

УДК 621.753.4

**Ю.В. Петраков, професор, д-р техн. наук***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,**пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056**ур-86@yandex.ru***ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЗАКРІПЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ РОЗТОЧУВАННІ ОТВОРІВ**

*Розроблена математична модель процесу розточування отвору в заготовці, що встановлена на площину і два пальці. Математична модель ураховує динамічні явища, що мають місце на практиці, а також режим різання при розточуванні. Створена прикладна програма, яка дозволяє визначати умови затиску в залежності від динамічних характеристик технологічної оброблюючої системи і режиму різання.*

**Ключові слова:** верстатні пристрої, динамічні процеси, розточування отворів.

**Вступ.** Розрахунок сил затиску заготовки при виконанні механічної операції виконують як при конструюванні нових верстатних пристроїв, так і при використанні наявних універсальних пристроїв. Проектуванню верстатних пристроїв присвячено багато наукових праць, у тому числі підручників для вищих технічних закладів освіти, проте всі вони вирішують задачу визначення умов закріплення заготовки в статичному стані [1, 2]. Такий підхід приводить до вимушеного збільшення потрібної сили затиску вже на практиці, застосовуючи так званий коефіцієнт запасу, тобто методом проб і помилок. Проте, всі верстатні пристрої використовуються в умовах дії сили різання, яка весь час змінюється, причому ці зміни можуть бути досить швидкими і залежать від обраного режиму різання, то розрахунок потрібної сили затиску треба виконувати з урахуванням динамічних явищ, що мають місце на практиці.

**Метою даної статті** є презентація нового підходу до проектування верстатних пристроїв з урахуванням динамічних явищ та режиму різання на прикладі визначення залежності необхідної сили затиску від режиму різання при розточуванні отвору в заготовці, що базується на площину і два пальця.

**Теоретична частина.** Найбільш розповсюджена схема установки корпусних деталей при виконанні операцій механічної обробки – на площину і циліндричний та зрізаний пальці. Сила затиску має бути достатньою для усунення зсуву у будь яку сторону заготовки, причому з умов точності обробки та захисту пальців, що базують, сила різання має сприйматися тільки силою тертя, тобто пальці мають бути повністю розвантажені. Таким чином, зсув заготовки попереджається тільки силами тертя, що виникають в місцях контакту заготовки з опорами і затискними елементами.

На рис.1 показана схема дії сил при розточуванні отвору в заготовці 1, що встановлена на опори 2 і базується на циліндричний і зрізаний пальці (на схемі не показані). Заготовка утримується силами затиску  $F_3$ , що діють за осьовими лініями опор. Умови закріплення заготовки будуть визначатися чотирма рівняннями, що представлятимуть рівновагу сил за віссю Z, віссю Y, за сумою моментів навколо опори A і за сумою моментів навколо опори B. Причому рівняння мають описувати поведінку системи у динаміці, тобто бути диференціальними.

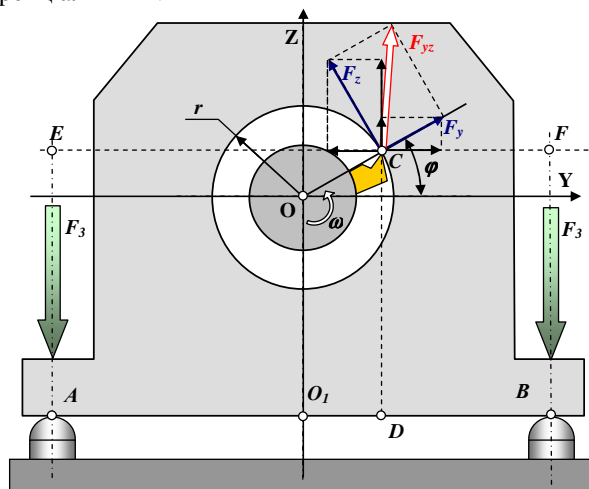


Рисунок 1 – Розрахункова схема

Зі схеми (рисунок 1) складова від сили різання в напрямку вісі Z:

$$F_{Y\Sigma} = F_Y \cos \varphi - F_Z \sin \varphi, \quad (1)$$

а складова від сили різання в напрямку вісі Y:

$$F_{Z\Sigma} = F_Y \sin \varphi - F_Z \cos \varphi, \quad (2)$$

де  $F_Y, F_Z$  – складові сили різання,  $\varphi$  – кутова координата вершини різця.

