

**В.О. Іванов, к.т.н., доц.**  
Сумський державний університет

**В.Є. Карпусь, д.т.н., проф.**  
Національна академія Національної гвардії України, м. Харків

**І.М. Дегтярьов, аспір.**  
Сумський державний університет

## РЕЗЕРВИ ПІДВИЩЕННЯ ГНУЧКОСТІ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ МЕХАНООБРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА

Гнучкість у сучасному виробництві є одним з найважливіших критеріїв ефективності на сьогоднішній день, тому необхідно оперативно здійснювати підбір оптимальних компонентів верстатних пристроїв (ВП) для заданих виробничих умов. Розглянуто та проаналізовано види гнучкості, виявлено зв'язок між ними та елементами технологічної системи «верстат–верстатний пристрій–різальний інструмент–заготовка». Гнучкі ВП все частіше використовують на машинобудівних підприємствах малого та середнього бізнесу, тому проведення порівняння різних систем ВП за ступенем гнучкості є актуальним завданням дослідження. За допомогою цільової функції для визначення ступеня гнучкості проведені його розрахунки для різних систем ВП. Результати показали суттєву перевагу ВП на основі системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв над спеціальними ВП та групою ВП, складених із елементів універсально-збірних пристроїв. За результатами проведених досліджень гнучкі ВП не поступаються за жорсткістю та точністю обробки спеціальним ВП. Практичне значення одержаних результатів полягає у визначенні умов оптимального використання ВП конкретних систем при заданих виробничих параметрах та може бути впроваджено на машинобудівних підприємствах.

**Ключові слова:** верстатний пристрій; гнучкість; ступінь гнучкості; партія деталей; технологічний процес; продуктивність; норма часу.

**Постановка проблеми.** Останні тенденції у машинобудівній промисловості свідчать про те, що в умовах конкуренції виробники намагаються скоротити час виходу продукції на ринок, при цьому складність виробів та вимоги до їх точнісних і якісних показників постійно зростають [1]. У зв'язку з цим, актуальним є впровадження гнучких ВП, які забезпечують швидке переналагодження на інший типорозмір деталей у межах певних конструкторсько-технологічних характеристик.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Збільшення номенклатури виробів на сучасних машинобудівних підприємствах вимагає від виробництва частих переналагоджень на обробку іншої партії деталей, що викликає питання про економічну доцільність проектування та виготовлення спеціальних ВП для деталей конкретного типорозміру [2]. Дослідженням гнучкості технічних систем займалися Васильєв В.М., Авдєєнко В.М., Пуховський Є.С., Проскураков А.В., Бондаренко С.Г., Блехерман М.Х., Стівенсон В., Eraslan E., Kurt M., Gomez Valdez C.R, Bi Z., Sherman та ін. Технічні системи класифікують за ступенем гнучкості на такі системи: з ручним керуванням, переналагоджувані, гнучкі, спеціальні автоматизовані [3–6].

Одним із важливих аспектів у гнучкості є її розгляд з позиції забезпечення гнучкості виробничого потенціалу або з позиції здатності всієї організації до реагування на зміни попиту. У першому випадку приділяють увагу технічній та технологічній гнучкості, залишаючи при цьому слабо висвітлену проблему розроблення нової продукції, а у другому – навпаки.

Гнучкість, як властивість виробничої системи, має шість основних ознак [7]:

- 1) повторюваність – здатність системи багаторазово повертатися до виконання раніше освоєних робіт після завершення даної роботи;
- 2) універсальність – можливість переналагодження на обробку іншої номенклатури деталей, різних виробів різної кількості без будь-якої модифікації;
- 3) пристосованість – здатність системи до переналагодження на новий виріб шляхом впливу ззовні або самонастроювання;
- 4) адаптивність – здатність пристосовуватись до часових технологічних відхилень, зміни зовнішніх або внутрішніх факторів у певних межах без порушення власного функціонування або втрати якості продукції;
- 5) мобільність – здатність до переналагодження технологічного процесу;
- 6) автономність керування – здатність працювати за безлюдною технологією.

Виділяють різні види гнучкості: конструктивна, технологічна, організаційна, номенклатурна, інструментальна, операційна, машинна, гнучкість за продукцією, гнучкість за обсягом, гнучкість процесу, стратегічна, тактична, оперативна [8].

