

УДК 621.9142.08

**Розглянуто способи контролю стану фрез по силі різання, характер зміни складових сили різання, вплив стану зубів фрези при різанні**  
**Ключові слова:** злом зуба, передавальна функція, стохастична модель, задня поверхня

**Рассмотрены способы контроля состояния фрез по силе резания, характер изменения составляющих силы резания, влияние состояния зубов фрезы при резании**  
**Ключевые слова:** слом зуба, передаточная функция, стохастическая модель, задняя поверхность

**The methods of the control of the milling cutters state according to cutting force, characteristics of cutting force components changes, influence of the state of the milling cutters dent during cutting are considered**  
**Key words:** dent destruction, transfer function, stochastic model, back surface

# КОНТРОЛЬ СТАНУ ФРЕЗ ПО СИЛІ РІЗАННЯ

**О.Л. Кондратюк**  
 Кандидат технічних наук, доцент\*

**А.О. Скоркін**  
 Аспірант, асистент\*

**О.О. Литвинова\***  
 \*Кафедра металоріжучого обладнання і транспортних систем  
 Українська інженерно-педагогічна академія  
 вул. Університетська, 16, м. Харків, Україна, 61003  
 Контактний тел.: (057) 733-78-26  
 E-mail: Kondr20071@i.ua

## Вступ

Фрезерування є одним з найбільш поширених і високопродуктивних способів механічної обробки різанням. Обробка виконується багатозубим інструментом - фрезею.

Фрезеруванням обробляються горизонтальна, вертикальна, похила плоскість, фасонні поверхні, уступи і пази різного профілю. Особливістю процесу різання при фрезеруванні є те, що зуби фрези не знаходяться у контакті з оброблюваною поверхнею весь час. Кожне лезо фрези послідовно вступає в процес різання, змінюючи товщину шару, що зрізається, від найбільшої до найменшої, або навпаки. Одночасно в процесі різання можуть знаходитися декілька ріжучих кромки. Це викликає ударні навантаження, нерівномірність протікання процесу, вібрації і підвищений знос інструменту, підвищені навантаження на верстат. У нашій статті ми розглядаємо процес контролю фрез по силі різання.

## Вплив складових сили різання на обробку

Розглянемо характер зміни тангенціальної складової сили різання, фрези, що діє на зуб. Миттєву тангенціальну складову сили різання можна визначити по формулі:

$$F_{ti}(\Theta_i) = K \cdot a \cdot c \cdot \sin \Theta_i, \tag{1}$$

де  $K$  – питомий тиск в зоні різання;  
 $a$  – глибина різання в осьовому напрямі;  
 $c$  – подача на зуб;

$\Theta_i$  – кут впровадження зуба фрези в деталь.

Приймаємо, що тиск  $K$  в зоні різання постійний і тертя по торцю фрези відсутнє.

Радіальна складова сили визначається по формулі:

$$F_{ri}(\Theta_i) = r_i \cdot F_{ti}(\Theta_i), \tag{2}$$

де  $r_i$  – значення відношення радіальної і тангенціальної складових сили різання на задній поверхні.

Значення складових сили різання по осях координат  $X$  і  $Y$  визначаються по виразу:

$$\begin{bmatrix} F_{Xi}(\Theta_i) \\ F_{Yi}(\Theta_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_i & \sin \Theta_i \\ -\sin \Theta_i & \cos \Theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{ri}(\Theta_i) \\ F_{ti}(\Theta_i) \end{bmatrix} \tag{3}$$

При одночасному різанні декількома зубами необхідно визначити вплив кожного зуба на силу різання.

$$F_X = \sum_{i=1}^m F_{Xi}(\Theta_i), \tag{4}$$

$$F_Y = \sum_{i=1}^m F_{Yi}(\Theta_i),$$

де  $m$  – число одночасно працюючих зубів.

Миттєве значення результуючої сили різання визначається по формулі:

$$F = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2}. \tag{5}$$

Якщо один із зубів фрези зламаний або укорочений (на  $e_i$ , мм), то він не знімає весь припуск. В цьому випадку сила різання на укороченому зубі буде дорівнювати:

$$F_{ti}(\Theta_i) = K \cdot a \cdot (c \cdot \sin \Theta_i - e_i). \tag{6}$$

Отже, при різанні зламаним зубом спостерігається зменшення сили різання. Слід також відзначити, що сили тертя, що виникають при різанні зламаним

зубом, можуть привести до збільшення сили різання, навіть не дивлячись на меншу глибину різання. Тобто, в загальному випадку поломка або скол зуба фрези може привести як до зменшення, так і до збільшення сили різання.