Момент від сили різання навколо опори A:

$$(M_P)_A = F_{Z\Sigma} AD - F_{Y\Sigma} AE, \quad (3)$$

де  $AD = AO_1 + r \cos \varphi$ ,  $AE = OO_1 + r \sin \varphi$ , а момент від сили різання навколо опори B:

$$(M_P)_B = F_{Z\Sigma} BD - F_{Y\Sigma} BF, \quad (4)$$

де  $BD = O_1B - r \cos \varphi$ ,  $BF = OO_1 + r \sin \varphi$ .

Тепер можна визначити умови закріплення заготовки.

Умова закріплення заготовки від зсуву в напрямку вісі Y виглядає наступним чином:

$$[2F_3 - (F_Z)_P] f_{mp} \geq \sqrt{(F_Y)_P^2 + F_X^2}, \quad (5)$$

де  $F_3$  – сила затиску,  $f_{mp}$  – коефіцієнт тертя між опорою і заготовкою,  $(F_Z)_P, (F_Y)_P$  – сили від відповідних складових  $F_{Z\Sigma}$  та  $F_{Y\Sigma}$  сили різання, що діють в контакт з опорами,  $F_X$  – складова сили різання в напрямку вісі X (перпендикулярно до площини рис.1).

Умови закріплення за моментами від відриву заготовки від опор:

$$F_3 AB \geq (M_P)_A, \quad F_3 AB \geq (M_P)_B. \quad (6)$$

Оскільки при розточуванні вектор сили різання весь час змінює напрям дії, причому швидкість зміни залежить від режиму різання  $\varphi = t\omega$ , де  $\omega$  – кутова швидкість борштанги з різцем,  $t$  – час, то для визначення умов закріплення заготовки обов'язково треба урахувати динамічні явища, що відбуваються в пружній системі заготовка – пристрій.

Контакт заготовки з опорами можна представити у вигляді пружної схеми за рисунком 2. До моменту зсуву опора 1 контактує з заготовкою 2 і забезпечує пружне з'єднання з контактною жорсткістю  $C_k$  як за віссю Z, так і за віссю Y. Крім того, такий зв'язок має демпфірування з коефіцієнтом  $\lambda$ , яке забезпечує внутрішнє тертя в контакті.

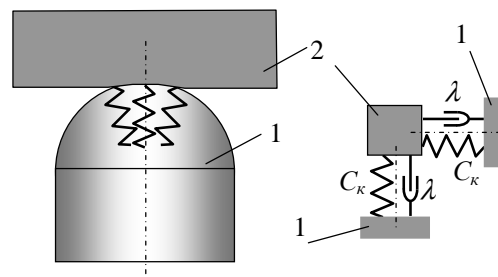


Рисунок 2 – Схема контактної взаємодії

Ураховуючи умови закріплення заготовки, динамічна модель пристрою разом із заготовкою в напрямку осей Z і Y відрізняється (рисунок 3).

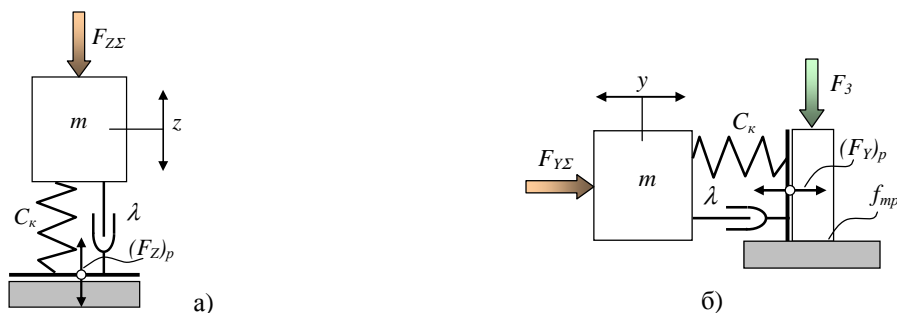


Рисунок 3 – Динамічні моделі:  
а) – в напрямку вісі Z, б) – в напрямку вісі Y

В напрямку вісі Z складова  $F_{Z\Sigma}$ , що визначається за формулою (2), діє на заготовку масою  $m$ , тоді як сила  $(F_Z)_p$ , що діє на опору в цьому напрямку, є реакцією зв'язку заготовки з опорою і може бути визначена з рівняння руху:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + \lambda \frac{dz}{dt} + C_k z = F_{Z\Sigma}, \quad (7)$$

