



## Аналіз динамічного стану системи «верстатний пристрій – заготовка»

В. О. Іванов<sup>1)</sup>, В. Є. Карпусь<sup>2)</sup>, І. М. Дегтярьов<sup>3)</sup>, І. В. Павленко<sup>4)</sup>, Йімінг (Кевін) Ронг<sup>5)</sup>, <sup>6)</sup><sup>1), 3), 4)</sup> Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007<sup>2)</sup> Національна академія Національної гвардії України, пл. Повстання, 3, Харків, Україна, 61001<sup>5)</sup> Вустерський політехнічний інститут, вул. Інститутська, 100, Вустер, штат Массачусетс, США, 01609<sup>6)</sup> Південний університет науки та технологій Китаю, пл. Ксюань, 1088, Шеньчжень, провінція Гуандун, Китай, 518055

## Article info:

Paper received:

The final version of the paper received:

Paper accepted online:

14 December 2015

06 January 2016

08 January 2016

## Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua<sup>2)</sup> vladislavkarpus@gmail.com<sup>5)</sup> rong@wpi.edu<sup>6)</sup> rongym@sustc.edu.cn

У статті методами чисельного моделювання досліджено коливання системи «верстатний пристрій – заготовка», що виникають у процесі різання на різних переходах при обробці важелів у верстатних пристроях різних систем. У процесі моделювання досліджувалися заготовки з різних матеріалів. Результати гармонічного аналізу показали, що динамічна жорсткість верстатного пристрою з елементів системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв вища, ніж у спеціальному верстатному пристрої та верстатному пристрої, складеному з елементів універсально-збірних пристроїв. Амплітуда коливань у місцях оброблюваних поверхонь у верстатному пристрої, складеному з елементів системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв, не перевищує допуски на виготовлення важеля.

**Ключові слова:** верстатний пристрій, універсально-збірний переналагоджуваний пристрій, система «верстатний пристрій – заготовка», амплітудно-частотна характеристика, динамічна жорсткість, чисельне моделювання, точність, важіль.

## ВСТУП

Важливу роль у забезпеченні випуску конкурентоспроможної продукції відіграють верстатні пристрої (ВП). Вони є основною і невід'ємною частиною технологічної системи. Це підтверджується тим, що їх частка складає 70–80 % від загального обсягу технологічної оснастки [1]; 80–90 % витрат на технологічну підготовку виробництва витрачається на проектування та виготовлення ВП [2]; 10–20 % загальної вартості виробничих систем становить вартість ВП [3]; до 40 % бракованих деталей у машинобудуванні виникає через недосконалість ВП [4].

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасне машинобудування характеризується багатономенклатурністю деталей, що випускаються. Зі збільшенням номенклатури виробів при використанні спеціальних ВП зростає час проектування та виготовлення технологічної оснастки, що приводить до збільшення собівартості готової продукції. Переналагодження збірних ВП, до яких належать універсально-збірні пристрої (УЗП), передбачає їх часткове або повне перекомпонування при переході до обробки деталей іншого типорозміру, що також потребує витрат часу. До того ж жорсткість збірних ВП через велику кількість з'єднань та наявність Т-подібних пазів часто є недостатньою для продуктивної обробки з режимами різання, що рекомендують світові ви-

бники різального інструменту. Проблемою також є надмірна металомісткість зазначених вище ВП. Тому актуальним є впровадження гнучких ВП, що забезпечують переналагодження на інший типорозмір деталей [5–7] і мають достатню жорсткість при мінімально можливій масі. Разом із тим впровадження гнучких ВП повинно бути обґрунтоване за критеріями досягнення необхідної точності та якості поверхонь, заданих конструктором на кресленнях деталей, що можуть бути оброблені у ВП цього типу. Тому необхідно використовувати чисельні методи оптимізації для зниження металомісткості ВП без погіршення точнісних показників.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Більш актуальною стає інтенсифікація процесів механічної обробки, тобто концентрація операцій при проектуванні технологічних процесів (ТП). Це дозволяє скоротити витрати штучного часу за рахунок зменшення частки допоміжного часу, що в умовах жорсткої конкуренції на ринку, багатономенклатурності деталей машинобудування та можливостей сучасних металорізальних верстатів є актуальним завданням на сьогодні [8]. Але для реалізації такого ТП на практиці необхідні гнучкі ВП, здатні до переналагодження в широкому діапазоні розмірів, забезпечуючи необхідну жорсткість і точність розмірів.

Запропоновано прогресивний ТП механічної обробки деталей типу важелів [9], в якому суміщено всі свердлильно-фрезерно-розточувальні операції. Це реалізовано завдяки розробленому переналаджуваному установлювально-затискному модулю [10].

Під час вивчення систем «ВП – заготовка» основна увага приділяється аналізу контактної взаємодії між заготовкою та установлювальними й затискними елементами ВП. У праці [11] досліджено тертя між елементами ВП та заготовкою, а також визначено деформації, що виникають у місцях їх контакту.

Cioata і Kiss [12] розробили та представили спрощену аналітичну модель контактної деформації між затискними елементами ВП і заготовкою і скінченноелементну модель для оцінювання контактної деформації у місцях контакту затискних елементів ВП і заготовки.

