

УДК 621.09 (07):

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2022-20-08

Кузнєцов Ю.М., Бєляєва А.Ю., Гао Сінмін

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

## РОЗРОБКА ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА З ВРАХУВАННЯМ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЛЕЩАТ

***Анотація** В статті запропонована динамічна модель вертикально-фрезерного верстата, в якій основна увага спрямована на пружно-демпфуючі характеристики універсальних лещат з різними конструктивними особливостями виконання затискних губок. Створення прогресивного технологічного оснащення дозволяє підвищити техніко-економічні показники і розширити технологічні можливості обладнання в умовах механоскладального виробництва. Метою досліджень є розроблення схеми фрезерного верстата, його динамічної моделі з виділенням лещат згідно досягнень в теорії динаміки верстатів і машин. Розглянуто вплив контактних деформацій в стиках при різній кількості рухомих елементів в губках на жорсткість пружної системи верстата. Це дозволить в подальшому виконати математичне моделювання технологічної системи верстата і розробити рекомендації по підвищенню динамічної сталості за рахунок удосконалення лещат для затиску деталей складної форми і пошуку нових технічних рішень. Наведені міркування доцільно використовувати при моделюванні динамічної системи верстата. Доведено, що при пошуку нових технічних рішень універсальних лещат і вибору раціональних варіантів необхідно враховувати контактну жорсткість їх затискних елементів.*

**Ключові слова:** лещата, динамічна модель, фрактали, моделювання, жорсткість, контактні деформації

### Вступ

Виклики четвертої промислової революції "Індустрія 4.0" [1] і наближення п'ятої четвертої революції "Індустрія 5.0" [2] потребують прискіпливого ставлення до випуску технологічного оснащення для метало- і деревообробного обладнання. Створення прогресивного технологічного оснащення дозволяє підвищити техніко-економічні показники і розширити технологічні можливості обладнання в умовах механоскладального виробництва [3, 4].

Широке розповсюдження на металорізальних верстатах, в механоскладальному виробництві і побуті мають лещата різних конструкцій, які в основному мають постійну структуру і один кінематичний ланцюг від двигуна (або ручного привода) до затискних елементів – губок [3,4,6].

Актуальним стає розробка нових універсальних лещат, які дають можливість суттєво розширити їх функціональні можливості (широкоуніверсальність, широкодіапазоність, адаптація до об'єкта будь-якої форми) [7]. Це буде сприяти зменшенню кількості оснащення і технологічних операцій, скорочення часу на підготовку виробництва і полегшенню праці людей при виконанні виробничих процесів, ремонтних роботах і в побутових умовах.

Серед універсальних лещат, що адаптуються до об'єктів будь-якої форми, відносяться так звані фрактальні лещата [11], пов'язані з теорією фракталів, яка поки що отримала визнання тільки математиками і фізиками [8].

В той же час відсутні роботи по дослідженню впливу лещат, як пристосування, на динамічну систему верстата, основними елементами якої є пружна система (ПС), робочі процеси тертя, різання, процеси в двигунах [2,6]. ПС включає верстат, пристосування, інструмент, деталь.

**Мета досліджень** – розробити схему фрезерного верстата, його динамічну модель з виділенням лещат згідно досягнень в теорії динаміки верстатів і машин.

**Сутність досліджень.** Для досягнення поставленої мети розроблена спрощена схема вертикально-фрезерного верстата (рис.1), на якій дії на ПС процесів тертя, різання

(фрезерування) і процесів в двигунах Д ( $D_r, D_b, D_f, D_l$ ) позначені через  $F$  ( $F_r, F_b, F_f$ ) і  $M$  ( $M_r, M_b, M_f, M_l$ ).