Крім того, припуск, що отримується після проходження зламаного зуба, знімається наступним зубом, що приводить до збільшення сили різання на цьому зубі. Для контролю поломки зуба фрези необхідно знати середнє значення сили різання за період різання цим зубом.

Результуюча двох складових сили різання по їх середніх значеннях визначається по формулі:

$$F_A(t) = \sqrt{F_{ax}^2(t) + F_{ay}^2(t)} \quad (7)$$

За стабільних умов обробки значення результуючої сили різання залишається постійною до поломки інструменту. У загальному вигляді процес обробки можна представити у вигляді блок-схеми, приведеної на рис. 1.

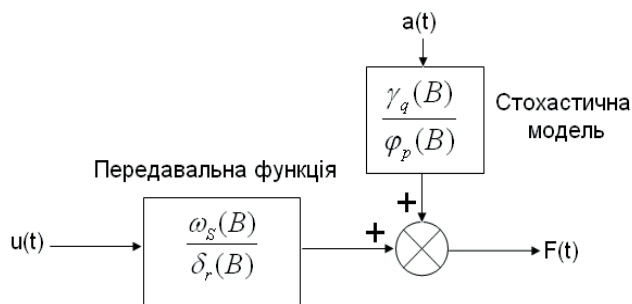


Рис. 1. Блок-схема процесу обробки

Для забезпечення гнучкості обробки бажано, щоб система контролю поломки інструменту була незалежна від умов різання.

Встановлено, що зміна сили різання при фрезеруванні відбувається періодично.

На вимірюваному сигналі є багато частотних гармонік з основною частотою, що визначається кількістю зубів фрези і частотою її обертання. Характер зміни сили різання при фрезеруванні і її рівень залежать від глибини різання, ширини припуску, що зрізується, подачі і числа зубів фрези. Частота виміру сили різання визначається числом зубів і швидкістю обертання фрези. Форма і амплітуда сили різання можуть безперервно змінюватися в процесі обробки.

Однаковий характер роботи зубів при фрезеруванні може бути використаний в розробці діагностичної моделі. У більшості операцій кожен зуб зміщується на 0,25 – 0,5 мм за оберт, діаметр фрези в 50 – 200 разів більше значень подачі. Тобто можна передбачити, що виникаюча зміна відбувається в ході не менше одного оберту шпинделя і впливає, отже, на кожен зуб фрези за цей період. Стан фільтру змінюється на кожному оберті шпинделя в той момент, коли зламанний інструмент починає різати. При цьому факт поломки інструменту виявляється і запам'ятовується, що дозволяє зробити відмінність між короткочасною зміною умов різання і фактом поломки інструменту.

### Експерименти на базі математичної моделі

Розроблена в процесі досліджень математична модель була апробована в ході різних експериментів при фрезеруванні. Експерименти проводилися на консольно-фрезерному верстаті з ЧПК. Для виміру сили різання використовувався двокомпонентний динамометр, встановлений на столі верстата. Основна власна частота коливань динамометра – понад 500 Гц. Максимальна частота взаємодії зубів фрези із заготовкою – 50 Гц. Частотні гармоніки понад 100 Гц на сигналі сили різання відсікалися, для чого застосовувалися низькочастотні фільтри. Для обробки сигналів використовувалася мікроЕОМ LSI-11/23. Для здобуття міток часу на шпиндель верстата встановлювався датчик, що обертався.

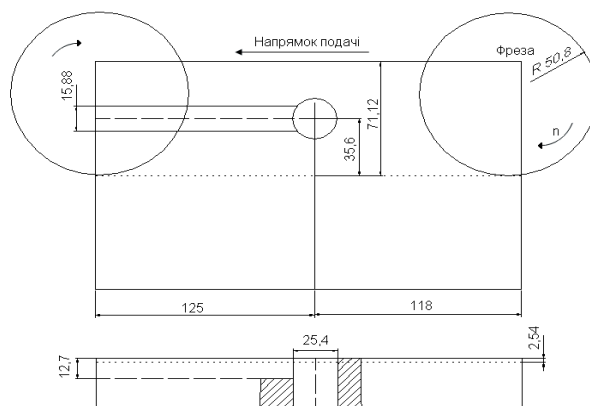


Рис. 2. Ескіз оброблюваної деталі (глибина різання в осьовому напрямі  $a = 2,54$  мм, подача  $S = 0.1876$  мм/зуб, частота обертання шпинделя  $n = 361$   $\text{min}^{-1}$ , діаметр фрези 101,6 мм, число зубів  $z = 6$ , матеріал оброблюваної деталі – FISI 1040 (HB 200))

Різання проводилося гострою фрезою, спостерігалися дві послідовні поломки зубів фрези. Реєстрація миттєвих значень результуючої сили різання здійснювалася з використанням чотирьох вимірів за час різання одним зубом. Один з шести зубів мав скол і зламався через чотири оберти фрези.