Zheng [13] розробив скінченноелементну модель визначення стійкості рівноважного положення ВП із функціональними елементами для розв'язання контактних задач при закріпленні заготовки у ВП. У моделі оптимізації система «ВП – заготовка» розглядалася як система контактуючих твердих тіл за умови кулонівського тертя на стиках із прикладанням прогнозованих зовнішніх сил від статичного навантаження процесу механічної обробки у моделі «ВП – заготовка». У дослідженнях не враховано нестационарність сил та моментів, що виникають у процесі різання.

Motlagh та ін. у праці [14] за допомогою розробленої моделі «Armstrong» досліджували ковзання та мікроковзання, що виникають під дією сил закріплення у системі «ВП – заготовка». Це дозволило попередньо дослідити та визначити вищезазначені процеси при великих силах закріплення, що було неможливим у попередніх моделях.

Li і Melkote [15] дослідили коливання системи «ВП – заготовка» від дії динамічних складових сил різання без урахування жорсткості функціональних елементів із застосуванням рівнянь руху. При цьому рівняння руху, що регулюють динаміку системи «ВП – заготовка» при механічній обробці, були одержані за допомогою методу Ньютона-Ейлера. Крім того, у цій праці відсутнє урахування видалення шару матеріалу, що є невід'ємною частиною процесу механічної обробки.

Особливістю дослідження Deng [16] є те, що система «ВП – заготовка» розглядалася як квазістатична з урахуванням впливу видалення шару оброблюваного матеріалу, але без урахування динамічних складових сил та моментів різання, що виникають у процесі механічної обробки.

Для урахування зміни маси заготовки у процесі механічної обробки Zhang та ін. [17] використовували матриці зміни інерції та жорсткості.

Проте в усіх розглянутих працях вплив елементів закріплення розглядається на підставі принципу «звільнення від опор» з постійними величинами відповідних реакцій. Із появою активних методів контролю недостатнім є використання вищеприписаних підходів до проектування ВП для одержання змінних у часі значень сил та моментів різання й переміщення елементів системи «ВП – заготовка».

Bakker та ін. у своїх працях [18–21] вперше запропонували використовувати гідравлічний привід для закріплення заготовки із системами зворотного

зв'язку для автоматичного регулювання величин сил закріплення залежно від величин сил різання. Ця методологія була випробувана для різних стратегій обробки. Також у працях [21–22] було досліджено процес шліфування тонкостінних деталей малої жорсткості з використанням п'єзоелектричних датчиків зворотного зв'язку при закріпленні електро-механічним способом із можливістю регулювання величини сил закріплення з урахуванням величини амплітуди коливань заготовки.

Праці В. В. Микитяського [24–25] присвячені розрахунку динамічної похибки ВП як результату зміни параметрів у процесі механічної обробки. Висока трудомісткість розрахунків обмежує використання цієї методики у виробничих умовах при здійсненні швидкого проектування та оптимізації широкої номенклатури конструкцій ВП.

У праці Р. Н. Заріпова [26] висвітлюється дослідження впливу динаміки ВП на динамічні характеристики всієї технологічної системи. При цьому увага приділяється дослідженню жорсткості ВП та визначенню необхідної точності ВП для обробки деталей із різними точнісними параметрами. Експериментальні дослідження динамічного стану заготовки у ВП показали, що ВП найбільше впливає на амплітуду і частоту коливань оброблюваної заготовки. Виявлено резонансні зони для різних конструкцій ВП і досліджено вплив зміни величини сил різання у процесі механічної обробки на величину амплітуди коливань. Це призводить до погіршення точності та шорсткості оброблюваної поверхні, а також до пошкодження інструменту. Недоліком цієї роботи є відсутність достовірної математичної моделі, що підтверджується експериментальними даними. Це унеможливило розрахунки за інших вихідних умов (матеріал заготовки, інструмент, конструкція ВП).

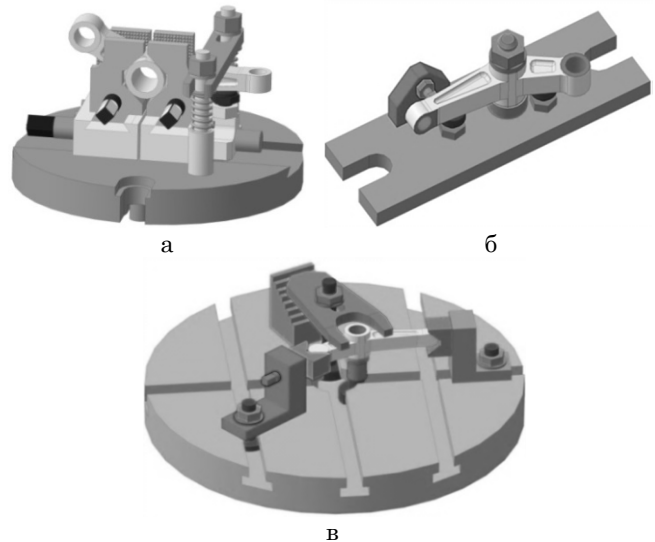


Рисунок 1 – Верстатні пристрої для механічної обробки деталей типу важелів: а – на основі системи УЗПП; б – спеціальний; в – складений з елементів системи УЗП

Для реалізації прогресивного ТП [9] запропоновано конструкцію ВП на основі елементів системи універсально-збірних переналаджуваних пристроїв (УЗПП) (рис. 1 а) [10]. Для обґрунтування доцільності використання такої конструкції виконане дос-

лідження напружено-деформованого стану елементів системи «ВП – заготовка» [27]. Результати показали, що величини переміщень і напружень, що виникають у процесі механічної обробки, у ВП, складеному з елементів системи УЗПП, менші, ніж у традиційних ВП при реалізації типового ТП (рис. 1 б, в). Модальний аналіз підтвердив, що запропонована конструкція є більш ефективною.