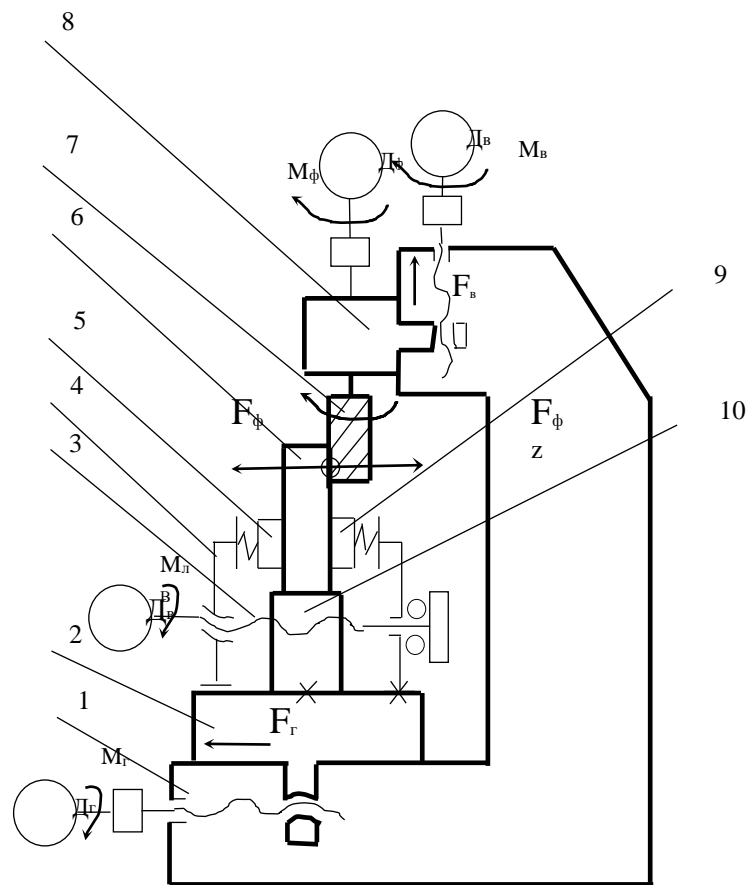


Рис.1. Спрощена схема фрезерного верстата з лещатами: 1-верстат; 2-робочий стіл; 3-гвинтова пара приводу затиску; 4-лещата; 5,9-затискні елементи-губки; 6-об'єкт затиску-деталь; 7-фреза; 8-шпиндельна бабка; 10-упор для деталі

Умовна схема багатоконтурної замкненої динамічної системи верстата, крім дій  $F$ ,  $F_f$  і  $M$ , містить зовнішнє збудження  $f(t)$  на ПС, переміщення  $y$ , які викликані внаслідок цих збуджень, і зміни настроювання  $y(t)$  робочого процесу. При дослідженні процесу різання багатоконтурну динамічну систему для спрощення умовно заміняємо на одноконтурну (рис.2), що складається з процесу різання (фрезерування) і еквівалентної пружної системи (ЕПС), до якої приведені інші елементи системи.

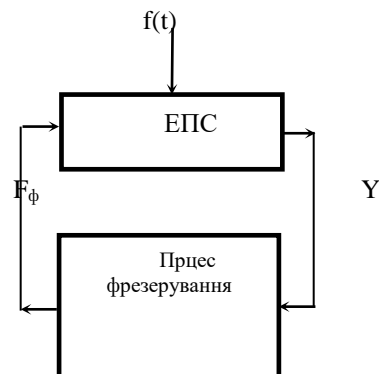


Рис.2. Одноконтурна еквівалентна динамічна система верстата при дослідженні процесу фрезерування

При формуванні ЕПС виділяємо систему «інструмент (фреза)-об'єкт затиску (деталь)-лещата (затискні елементи-губки, привід затиску). В цьому випадку при послідовному з'єднанні для визначення приведеної жорсткості системи складаються їх піддатливості [5,6]:

$$e_{фл} = e_{ф} + e_{д} + e_{л}, \quad (1)$$

де  $e_{фл} = 1/C_{фл}$ ;  $e_{ф} = 1/C_{ф}$ ;  $e_{д} = 1/C_{д}$ ;  $e_{л} = 1/C_{л}$ ;  $C_{фл}$ ,  $C_{ф}$ ,  $C_{д}$ ,  $C_{л}$  – відповідно жорсткості системи «фреза-лещата», фрези, деталі, лещат.