тоді

$$-\lambda \frac{dz}{dt} - C_k z = (F_Z)_p. \quad (8)$$

Аналогічно, в напрямку вісі Y складова  $F_{Y\Sigma}$ , що визначається за формулою (1), також діє на заготовку масою  $m$  і відповідно:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + C_k y = F_{Y\Sigma}, \quad (9)$$

тоді

$$-\lambda \frac{dy}{dt} - C_k y = (F_Y)_p. \quad (10)$$

Таким чином, визначені з рівнянь руху заготовки у пружній системі сили  $(F_Z)_p$ ,  $(F_Y)_p$  і мають бути використані для визначення умови закріплення за (5).

Слід зауважити, що під час розточування отвору сила зсуву змінює свій напрям, в наслідок зміни напрямку складової  $(F_Y)_p$ . Проте нерівність (5) на відображає такої зміни, оскільки перед коренем в лівій частині завжди стоїть знак «+». Таке представлення є правомочним, оскільки залежність (5) має характеризувати умови зсуву у будь-який бік за горизонтальною площиною\*.

Тепер треба урахувати динамічні явища, що виникають в пружній системі під дією для крутних моментів (рисунок 4).

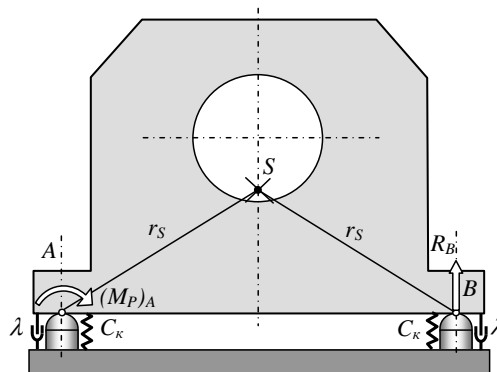


Рисунок 4 – Динамічна модель за кутовою координатою

Крутний момент  $(M_P)_A$  від сили різання навколо опори A урівноважується реакцією  $R_B$  опори B:

$$(M_P)_A = R_B AB. \quad (11)$$

В свою чергу реакція  $R_B$  опори B знаходиться з рівняння руху заготовки навколо опори A:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \lambda (AB)^2 \frac{d\alpha}{dt} + C_k (AB)^2 \alpha = (M_P)_A, \quad (12)$$

тоді, з урахуванням (12):

$$-\lambda \frac{d\alpha}{dt} (AB) - C_k \alpha (AB) = R_B, \quad (13)$$

де  $J$  – момент інерції заготовки навколо опори A,  $J = mr_S^2$ , де  $r_S$  - відстань від центра ваги S заготовки до опори,  $\alpha$  – кут повороту.

Аналогічно реакція  $R_A$  опори A знаходиться з рівняння руху заготовки навколо опори B:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \lambda(AB)^2 \frac{d\alpha}{dt} + C_k(AB)^2 \alpha = (M_P)_B, \quad (14)$$

тоді:

$$-\lambda \frac{d\alpha}{dt}(AB) - C_k \alpha(AB) = R_A, \quad (15)$$

а крутний момент  $(M_P)_B$  від сили різання навколо опори  $B$  урівноважується реакцією  $R_A$  опори  $A$ :

$$(M_P)_B = R_A AB. \quad (16)$$

Отримана математична модель показує, що, навіть при використанні розточувальної борштанги з двома опозитно розташованими різцями, коли сили різання на обох різцях врівноважують одна одну, динамічні явища від крутних моментів все ж таки будуть мати місце.