Для визначення величини амплітуди коливань у місцях оброблюваних поверхонь, що виникають при зміні величини зовнішніх навантажень, необхідно дослідити динамічну жорсткість різних типів ВП за допомогою гармонічного аналізу.

## МЕТА РОБОТИ

Визначення динамічного стану елементів системи «ВП – заготовка» при механічній обробці важелів у різних типах ВП.

Для досягнення поставленої мети сформульовані задачі дослідження:

- створення скінченноелементної моделі системи «ВП – заготовка», що описує її динаміку у процесі механічної обробки;
- побудова амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) ВП;

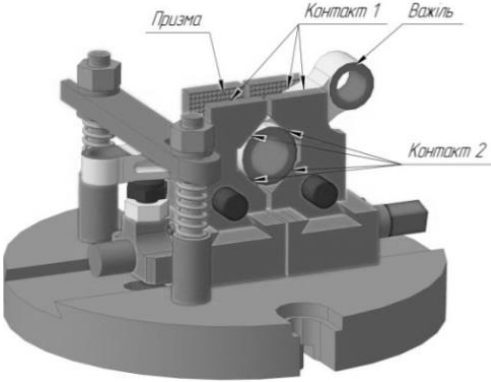
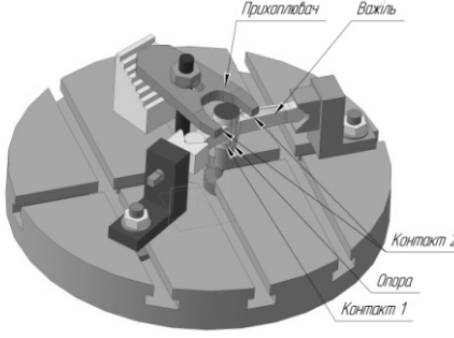
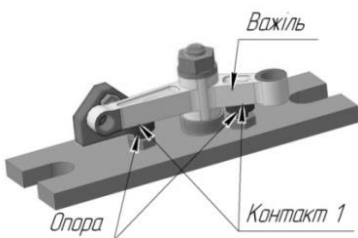
- виявлення резонансних частот і порівняння з частотами робочих режимів різання;
- визначення жорсткості ВП.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом дослідження є коливання заготовки у ВП, складеному з елементів УЗПП, ВП з елементів системи УЗП та спеціальному ВП при обробці деталей типу важелів. Гармонічний аналіз виконувався за допомогою вбудованого модуля Harmonic Analysis програми ANSYS Workbench. На основі попередніх результатів модального аналізу [27] визначено власні частоти системи «ВП – заготовка». Амплітуди динамічних складових сил та моментів різання обирались у межах 20 % від номінального значення їх величин [28].

У процесі моделювання задавалися такі граничні умови (табл. 1) та властивості матеріалу ВП й заготовки (табл. 2). Модель враховує кулонівське тертя між контактними поверхнями ВП, які мають приблизно однакову величину шорсткості (1,6 мкм за критерієм Ra) з коефіцієнтом 0,1 [28]. Величини коефіцієнтів тертя для контактних пар між елементами ВП й заготовкою наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Граничні умови чисельного моделювання системи «ВП – заготовка»

Схема розміщення контактів	Базова поверхня / тип закріплення	Параметри реалізованих груп з'єднань
	Нижня поверхня плити / Fixture support	Контакт 1 – «бокові поверхні призм – бокові поверхні важеля»: <ul style="list-style-type: none"> <li>– поверхні призм – рифлені;</li> <li>– поверхні заготовки – необроблені;</li> <li>– коефіцієнт тертя <math>f = 0,7</math>;</li> </ul> Контакт 2 – «робочі поверхні призм – циліндричні поверхні важеля»: <ul style="list-style-type: none"> <li>– поверхні призм – гладкі;</li> <li>– поверхня заготовки – необроблена;</li> <li>– коефіцієнт тертя <math>f = 0,2</math>.</li> </ul>
	Нижня поверхня плити / Fixture support	Контакт 1 – «опора – торець важеля»: <ul style="list-style-type: none"> <li>– поверхня опори – рифлена;</li> <li>– поверхня заготовки – необроблена;</li> <li>– коефіцієнт тертя <math>f = 0,7</math>;</li> </ul> Контакт 2 – «затискні поверхні прихоплювача – бокові поверхні важеля»: <ul style="list-style-type: none"> <li>– поверхні прихоплювача – гладкі;</li> <li>– поверхні заготовки – необроблені;</li> <li>– коефіцієнт тертя <math>f = 0,2</math>.</li> </ul>
	Нижня поверхня плити / Fixture support	Контакт 1 – «опора – бокові поверхні важеля»: <ul style="list-style-type: none"> <li>– поверхні опор – рифлені;</li> <li>– поверхні заготовки – необроблені;</li> <li>– коефіцієнт тертя <math>f = 0,7</math>.</li> </ul>