Тоді приведена жорсткість системи «фреза-лещата»:

$$C_{фл} = C_{ф} C_{д} C_{л} / [ C_{л} (C_{ф} + C_{д}) + C_{ф} C_{д} ] \quad (2)$$

Якщо розглянути тільки підсистему «лещата (затискні елементи-губки, привід затиску)», то її приведена жорсткість буде:

$$C_{л} = C_{г} C_{пз} / (C_{г} + C_{пз}), \quad (3)$$

де  $C_{г}$ ,  $C_{пз}$  – відповідно жорсткості губок і приводу затиску.

В приводі затиску твердотілого виконання, крім контактних деформацій, можливі люфти від проміжків, які утворюються в межах конструктивних допусків для переміщення і технологічного виконання для забезпечення шорсткості поверхонь контактуючих пар. Переважна більшість лещат мають привід затиску у вигляді самогальмуючої пари гвинт – гайка ковзання. В результаті жорсткість приводу затиску  $C_{пз}$  завжди буде набагато менше жорсткості  $C_{г}$  цільних губок. Позначим через  $a$  (альфа) співвідношення  $C_{г} / C_{пз}$ .

Тоді рівняння (3) прийме наступний вигляд:

$$C_{л} = C_{г} [ 1/a_{г} ( 1 + 1/a_{г} ) ] \quad (4).$$

Оскільки  $C_{пз} = C_{г} / a_{г}$ , то вплив конструктивного виконання приводу затиску і затискних губок на конструкцію лещат при подальших статичних і динамічних дослідженнях можна уявити графіком, де по осі ординат  $C_{л} / C_{г}$ , а по осі абсцис  $a_{г}$  (рис.3).

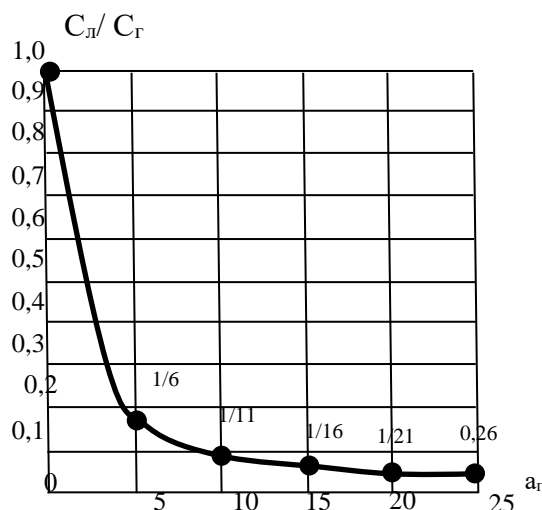


Рис. 3. Картина тенденції впливу конструктивного виконання приводу затиску і затискних губок лещат на їх жорсткість

В лещатах розповсюдженими є дві схеми затиску деталі: притискання деталі Д до жорсткого упору (рис. 4,а) і стискання деталі Д з дох сторін (рис. 4,б). При першій схемі з одного боку розташована рухома губка Г, а з другого – жорсткий упор, який при розрахунках і дослідженнях можна вважати абсолютно жорстким для спрощення. При другій схемі треба враховувати жорсткості обох губок Г<sub>1</sub> і Г<sub>2</sub>.

