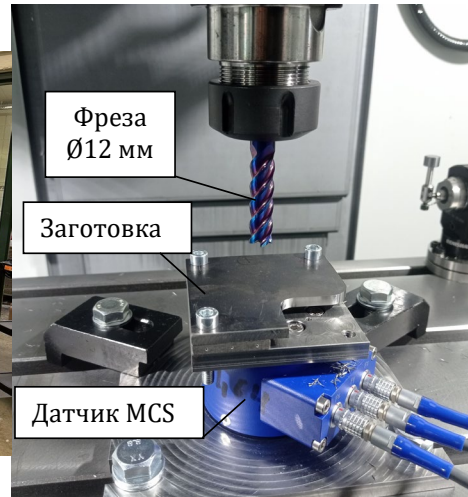
Управляюча програма записана в G-кодах розроблена за представленою методикою



```

%
O1013 (KPI-F100-160-4)
G90 G17 G40 G80 G00
G21 (mm)
M06 T6 (TOOL 1 - DIA 12.)
G00 G54 G90 X46.5 Y-100. S822 M03
G43 H6 Z100.
S822
Z50.
Z2.
G01 Z-5.5 F138.
G01 X46.5 Y-100.0 F305.
G01 X46.5 Y-79.1 F305.
G01 X46.5 Y-64.45 F387.
G01 X46.5 Y-63.3 F322.
G01 Y-62.55 F248.
G01 Y-62. F198.
G02 X48.5 Y-58.536 R4. F162.
G02 X49.5 Y-58.127 R4. F198.
G02 X50. Y-58.031 R4. F262.
G02 X50.5 Y-58. R4. F334.
G01 X66.876 Y-58. F387.
G01 X68.5 Y-58. F494.
G03 X83.5 Y-47.568 R16. F580.
G03 X84. Y-45.969 R16. F583.
G03 X84.35 Y-44.186 R16. F540.
G03 X84.5 Y-42. R16. F450.
G01 X84.5 Y-25. F387.
G01 X84.5 Y-24. F305.
G01 X96.5 Y-24.
G00 Z100.
M05
G90 G00 X0. Y0.
G90 G00 Z0.
M30
%
```

Експериментальне дослідження



Верстат ЧПК,
Toolroom Mills
Haas TM-0P

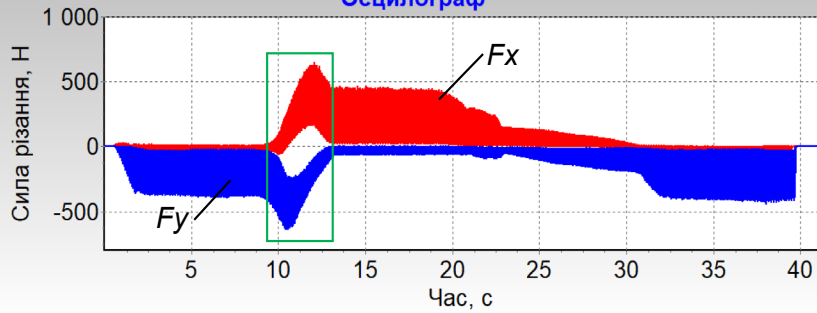
Багатокомпонентний
тензометричний
датчик фірми HBM
(Germany)
MCS 10-005-3C