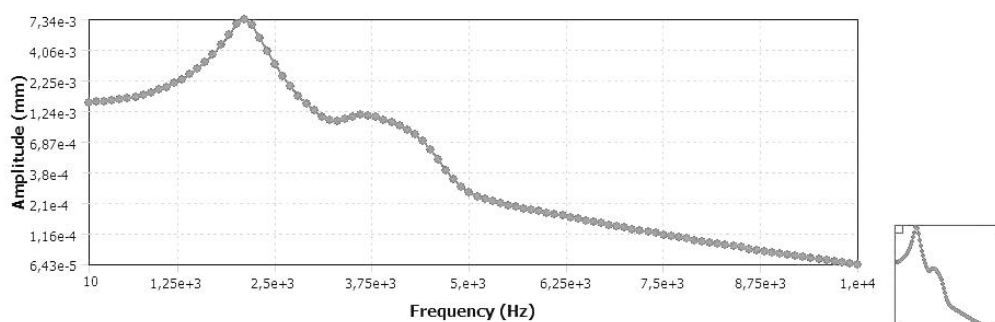
Таблиця 2 – Механічні властивості матеріалів заготовки та елементів ВП

Матеріал	Модуль пружності Е, ГПа	Коефіцієнт Пуассона $\mu$	Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Межа міцності при розтягуванні [ $\sigma_{розт}$ ], ГПа	Межа міцності при стисканні [ $\sigma_{ст}$ ], ГПа	Межа текучості $\sigma_t$ , ГПа
Сталь 40ХН ГОСТ 4543-71	200	0,3	7850	0,980	0,980	0,785
Сірий чавун СЧ 20 ГОСТ 1412-85	110	0,28	7200	0,245	0,451	–
Алюмінієвий сплав АЛ 4 ГОСТ 1853-93	100	0,27	2700	0,420	0,420	0,360
Сталь 45 ГОСТ 1050-88 (термооброблена)	200	0,3	7850	0,950	0,950	0,726

Діапазон частот коливань був вибраний із міркувань забезпечення охоплення трьох перших частот власних коливань усіх ВП, значення яких були одержані раніше. Максимальна третя частота власних коливань для ВП складеного з елементів системи УЗП, становила 9547 Гц, тому обираємо діапазон 0 - 104 Гц. Для діапазону частот коливань 0 - 104 Гц одержані АЧХ елементів ВП, виявлені до та зарезонансні режими. Попередні дослідження показали, що діапазон робочих частот процесу різання при обробці важеля не перевищує 100 Гц, що дозволяє обмежитися діапазоном 0 - 100 Гц на графіках АЧХ при визначенні величини переміщень. Для забезпечення однакових умов порівняльний аналіз величини переміщень проводимо на максимально можливій частоті, що може виникнути у процесі обробки – 100 Гц для всіх ВП.

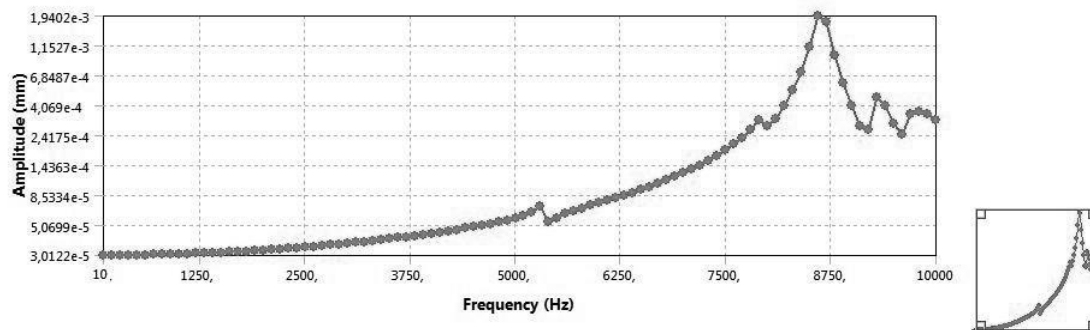
У результаті чисельного моделювання динаміки системи «ВП – заготовка» одержані значення амплітуд коливань і резонансних частот, зумовлених процесом різання. Визначені значення переміщень точок у зоні обробки для ВП типового та запропонованого ТП (табл. 3, рис. 2, 3).