Таким чином, проектування затискного пристрою передбачає розв'язання диференціальних рівнянь руху за обома осями координат (разом восьмий порядок) і апріорі вимагає застосування чисельних методів на комп'ютері. Зрозуміло, що оскільки такі динамічні системи мають резонанс і зсув за фазою реакцій в опорах відносно діючих складових від сили різання, аналітичний розрахунок необхідної сили затиску практично неможливий. Необхідну силу затиску слід обирати при моделюванні на комп'ютері за всіма умовами (6) – (16) з урахуванням режиму різання, чи діапазону режимів різання, на яких буде використаний такий пристрій.

Наприкінці слід зауважити, що урахування динамічних явищ, які обов'язково притаманні будь-якому процесу різання, значно підвищує адекватність математичної моделі і дозволяє набагато точніше розраховувати верстатні пристрої і аргументувати необхідний вибір коефіцієнту запасу.

**Практична частина.** Таким чином, для проектування пристроїв за запропонованою методикою була створена прикладна програма, головний інтерфейс якої представлений на рисунку 5. Математичне ядро програми складає математична модель, що була розроблена в теоретичній частині, інтегрування диференціальних рівнянь виконується чисельними методами за допомогою процедури Рунге-Кутта четвертого порядку.

За допомогою прикладної програми був виконаний експеримент з метою визначення залежності необхідної сили затиску від режиму різання, а саме, від швидкості різання. Швидкість різання визначає частоту обертання борштанги, що, в свою чергу визначає частоту зміни сили різання у просторі і викликає реакцію пружної системи відповідно до її динамічних характеристик.

На головному інтерфейсі (рисунок 5) у вікні зліва інтерфейсу вводяться вихідні дані системи, геометричні параметри заготовки, режим різання тощо. Потім обирається матеріал заготовки зі списку, що випадає, і натискається кнопка «Процес». У графічному полі, де зображена заготовка 1, відбувається анімація процесу розточування отвору різцем 2 борштанги. В полі осцилографа представляються основні характеристики процесу: лінія 3 – момент  $(M_P)_A$  від сили різання навколо опори  $A$ , лінія 4 – момент  $(M_P)_B$  від сили різання навколо опори  $B$ , лінія 5 – сила тертя, лінія 6 – сила зсуву. За умови закріплення заготовки сила тертя має весь час перевищувати силу зсуву, а моменти мають бути позитивними, тобто не відривати заготовку від опор.

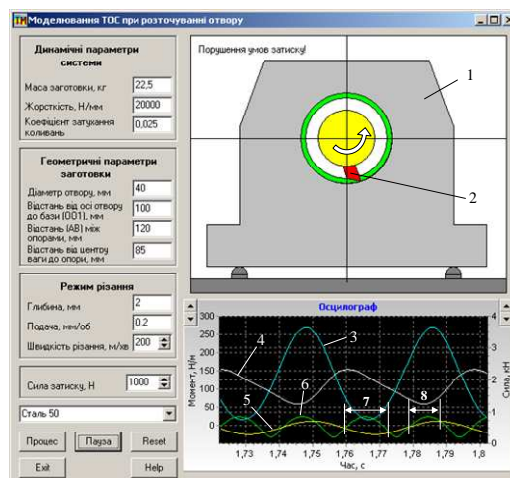


Рисунок 5 – Головний інтерфейс прикладної програми

Після закінчення перехідного процесу, який триває певний час, можна зробити висновок про достатність зазначеної сили затиску. Осцилограми всіх моментів розташовані в позитивній області, що

свідчить про задоволення умовам затиску, проте, осцилограма сили зсуву на певних проміжках часу (дивись дільниці 7 і 8 на рисунку 5) перевищує осцилограму сили тертя. Таким чином, умови закріплення заготовки порушуються, про що свідчить відповідний надпис у верхньому куті графічного вікна, який з'являється саме в моменти порушення умов закріплення.

Для забезпечення умов затиску заготовки необхідно підвищити силу затиску – відповідне віконце на головному інтерфейсі. Підвищувати слід до величини, при якій на протязі певного часу, після закінчення перехідного процесу не буде з'являтися надпис «Порушення умов затиску!».

Таким чином, за допомогою створеної прикладної програми можна визначити необхідну силу затиску при зміні будь-яких параметрів заготовки чи режиму різання. Оскільки пружна технологічна система реально містить коливальні елементи, що представлені відповідною математичною моделлю, то головним збуджуючим впливом слід вважати частоту зміни сили різання та її складових [3]. Ясно, що така частота зміни залежить від призначеної швидкості різання, яку зазвичай обирають виходячи з технологічних міркувань і не урахувавши можливість попадання в резонансні зони пружної системи.