Проте серед усіх показників основним критерієм гнучкості є ступінь гнучкості виробничої системи. Eraslan E. та Kurt M. розглядають гнучкість як показник ефективності роботи виробничої системи [9]. Пуховський Є.С.

запропонував математичну залежність для визначення ступеня гнучкості, виділяючи коефіцієнти універсальності та часової гнучкості [10]. Бондаренко розглядає гнучкість як інтегральний показник, що залежить від обсягу партії деталей, часу обробки деталі та часу переналагодження [11].

**Постановка завдання.** У проаналізованих наукових працях ступінь гнучкості визначається для виробничої системи в цілому, проте виявлення резервів для його підвищення за рахунок конкретних структурних елементів (верстат, ВП, різальний інструмент та ін.) не проводилося. Тому метою даного дослідження є виявлення резервів підвищення гнучкості ВП для підвищення ефективності механічної обробки деталей на свердильно-фрезерно-розточувальних верстатах.

**Викладення основного матеріалу.** Проаналізувавши усі поняття гнучкості, виділено її види та підвиди (табл. 1), а також встановлено зв'язок між ними та елементами технологічної системи (рис. 1). Як видно зі схеми, ВП безпосередньо впливають на машинну та тактичну гнучкість, що, в свою чергу, впливають на гнучкість більш високого рівня – конструктивну та організаційну. Гнучкість сучасних верстатів та різальних інструментів знаходиться на достатньо високому рівні та резерви до її збільшення у даних складових невеликі, тим більше, що безпосередньо впливають на ці складові технологічної системи немає можливості, на відміну від ВП. Найважливішим чинником підвищення машинної гнучкості є модульний принцип конструювання технічних систем і стандартизація оснастки [11].

Таблиця 1

*Поняття та характеристика видів гнучкості*

Вид гнучкості	Визначення та характеристика	Підвид гнучкості
Конструктивна	характеризує можливості поетапного (модульного) створення системи, з подальшим нарощуванням, а також можливість об'єднання декількох систем в єдиний комплекс	- інструментальна; - операційна; - машинна
Номенклатурна	відображає здатність виробничої системи до швидкого й економічного переходу на виробництво виробів нового найменування	- гнучкість за продукцією
Технологічна	відображає здатність системи використовувати різні варіанти технологічного процесу для компенсації відхилень від запланованого графіка виробництва	- гнучкість за обсягом; - гнучкість процесу
Організаційна	здатність правильно розподіляти пріоритети виготовлення номенклатури виробів, що виготовляються на підприємстві, з найменшими витратами	- стратегічна; - тактична; - оперативна

Постійне оновлення номенклатури деталей машинобудування за рахунок незначних змін конструкції, а також невеликі розміри партій роблять актуальною тему розроблення та впровадження ВП, що дозволяють виконувати швидке переналагодження в певному діапазоні розмірів без зміни або зі швидкою зміною установлювально-затискних елементів, що являють собою окремі функціональні модулі. Підвищення гнучкості та розширення технологічних можливостей ВП, скорочення підготовчо-заклучного часу на їх переналагодження, а, отже, підвищення ефективності використання металорізальних верстатів забезпечується за рахунок розроблення та впровадження швидкопереналагоджуваних функціональних модулів, що входять до комплекту універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв (УЗПП) [12, 13]. Розроблені конструкторські рішення для базування корпусних деталей за площиною, площиною та двома отворами, у координатний кут, а також деталей типу тіл обертання з базуванням за зовнішніми та внутрішніми циліндричними поверхнями показали високу ефективність в умовах сучасного машинобудування [14].