Frequency Response



а

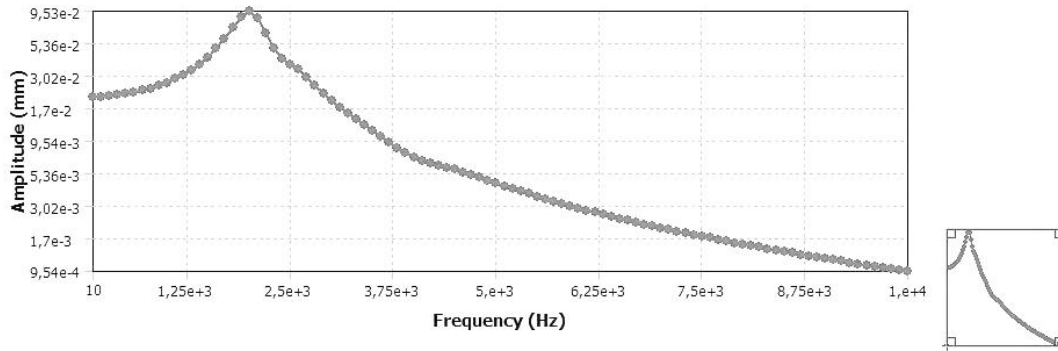
Frequency Response



б

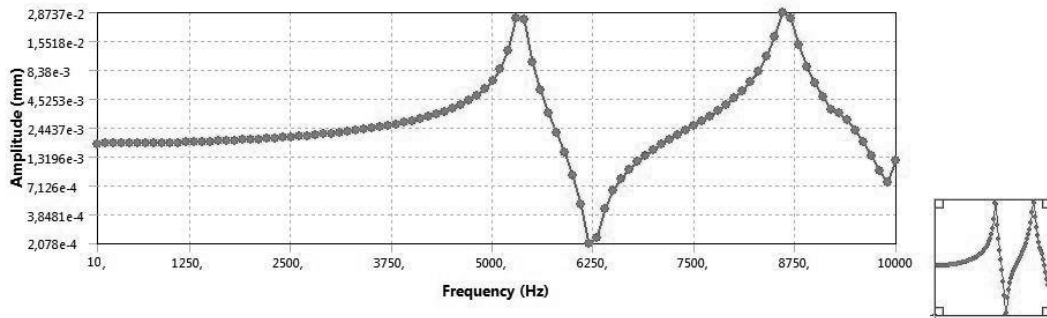
Рисунок 2 – Амплітудно-частотна характеристика при фрезеруванні бобишки головного отвору (матеріал важеля – сталь 40ХН) для: а – ВП, складеного з елементів комплекту УЗП; б – ВП, складеного з елементів системи УЗПП

Frequency Response



а

Frequency Response



б

Рисунок 3 – Амплітудно-частотна характеристика при свердлінні бобишки головного отвору (матеріал важеля – сталь 40ХН) для: а – ВП, складеного з елементів комплексу УЗП; б – ВП, складеного з елементів системи УЗПП

Таблиця 3 – Результати гармонічного аналізу

Технологічний перехід, де виникають найбільші навантаження	Матеріал важеля	Максимальна амплітуда, мкм	
		Типовий ТП	Запропонований ТП
Фрезерування торця бобишки головного отвору	40ХН	1,4	0,03
	СЧ20	1,1	0,024
	АЛ4	1,4	0,022
Свердління головного отвору	40ХН	24	1,7
	СЧ20	20	1,2
	АЛ4	21	1,2
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	40ХН	1,2	0,89
	СЧ20	1,2	0,77
	АЛ4	1,1	0,74
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	40ХН	12	11,5
	СЧ20	11	9,4
	АЛ4	12	11,4
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно до головного	40ХН	1,4	1,3
	СЧ20	1,5	1,4
	АЛ4	3,0	1,9
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно до головного	40ХН	16,1	15,3
	СЧ20	18,2	17,9
	АЛ4	15,1	14,5

Амплітуди коливань, що виникають на всіх переходах механічної обробки у спеціальному ВП та ВП з елементів комплексу УЗП, більші, ніж у ВП системи УЗПП. Це свідчить, що за інших рівних умов відхилення розмірів, форми і взаємного розташування поверхонь деталі, що обробляється у ВП системи УЗПП, є меншими, що сприяє підвищенню точності обробки.

Результати дослідження та порівняння динамічної жорсткості ВП для деяких переходів зведено в табл. 4.

Дані табл. 4 свідчать, що динамічна жорсткість ВП з елементів системи УЗПП вища, ніж спеціального ВП, на 5 % та у 15 разів вища за жорсткість ВП, складеного з елементів УЗП, що забезпечує підвищення показників точності при обробці деталей типу важелів.

Таблиця 4 – Результати розрахунку динамічної жорсткості ВП

Технологічний перехід	Матеріал важеля	Амплітуда динамічної складової сили різання, Н	Максимальна амплітуда переміщення точки, мкм		Розрахункова динамічна жорсткість, $10^7$ Н/мм		Збільшення жорсткості, разів
			Типовий ТП	Запропонований ТП	Типовий ТП	Запропонований ТП	
Свердління головного отвору	40ХН	1099	24	1,7	0,46	6,46	14,1
	СЧ20	704	20	1,2	0,35	5,87	16,6
	АЛ4	597	21	1,2	0,28	4,98	17,5
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	40ХН	993	12	11,5	0,83	0,86	1,04
	СЧ20	650	11	9,4	0,59	0,69	1,17
	АЛ4	520	12	11,4	0,43	0,46	1,05
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно до головного	40ХН	705	16	15,3	0,44	0,46	1,05
	СЧ20	597	18	17,9	0,33	0,33	1,02
	АЛ4	463	15	14,5	0,31	0,32	1,04

## ВИСНОВКИ

Аналіз динамічного стану елементів системи «ВП – заготовка» на прикладі механічної обробки деталей типу важелів за запропонованим ТП й режимами різання свідчить, що резонанс не виникає.

Амплітуди коливань, що виникають при механічній обробці заготовки у ВП, складеному з елементів системи УЗПП, не перевищують допуски на обробку на відповідних переходах.