Для підтвердження такого припущення за допомогою прикладної програми були проведені експерименти з визначення залежності необхідної сили затиску від призначеної швидкості різання. При зміні швидкості різання за обраним кроком в певному діапазоні слід дочекатися закінчення перехідного процесу (рисунок 6, а) і, маніпулюючи з кнопками на головному інтерфейсі, підвищувати силу затиску до рівня, що забезпечує виконання умов. На осцилограмах рис.6 лінією 1 позначений момент навколо опори А, лінією 2 – момент навколо опори В, лінією 3 – сила тертя, лінією 4 – сила зсуву. Слід зазначити, що при моделюванні анімація в графічному полі і графіки осцилограм синхронізовані, тобто положення різця відповідає величинам осцилограм за моментом появи на осцилографі.

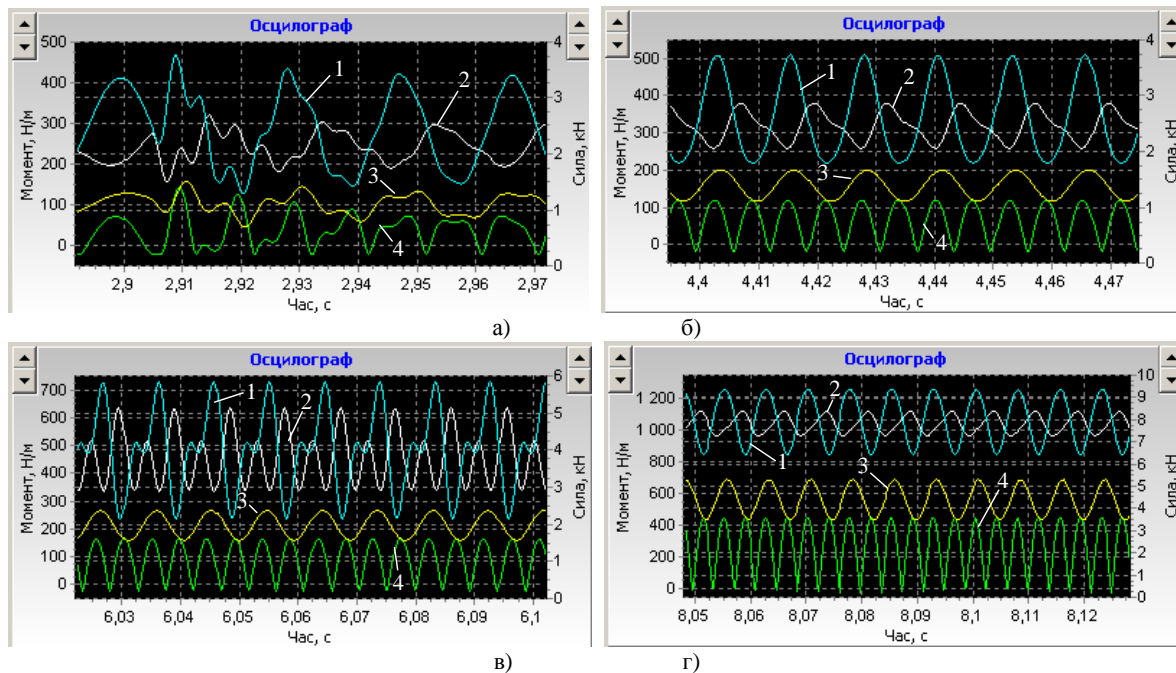


Рисунок 6 - Осцилограми процесу моделювання:

- а) – перехідний процес, б) – швидкість різання 600 м/хв., сила затиску 2770Н,  
в) - швидкість різання 800 м/хв., сила затиску 3940Н, г) - швидкість різання 1000 м/хв., сила затиску 8800Н