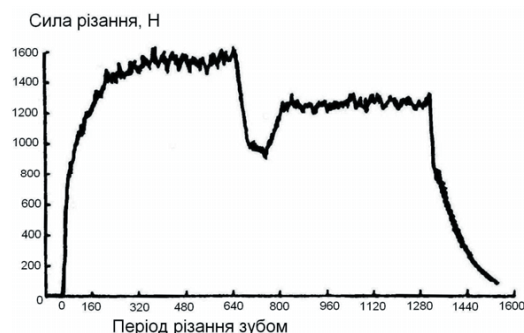


Рис. 3. Результати виміру сили різання при різанні справним інструментом

У іншій серії дослідом була досліджена фільтрація зміни контрольованого сигналу при перехідному процесі, наприклад, за наявності отворів, пазів і т. п. (рис. 2, 3). Використання фільтру AR(1) дозволило виключити вплив отвору і паза на оброблюваній по-

верхні на силу різання (рис. 4). Аналогічні досліди були повторені при фрезеруванні, коли один із зубів фрези був зішліфований по задній поверхні для імітації його руйнування.

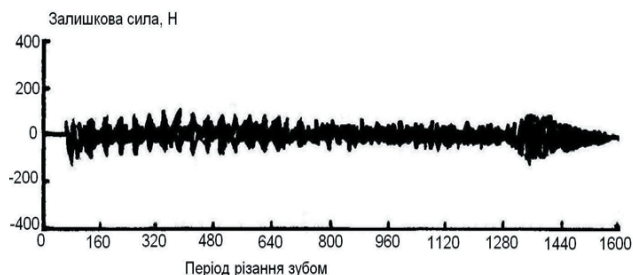


Рис. 4. Результати виміру сили різання з використанням фільтру AR(1) (різання справним інструментом)

*Представлено математичну модель і чисельний метод моделювання пружних коливань лопаток турбомашин. Наведено результати тестування чисельного метода*  
**Ключові слова:** чисельні методи в теорії пружності, динаміка лопаток турбомашин

---

*Представлены математическая модель и численный метод моделирования упругих колебаний лопаток турбомашин. Приведены результаты тестирования численного метода*  
**Ключевые слова:** численные методы в теории упругости, динамика лопаток турбомашин

---

*In the paper mathematic model and numerical method of simulation of elastic vibrations of turbomachine blades is presented. Testing results of the numerical method are demonstrated*  
**Key words:** numerical methods in elasticity theory, turbomachine blade dynamics

### 1. Введение

В современном турбиностроении часто используемым способом повышения эффективности является увеличение температуры на входе в первые ступени турбины. Причина использования высоких температур кроется в повышении давления для процесса адиабатического расширения, следовательно, в возможности создания большей удельной работы при расширении газа в турбине. Сегодня входные темпе-

### Висновки

Порівняння варіантів контролю фрез показує, що варіант з використанням фільтру дозволяє точно відрізнити руйнування ріжучого інструменту від зміни режимів різання і геометрії оброблюваної деталі.

### Література

1. Исаев А.И. Высокопроизводительное резание в машиностроении. М.: Наука, 1966 г.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1979.
3. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. Т2. Под ред. Косиловой и Р.К. Мешерякова. – М: Машиностроение, 1985–496 с.

УДК 621.135:533.695.5

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН

**Ю. А. Быков**

Кандидат технических наук, ведущий инженер\*  
 Контактный тел.: (057) 737-15-92  
 E-mail: bykov@ukrpost.ua

**В. И. Гнесин**

Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом\*  
 Контактный тел.: (0572) 94-18-67  
 E-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua

\*Отдел нестационарной газодинамики и аэроупругости  
 Институт проблем машиностроения им А.Н. Подгорного  
 НАН Украины  
 ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61000

ратуры рабочего колеса газовой турбины достигли уровня, намного превосходящего температуры плавления материала турбины.

Для снижения температуры лопатки применяются различные технологии охлаждения. Значительная разница в температурах воздуха из камеры сгорания и охлаждающего воздуха из компрессора приводит к существенным температурным напряжениям в теле лопатки. Это обстоятельство бросает вызов существующим методикам оценки надежности