Динамічна жорсткість ВП з елементів системи УЗПП вища, ніж ВП типового ТП, у 1,05 та 15 разів відповідно.

Величини амплітуд коливань у ВП з елементів системи УЗПП менші у середньому на 0,01–0,02 мм, ніж у компоновках ВП типового ТП.

## ПОДАЛЬШІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для підтвердження ефективності розробленого технічного рішення планується проведення експериментальної перевірки результатів чисельного моделювання щодо визначення величин переміщень під дією статичного навантаження та амплітуд коливань у процесі механічної обробки з урахуванням динамічної складової сил та моментів різання. Також доцільним є проведення досліджень стійкості рівноважного положення елементів системи «ВП – заготовка» під дією зовнішніх сил.

## Analysis of the dynamic state of the system «fixture – workpiece»

V. O. Ivanov<sup>1)</sup>, V. E. Karpus<sup>2)</sup>, I. M. Dehtiarov<sup>3)</sup>, I. V. Pavlenko<sup>4)</sup>, Yiming (Kevin) Rong<sup>5), 6)</sup>

<sup>1), 3), 4)</sup> *Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., Sumy, Ukraine, 40007*

<sup>2)</sup> *National Academy of National Guard of Ukraine, 3, Povstannyi avenue, Kharkiv, Ukraine, 61001*

<sup>5)</sup> *Worcester Polytechnic Institute, 100, Instituter Rd, Worcester, USA, 01609*

<sup>6)</sup> *South University of Science and Technology of China, 1088, Xueyuan Rd., Shenzhen, Guangdong, China, 518055*

In this article the vibrations of the “fixture – workpiece” system arising during the cutting process at various manufacturing steps under machining of levers in different fixture systems were investigated by means of numerical simulation methods. The workpieces from different materials were investigated during modeling. The results of harmonic analysis showed that the dynamic stiffness of modular adjustable fixture is higher than the stiffness of the dedicated fixture and the modular fixture. The amplitude of the vibrations in the points of machining surfaces in the modular adjustable fixture does not exceed the tolerances on the manufacturing of lever.

**Keywords:** fixture, modular adjustable fixture, “fixture – workpiece” system, frequency response, dynamic stiffness, numerical simulation, accuracy, lever.

## Анализ динамического состояния системы «станочное приспособление – заготовка»

В. А. Иванов<sup>1)</sup>, В. Е. Карпусь<sup>2)</sup>, И. М. Дегтярев<sup>3)</sup>, И. В. Павленко<sup>4)</sup>, Йиминг (Кевин) Ронг<sup>5)</sup>, <sup>6)</sup>

<sup>1), 3), 4)</sup> Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, Украина, 40007

<sup>2)</sup> Национальная академия Национальной гвардии Украины, пл. Восстания, 3, Харьков, Украина, 61001

<sup>5)</sup> Вустерский политехнический институт, ул. Институтская, 100, Вустер, штат Массачусетс, США, 01609

<sup>6)</sup> Южный университет науки и технологий Китая, пл. Ксююань, 1088, Шеньчжень, провинция Гуандун, Китай, 518055

В статье методами численного моделирования исследованы колебания системы «станочное приспособление – заготовка», возникающие в процессе резания на различных переходах при обработке рычагов в станочных приспособлениях различных систем. В процессе моделирования были исследованы заготовки из различных материалов. Результаты гармонического анализа показали, что динамическая жесткость станочного приспособления из элементов системы универсально-сборных переналаживаемых приспособлений выше, чем у специального станочного приспособления, и станочного приспособления, собранного из элементов системы универсально-сборных приспособлений. Амплитуда колебаний в местах обрабатываемых поверхностей в станочном приспособлении из элементов системы универсально-сборных переналаживаемых приспособлений не превышает допуски на изготовление рычага.