Аналіз отриманих результатів показує, що зміна сили тертя і сили зсуву в режимі роботи, що встановився, відповідають гармонічним законам, проте зміна моментів відрізняються від них. Крім того, графік зміни сили зсуву, як зазначалось раніше (дивись абзац, помічений зірочкою) має частоту зміни в два рази більшу, ніж частота зміни сили тертя. Амплітуди всіх осцилограм процесу змінюються в залежності від швидкості різання: при швидкості різання 600м/хв. амплітуда зміни моменту ( $M_{P_A}$ ) складає 290Нм, моменту ( $M_{P_B}$ ) – 125Нм, сили тертя – 0,8кН, сили зсуву – 0,95кН; при швидкості різання 1000м/хв. амплітуда зміни моменту ( $M_{P_A}$ ) складає 400Нм, моменту ( $M_{P_B}$ ) – 250Нм, сили тертя – 1,9кН, сили зсуву – 2,35кН.

За результатами експериментів побудований графік залежності необхідної сили затиску від швидкості різання (рисунок 7). По-суті графік відображає реакцію динамічної системи на зміну частоти сил, що збуджують, і має характер амплітудно-частотної характеристики, точніше її дорезонансної частини. При заданому діаметрі отвору, що розточується, для збільшення частоти сил, що збуджують, необхідно підвищувати швидкість різання за межу 1000м/хв., що буде перевищувати режим різання,

який відповідає сучасним інструментальним матеріалам. Тому для адекватності моделювання було впроваджене таке обмеження, хоча, очевидно, що при подальшому збільшенні швидкості різання буде спостерігатися весь діапазон амплітудно-частотної характеристики. До таких же результатів приведе зменшення жорсткості або збільшення маси заготовки, оскільки частота власних коливань такої пружної системи (без урахування деякої нелінійності системи і процесу різання)  $\omega_0 = \sqrt{C/m}$ .

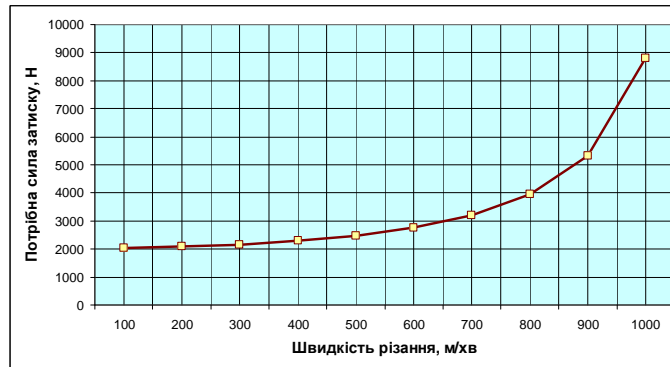


Рисунок 7 – Графік залежності сили затиску від швидкості різання

Під час проведення експериментів порушення умов затиску весь час відбувалося за рахунок перевищення сили зсуву сили тертя. Проте, при відповідній зміні вихідних даних, наприклад, збільшення висоти розташування отвору, що розточується, над опорною поверхнею і відповідно відстані від центру ваги заготовки до опори, ситуація змінюється.

На рисунку 8 показаний випадок, коли при силі затиску 2200Н за співвідношенням сили тертя (лінія 5) і сили зсуву (лінія 6) немає порушення умов затиску, але момент  $(M_p)_A$  навколо опори  $A$  (лінія 3) в деякий час має негативний напрям, що свідчить про порушення умов затиску заготовки з такої причини. Слід зауважити, що оскільки момент  $(M_p)_A$  фізично не може бути негативним, тому що при цьому відбуватиметься відрив заготовки від опори  $B$ , то на осцилограмі такий стан відповідає нулю моменту – дільниця 7 на рисунку 8.