HBM (Germany)
ClipX BM40
підсилювача
сигналу

Ноутбук з
програми
забезпеченням для
запису складових
сил різання F_x і F_y

SolidCAM

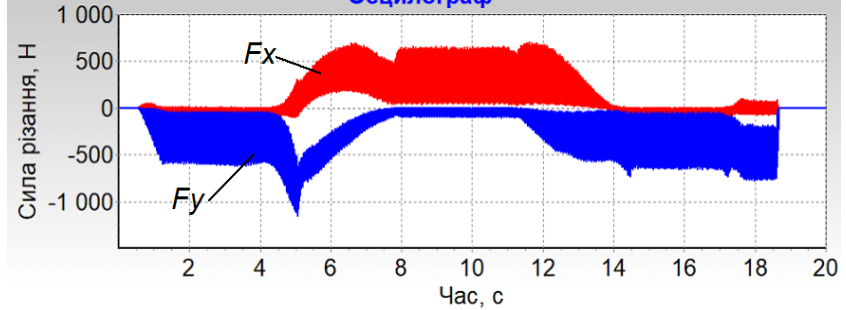
Осцилограф



Машинний час 36с

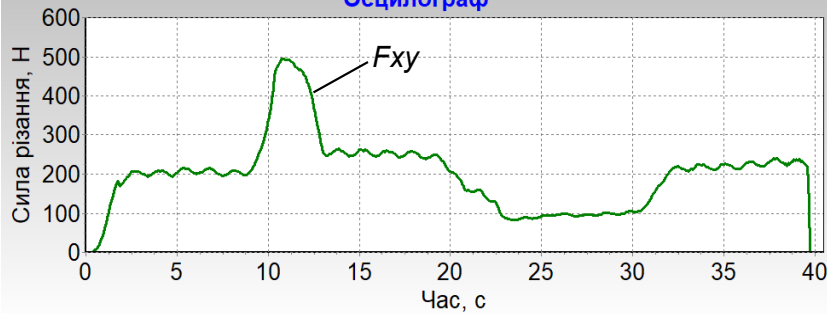
iMachining

Осцилограф

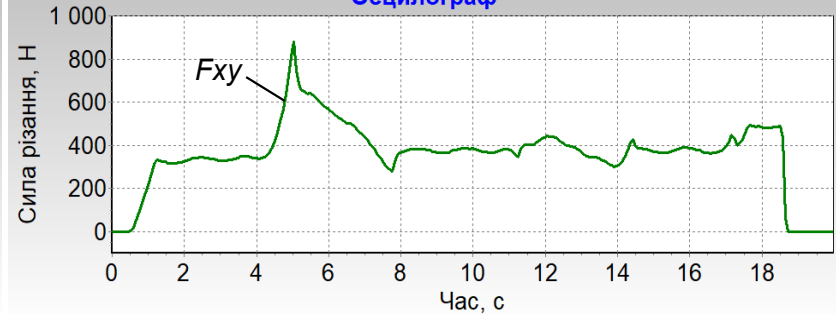


Машинний час 18с

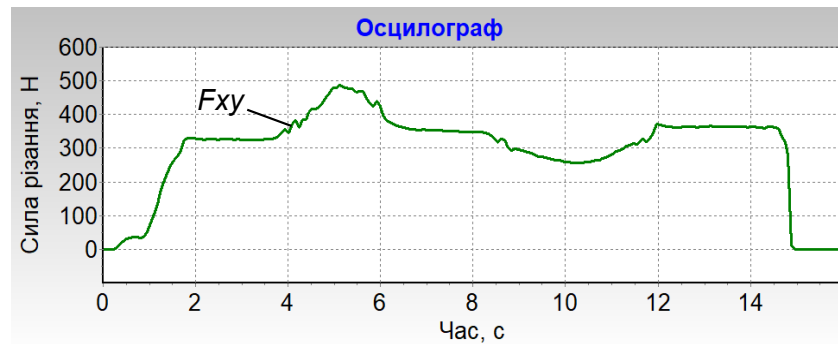
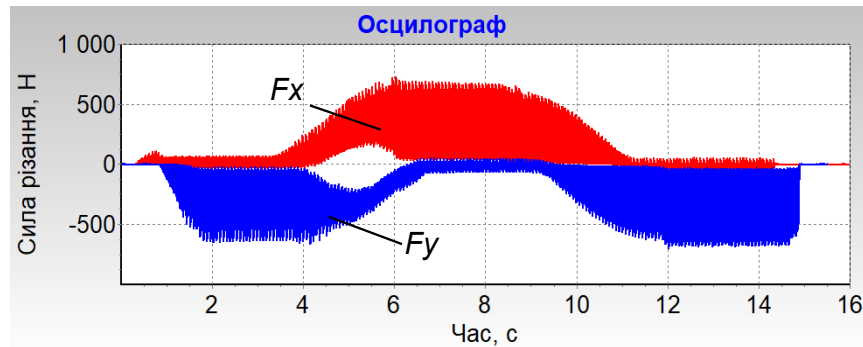
Осцилограф



Осцилограф



Керування КП



Машинний час 14с



Виконаний аналітичний огляд стану проблеми, складене технічне завдання, розроблені функціональні схеми технологічної обробної системи, методи оптимізації, методика дослідження і моніторингу процесів різання за різними видами оброблення. Виконаний узагальнюючий аналіз причин виникнення вібрацій при різанні. Запропонований новий критерій сталості процесу різання в замкненій обробній системі на основі аналізу розташування діаграми Найквіста на комплексній площині. Виконані необхідні експериментальні дослідження з ідентифікації динамічних характеристик технологічної обробної системи методами експериментального модального аналізу. .



Розроблені нові методи геометричного представлення моделей заготовки та інструменту для виконання моделювання їх геометричної взаємодії. Створена методика розпізнавання G-кодів управляючої програми, виділення формоутворюючих та холостих рухів при контурному фрезерування відкритих та закритих контурів деталей авіаційної техніки. Розроблені алгоритми утворення цифрових масивів геометричних моделей заготовки за аналізом G-кодів управляючої програми, спроектованої в САМ системі. Створене математичне забезпечення автоматичного виконання відповідних розрахунків.



Розроблені алгоритми чисельного моделювання з визначенням взаємодії вихідної інструментальної поверхні з заготовкою, що дозволяють отримати характеристики темпу виділення матеріалу (Material Removal Rate – MRR) у функції координати формоутворення. Розроблені математичні моделі технологічних обробних систем з представленням динамічних моделей у змінних стану. Створені математичні моделі з визначення сили різання та її складових при кінцевому фрезеруванні та проведена їх експериментальна апробація. Представлені протоколи експериментальних досліджень у вигляді віброграм та профілограм оброблених поверхонь. Проведена експериментальна апробація повністю підтвердила ефективність запропонованих технологічних рішень.



Висновки

Створена нова методика і відповідне програмне забезпечення, яке на підставі результатів експериментального модального аналізу обробної системи проектує діаграму стабільності, що забезпечує безвібраційний режим різання.

Створена нова методика і відповідне програмне забезпечення, яке на підставі вихідної NC-програми в G-кодах дозволяє спроектувати нову NC-програму в G-кодах, що оптимізує процес контурного фрезерування за критерієм мінімуму машинного часу при дотриманні всіх вимог за якістю.

Всі розробки знайшли підтвердження при апробації в лабораторних умовах.