**Ключевые слова:** станочное приспособление, универсально-сборное переналаживаемое приспособление, система «станочное приспособление – заготовка», амплитудно-частотная характеристика, динамическая жесткость, численное моделирование, точность, рычаг.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ряховский А. В. Разработка и внедрение комплекта унифицированной технологической оснастки для обработки корпусных деталей специзделий: дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Ряховский Алексей Владимирович. – Харьков, 1996. – 135 с.
2. Иванов В. О. Вибір оптимальних компоновок верстатних пристроїв для верстатів з ЧПК: дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Иванов Віталій Олександрович. – Харьков, 2010. – 239 с.
3. Hashemi H. A case-based reasoning for design of machining fixture / H. Hashemi, A. M. Shaharoum, et al. // International Journal of Manufacturing Technology, 2014. – Vol. 74. – P. 113–124.
4. Wang H. Computer aided fixture design: recent research and trends / H. Wang, Y. Rong, et al. // Computer-Aided Design, 2010. – Vol. 42 (12). – P. 1085–1094.
5. Карпусь В. Е. Обоснование выбора системы приспособлений в серийном производстве / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Високі технології в машинобудуванні. – Харьков : НТУ «ХП», 2008. – Вып. 1 (16). – С. 125–134.
6. Карпусь В. Е. Универсально-сборные переналаживаемые приспособления / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Вестник машиностроения. – 2008. – № 11. – С. 46–50.
7. Karpus' V. E. Universal-composite adjustable machine-tool attachments / V. E. Karpus', V. A. Ivanov // Russian engineering research, 2008. – Vol. 28, No. 11. – P. 1077–1083.
8. Карпусь В. С. Інтенсифікація процесів механічної обробки: монографія / В. С. Карпусь, В. О. Іванов, та ін.; за ред. В. С. Карпуся. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 436 с.
9. Иванов В. О. Технологія виготовлення автомобільних деталей складної форми / В. О. Іванов, В. С. Карпусь, І. М. Дегтярьов, В. Р. Богдан // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – Х. : Національна академія Національної гвардії України, 2015. – Вып. 1 (25). – С. 85–90.
10. Пат. на корисну модель № 98925 Україна, МПК (2015) B23В 39/00. Переналагоджуваний установлювально-затискний модуль для установки деталей типу важелів / Иванов В. О., Дегтярьов І. М., Карпусь В. С.
11. Kumbhar, N. Finite element modelling and analysis of workpiece-fixture system / N. Kumbhar, G. Patil, S. Mohite, M. Sutar // International journal of applied research in mechanical engineering. – 2012. – Vol. 2, Is. 2.
12. Cioata, V. The machining error due to contact deformation of workpiece-fixture system / V. Cioata, I. Kiss // ACTA Technical bulletin of engineering. – 2009. – P. 33–36.
13. Zheng, Y. Finite element analysis for fixture stiffness : PhD Thesis. – Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA, 2005.
14. Moltagh H. E. Application of the armstrong friction model to study dynamic transient response in workpiece-fixture systems / H. E. Moltagh, M. Hamed, M. Nikkhah-Bahrany // Journal of Engineering Manufacture. – 2004. – № 218. – P. 737–747.
15. Li B. Fixture clamping force optimization and its impact on workpiece location accuracy / B. Li, S. N. Melkote // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2001. – № 17. – P. 104–113.
16. Deng H. Analysis and synthesis of fixturing dynamic stability in machining accounting for material removal effect : PhD Thesis. – Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2006.
17. Zhang X. M. Matrix perturbation method for predicting dynamic modal shapes of the workpiece in high-speed machining / X. M. Zhang, L. M. Zhu, H. Ding // Journal of Engineering Manufacture. – 2009. – № 144. – P. 177–183.
18. Bakker O. J. Control of a workpiece holder with piezo-electric-mechanical actuation / O. J. Bakker, A. Popov, S. Ratchev // Journal of Machine Engineering. – 2008. – № 8. – P. 17–28.
19. Bakker O. J. Investigation into feedback control of part-fixture systems undergoing dynamic machining forces / O. J. Bakker, A. Popov, S. Ratchev // Proceedings of ISMA 2008. – 2008. – P. 131–140.
20. Bakker O. J. Fixture control by hydraulic actuation using a reduced workpiece model / O. J. Bakker, A. Popov, S. Ratchev // Journal of Engineering Manufacture. – 2009. – № 223. – P. 1553–1566.
21. Bakker O. J. Model-based control of an advanced actuated

part-fixture system / O. J. Bakker, A. Popov, S. Ratchev // ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference. – 2009. – Vol. 1. – P. 381–393.

22. Papastathis T. N. et. al. Development of a reconfigurable fixture for the automated assembly and disassembly of high pressure rotors for rolls-royce aero engines / T. N. Papastathis. // Proceedings of the International Precision Assembly Seminar. – 2010. – P. 283–289.

23. Papastathis T. N. et. al. Dynamics model of active fixturing systems for thin-walled parts under moving loads / T. N. Papastathis // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – № 9. – P. 1233–1247.

24. Микитянський В. В. Аналіз динамічної точності станочних пристосувань / В. В. Микитянський, Л. М. Микитянська // Вестник АГТУ. – 2006. – № 1. – С. 158–168.

25. Микитянський В. В. Оптимізація параметрів станочних пристосувань по точностним критеріям / В. В. Ми-

китянський, Л. М. Микитянська // Вестник АГТУ. – 2008. – № 2. – С. 74–78.

26. Зарипов Р. Н. Постановка задач исследования динамики станочных приспособлений на характеристики всей технологической системы / Р. Н. Зарипов // Машиностроение. – 2003. – № 3. – С. 18–24.

27. Іванов В. О. Чисельне моделювання верстатних пристроїв для механічної обробки деталей типу важелів / В. О. Іванов, В. Є. Карпусь та ін. // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – № 4. – С. 108–113.

28. Ильицкий В. Б. Станочные приспособления. Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационных свойств / В. Б. Ильицкий, В. В. Микитянський и др. - М.: Машиностроение, 1989. – 208 с.