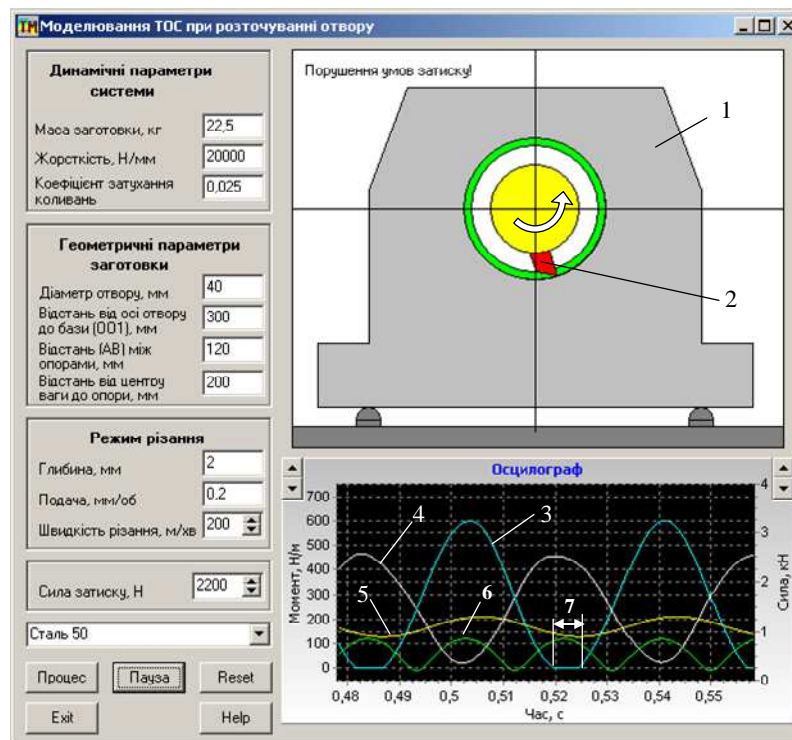


Рисунок 8 – Головний інтерфейс прикладної програми при зміні вихідних даних

## Висновки

1. Моделювання переконливо доводить, що необхідна сила затиску для закріплення заготовки в пристрої залежить від швидкості різання, а точніше від частоти зміни збуджуючої сили різання. При

збільшенні швидкості різання від 100 м/хв. до 1000 м/хв. при інших незмінних складових процесу різання необхідна сила затиску збільшується від 2030Н до 8800Н тобто у 4,3 рази. Тому не випадково для таких пристроїв у довідниковій літературі на підставі практичного досвіду рекомендується застосовувати коефіцієнт запасу, збільшений до 5...6.

2. В залежності від геометричних параметрів заготовки випадок порушення умов затиску може відбуватися або при зменшенні сили тертя у порівнянні з силою зсуву (зсув заготовки за опорами) або при зміні знаку моменту від сил навколо опори (відрив від опори).

3. Отриманий характер зміни залежності необхідної сили затиску від швидкості різання співпадає з амплітудно-частотною характеристикою пружної динамічної системи заготовка-пристрій.

4. Розроблена методика і прикладна програма може бути використана при викладанні дисципліни «Проектування верстатних пристроїв» студентам вищих технічних закладів відповідних спеціальностей.

#### **Бібліографічний список використаної літератури**

1. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений: учебник для вузов / В.С. Корсаков. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1983. — 277 с.

2. Шишкин В.П. Основы проектирования станочных приспособлений. Теория и задачи: учебное пособие / В.П. Шишкин, В.В. Закураев; под редакцией А.Е. Беляева. — М.: НИЯУ МИФИЮ, 2010. — 288 с.

3. Петраков Ю.В. Урахування динамічних характеристик формоутворюючих рухів при проектуванні програми управління для верстатів з ЧПУ / Петраков Ю.В. // Вісник Житомирського технологічного університету. — Житомир, 2007. — Вип. 5, т. 2. — С. 142–150.

*Надійшла до редакції 01.12.2013 р.*

#### **Петраков Ю.В. Определение условий закрепления заготовки при растачивании отверстий**

Разработана математическая модель процесса растачивания отверстия в заготовке, которая установлена на плоскость и два пальца. Математическая модель учитывает динамические явления, имеющие место на практике, а также режим резания при растачивании. Создана прикладная программа, позволяющая определять условия зажима в зависимости от динамических характеристик технологической обрабатывающей системы и режима резания.

**Ключевые слова:** Станочные приспособления, динамические процессы, растачивание отверстий.

#### **Petrakov Y.V. Determination of fixing force for workpiece at boring of openings**

The mathematical model of process of boring of opening is developed in a workpiece which is set on a plane and two fingers. A mathematical model takes into account the dynamic phenomena, taking a place in practice, and also cutting mode at boring. The application program, allowing to determine the terms of clamp depending on dynamic characteristics of the technological processing system and cutting mode, is created.

**Keywords:** Machine-tool devices, dynamic processes, boring of openings.