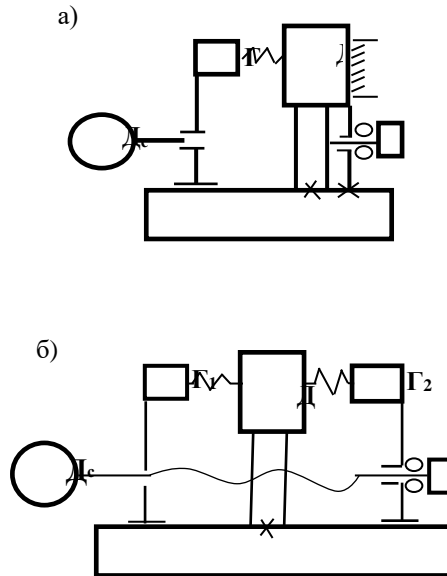


Рис.4. Схеми лещат з розташуванням затискних губок з однієї сторони (а) і двох сторін (б)

Нижче розглянемо приклади визначення приведеної жорсткості з різним конструктивним виконанням затискних губок з точки зору розширення функціональних можливостей по формі деталей, що затискаються (прості, складні, будь-якої форми) і оцінювання зміни приведеної жорсткості (рис.5).

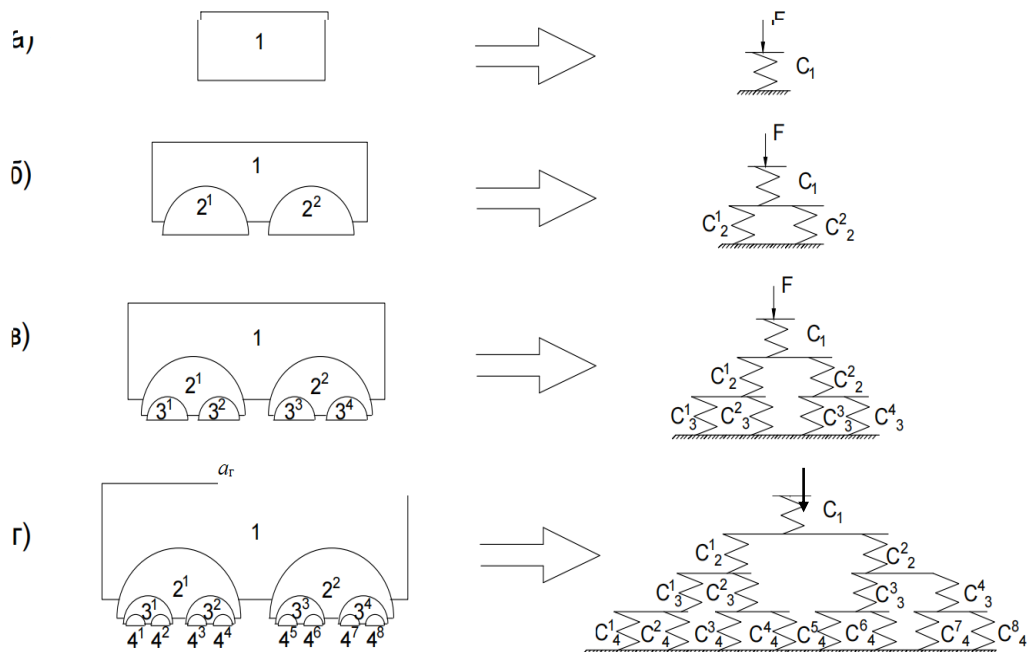


Рис.5. Порівняльна картина зміни жорсткості затискних губок з одного боку різних лещат: традиційні лещата з цільною губкою (а); фрактальні лещата з поворотними губками в кількості дві (б), чотири (в), вісім (г)

**Висновки:**

- 1) Створені передумови для врахування конструктивних особливостей лещат при визначенні їх жорсткості в технологічній системі фрезерного верстата.
- 2) Наведені міркування доцільно використовувати при моделюванні динамічної системи верстата.
- 3) Доведено, що при пошуку нових технічних рішень універсальних лещат і вибору раціональних варіантів необхідно враховувати контактну жорсткість їх затискних елементів.
- 4) Аналогічно приведеним коефіцієнтам жорсткості для розробки динамічної моделі відповідно до рекомендацій [2,5,6] можна враховувати приведені коефіцієнти демпфування елементів системи верстата.