Відомо, що у великосерійному та масовому виробництві використовуються верстати з високим ступенем автоматизації, але їх ступінь гнучкості дорівнює нулю. В одиничному та дрібносерійному виробництві, що на даний час превалює у машинобудуванні, підвищення ступеня автоматизації досягається за рахунок використання обробних центрів із числовим програмним керуванням (ЧПК), що вбудовуються в автоматизовані комплекси, завдяки високим показникам ступеня гнучкості та продуктивності. Групування верстатів із ЧПК у автоматизовані комплекси дозволяє подолати основний недолік автоматичних ліній, а саме – незмінність продукції, яку вони виготовляють. Жорсткість сучасних верстатів із ЧПК майже відповідає жорсткості верстатів-автоматів за рахунок використання композиційних матеріалів та відповідних інженерних розрахунків на стадії проектування з виявлення та вдосконалення «слабких місць» конструкції. Також виключення таких елементів як коробка швидкостей, за рахунок використання мотор-шпинделів, підвищує динамічну жорсткість верстатів.

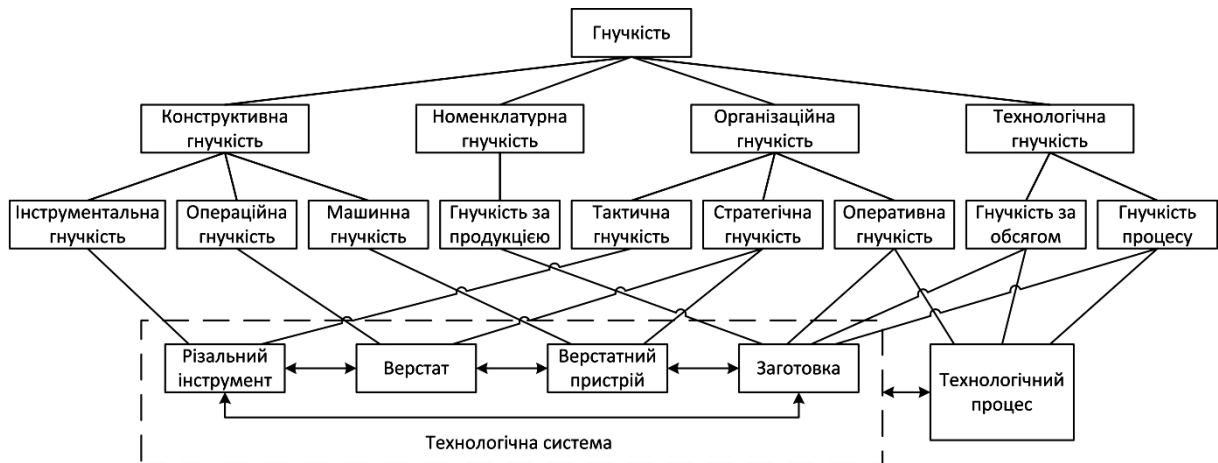


Рис. 1. Взаємозв'язок між видами гнучкості та елементами технологічної системи

Поняття точності обробки та продуктивності, як і поняття гнучкості та продуктивності, до появи обробних центрів із ЧПК були взаємопротилежні (рис. 2), тобто покращення однієї характеристики неодмінно призводило до погіршення іншої. Така сама тенденція існує й у галузі проектування ВП, де актуальним є дослідження та виявлення раціональної сфери застосування ВП для певних виробничих умов із економічної точки зору.

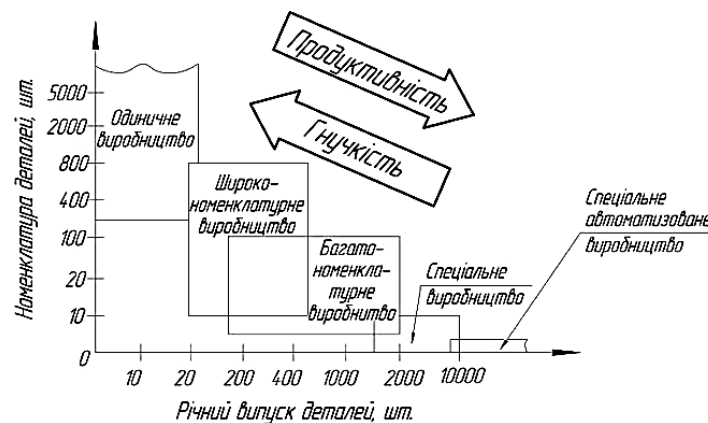


Рис. 2. Графічне представлення протиріччя між гнучкістю та продуктивністю

ВП для обробки деталей типу важелів, кронштейнів, шатунів, вилок, та інших деталей, що мають складну просторову геометричну форму, як правило, є спеціальними (рис. 3, а) або складеними з елементів універсально-збірних пристроїв (УЗП) (рис. 3, б). Недоліком цих ВП є неможливість встановлення деталей іншого типорозміру без перекомпонування або заміни деяких елементів ВП. Доведено, що ВП із елементів системи УЗП характеризуються недостатньою жорсткістю, що обмежує продуктивність процесу механічної обробки. Запропоновано ВП для обробки деталей типу важелів (рис. 3, в) [15, 16] на основі елементів системи УЗПП дозволяє установа деталей у певному діапазоні розмірів.