## REFERENCES

- Rjahovskij, A. V. (1996) Razrabotka i vnedrenie kompleksa unificirovannoj tehnologicheskoy osnastki dlja obrabotki korpusnyh detalej specizdelij [Development and implementation of a unified set of technological equipment for machining of prismatic parts of special products] Candidate's thesis. Kharkiv [in Russian].
- Ivanov, V. O. (2010) Vybir optimalnyh komponovok verstatnyh prystroyiv dlya verstativ z ChPK [The choice of optimal fixtures for CNC machine tools] Candidate's thesis. Kharkiv [in Ukrainian].
- Hashemi H., & Shaharoum A. M. et al. (2014). International journal of manufacturing technology. Vol. 74. P. 113–124.
- Wang H., & Rong Y. et al. (2010). Computer-Aided Design. Vol. 42 (12). P. 1085–1094.
- Karpus V. E., & Ivanov V. A. et al. (2008). Obosnovanie vybora sistemy prisposoblenij v serijnom proizvodstve [Justification of the choice of fixture system in batch manufacturing]. Visoki tehnologii v mashinobuduvanni – High technologies in mechanical engineering, Vol. 1 (16), 125–134 [in Russian].
- Karpus V. E., & Ivanov V. A. (2008). Universalno-sbornye perenalazhivaemye prisposoblenija [Modular adjustable fixtures]. Vestnik mashinostroenija – Journal of Mechanical Engineering. Vol. 11, 46–50 [in Russian].
- Karpus V. E., & Ivanov V. A. (2008). Russian engineering research. Vol. 28. P. 1077–1083.
- Karpus V. E., & Ivanov V. O. et al. (2012). Intensifikacija procesiv mehanichnoy obrobki [Intensification of manufacturing processes]. Sumi: SSU [in Ukrainian].
- Ivanov V. O., Karpus V. E., Dehtiarov I. M., Bohdan V. R. (2015). Tehnologija vilotovlennja avtomobil'nih detalej skladnoi formi [Manufacturing technology of automobile complex parts]. Zbirnik naukovih prac' Nacional'noi akademii Nacional'noi gvardii Ukraini – Proceedings of the National Academy of the National Guard of Ukraine. Vol. 1 (25), 85–90 [in Ukrainian].
- Ivanov V. O., Dehtiarov I. M., Karpus V. E. (2015). Perenalagodzhuvanij ustanovljuval'no-zatisknij modul' dlja ustanovlennja detalej tipu vazheliv [Adjustable locating-and-clamping module for levers setting]. Pat. na korisnu model № 98925 Ukraina, MPK (2015) B23B 39/00.
- Kumbhar, N. Patil, G., Mohite, S., & Sutar M. (2012). International journal of applied research in mechanical engineering. Vol. 2, Issue 2.
- Cioata, V., & Kiss I. (2009). ACTA Technical Bulletin of Engineering. P. 33–36.
- Zheng, Y. (2005). Finite element analysis for fixture stiffness. Doctor's thesis. Worcester.
- Moltagh, H. E., Hamed M., & Nikkha-Bahramy M. (2004). Journal of engineering manufacture. Vol. 218. P. 737–747.
- Li, B., & Melkote S. N. (2001) International journal of advanced manufacturing technology. Vol. 17. P. 104–113.
- Deng, H. (2006). Analysis and synthesis of fixturing dynamic stability in machining accounting for material removal effect. Doctor's thesis. Atlanta.
- Zhang, X. M., Zhu L. M., & Ding H. (2009). Journal of engineering manufacture. Vol. 144. P. 177–183.
- Bakker, O. J., Popov A., Ratchev S. (2008). Journal of machine engineering. Vol. 8. P. 17–28.
- Bakker, O. J., Popov A., & Ratchev S. (2008). Proceedings of ISMA'08. P. 131–140.
- Bakker, O. J., Popov A., & Ratchev S. (2009). Journal of engineering manufacture. Vol. 223. P. 1553–1566.
- Bakker, O. J., Popov A., & Ratchev S. (2009). International manufacturing science and engineering conference. P. 381–393.
- Papastathis, T. N. et al. (2010). Proceedings of the international precision assembly seminar. P. 283–289.
- Papastathis, T. N. et al. (2012). International journal of advanced manufacturing technology. Vol. 9. P. 1233–1247.
- Mikitjanskij, V. V., & Mikitjanskaja L. M. (2006) Analiz dinamicheskoy tochnosti stanocnyh prisposoblenij [Dynamic accuracy analysis of fixtures] Vestnik AGTU – Journal of AGTU Vol. 1, 158–168 [in Russian].
- Mikitjanskij, V. V., & Mikitjanskaja L. M. (2008). Optimizacija parametrov stanocnyh prisposoblenij po tochnostnym kriterijam [Optimization of parameters of fixtures based on accuracy criteria]. Vestnik AGTU – Journal of AGTU Vol. 2, 74–78 [in Russian].
- Zaripov, R. N. (2003). Postanovka zadach issledovanija dinamiki stanocnyh prisposoblenij na harakteristiki vsej tehnologicheskoy sistemy [Problem formulation of fixture dynamics investigation on the characteristics of the whole technological system]. Mashinostroenie – Mechanical engineering Vol. 3, 18–24 [in Russian].
- Ivanov V. O., & Karpus V. E., et al. (2015). Chyselne modelyuvannya verstatnyh prystroyiv dlya mexanichnoyi obrobky detalej tipu vazheliv [Numerical simulation of fixtures for machining parts such as levers]. Visnyk NTU KhPI – Vestnik NTU KhPI Vol. 4, 108–113 [in Ukrainian].
- Ilickij, V. B., & Mikitjanskij V. V., et al. (1989). Stanocnyje prisposoblenija. Konstruktorsko-tehnologicheskoe obespechenie jekspluatacionnyh svojstv [Fixtures. Design and technological assurance of operational properties]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].