**Список літератури**

1. Кузнецов Ю.Н. Вызовы четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» перед учеными Украины // Вестник ХНТУ, №2 (61), 2017.-с.67-75.
2. Кудинов В.А. Динамика станков. -М.: Машиностроение, 1967.-359 с.
3. Кузнецов Ю.М., Крижанівський В.А., Хамуйєла Т.О. Системно-морфологічний підхід при створенні затискних пристроїв для затиску призматичних заготовок // Наукові праці КНТУ. – 2004. - № 5. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жёсткость.-М.:Машиностроение, 1971.-264 с.
4. Кузнецов Ю.М., Хамуйєла Т.О., Неделчева П.М. Создание зажимных устройств с несколькими кинематическими цепями для призматических заготовок // Труды международной научной конференции «УНИТЕХ'05», Габрово, 24-25.11.2005 г.- с.127-132.
5. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жёсткость.-М.:Машиностроение, 1971.-264 с.
6. Орликов М.Л. Динамика станков.-2-е изд., перераб. и доп.-К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989.-272 с.
7. Патент України № 15583 на корисну модель "Лещата" / Кузнецов Ю. М., Хамуйєла Т. О., Яковенко С. П., МПК В23 Q 3/08, № 200512035 від 14.12.2005 опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.
8. Патент України на корисну модель "Лещата" № 21917/ Кузнецов Ю. М., Хамуйєла Т. О., Панченко М. М., МПК В23 Q 3/08, опубл. 10.04.2007, Бюл. № 4.
9. Патент України на корисну модель "Лещата" № 151096 / Кузнецов Ю. М., Гао Сінмін, МПК В2В 1/04, опубл. 01.06.2022, Бюл. № 22.
10. Тринг М., Лейтуэйт Э. Как изобретать? / Пер. с англ. А. С. Доброславского; под. ред. и предисл. В. В. Партикеева. – М.: Мир, 1980. - 172 с.
11. Patent USA No 1,059,545 "Device for obtaining intimate Contact with, engaging, or clamping bodies of any shape" /Paulin Karl Kunze. Applied field March 21,1912. Serial No. 685,288. Patented Apr.22,1913.
12. Mandelbrot, Benoît . Fractals: Form, chance, and dimension . San-Francisco: Freeman 1977. - с. 346.
13. Mandelbrot Benoit B. The fractal geometry of nature. Vol. 173. New York: Freeman. с. 540. Macmillan, 1983.
14. Sierpinski, Waclaw. Sur une courbe dont tout point est un point de ramification // Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. - Paris. – Tome 160, Janvier - Juin 1915. - Pp. 302 – 305.

**Kuznetsov Yu.M., Bieliaieva A.Yu., Gao Xinmin National**

Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

**DEVELOPMENT OF DYNAMIC MODEL OF MILLING MACHINE TAKING INTO ACCOUNT THE DESIGN FEATURES OF THE VICE**

***Abstract.** In the article a dynamic model of a vertical milling machine is proposed, in which the main attention is directed to the elastic-damping characteristics of universal vises with various design features of the clamping jaws. The creation of progressive technological equipment allows to increase technical and economic indicators and expand the technological capabilities of equipment in the conditions of mechanical assembly production. The purpose of research is to develop a scheme of a milling machine, its dynamic model with the selection of vices according to achievements in the theory of dynamics of machines and machines. The effect of contact deformations in the joints with*

*different numbers of moving elements in the jaws on the rigidity of the elastic system of the machine tool is considered. This will make it possible to perform mathematical modeling of the technological system of the machine and to develop recommendations for increasing dynamic stability due to the improvement of vices for clamping parts of a complex shape and the search for new technical solutions. It is advisable to use the above considerations when modeling the dynamic system of the machine. It has been proven that when searching for new technical solutions for universal vices and choosing rational options, it is necessary to take into account the contact stiffness of their clamping elements.*

**Key words:** *vise, dynamic model, fractals, modeling, stiffness, contact deformations*