У межах проведеного дослідження запропоновано класифікацію ВП за рівнем переналадження та ступенем гнучкості (табл. 2). Діапазони величини ступеня гнучкості та їх кількість були обрані на основі кривої нормального розподілу. Згідно з цією таблицею, приблизно 60 % ВП належать до частковопереналаджуваних.

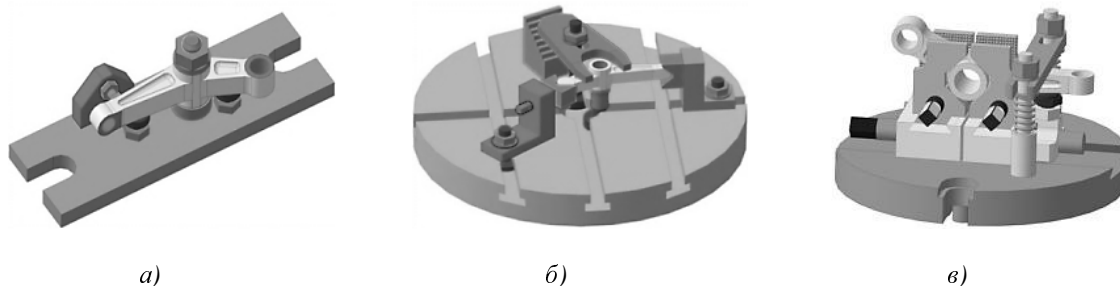


Рис. 3. ВП для механічної обробки деталей типу важелів: а) спеціальний; б) складений із елементів системи УЗП; в) на основі елементів системи УЗПП

Таблиця 2

## Класифікація ВП за рівнями переналадження

№ з/п	Рівень переналадження	Позначення	Величина ступеня гнучкості	Зміст операції переналадження
1.	Непереналаджувані	Н.П.	$G < 0,1$	Для переходу на інший вид виробу необхідно здійснити перекомпонування ВП
2.	Малопереналаджувані	М.П.	$0,1 < G < 0,2$	Існує можливість переходу на інший типорозмір виробу в малому діапазоні розмірів за рахунок заміни основних функціональних елементів ВП
3.	Частковопереналаджувані I рівня	Ч.П.І	$0,2 < G < 0,4$	Переналадження можливе за рахунок заміни деяких функціональних елементів ВП із подальшим підналагодженням
4.	Частковопереналаджувані II рівня	Ч.П.ІІ	$0,4 < G < 0,6$	Переналадження можливе для деталей, схожих за конструктивно-технологічними характеристиками, шляхом регулювання установлювально-затискних елементів або заміни спеціальних налагоджень ВП
5.	Частковопереналаджувані III рівня	Ч.П.ІІІ	$0,6 < G < 0,8$	Переналадження можливе для деталей, схожих за конструктивно-технологічними характеристиками, шляхом регулювання установлювально-затискних елементів або переналаджуваних налагоджень ВП
6.	Переналаджувані	П.	$0,8 < G < 0,9$	Механізоване переналадження установлювальних і затискних елементів ВП
7.	Автоматично переналаджувані	А.П.	$0,9 < G < 1$	Автоматизоване переналадження установлювальних і затискних елементів ВП

За допомогою цільової функції [14] розраховано ступінь гнучкості для кожного ВП, що належать до різних систем ВП при обробці партії важелів обсягом  $N = 1 \dots 200$  шт. та побудовані відповідні залежності (рис. 4):

$$G_{ВП} = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^n t_{nepi}}{\left(\sum_{i=1}^n t_i \cdot N_i\right)}}, \quad (1)$$

де  $n$  – кількість типорозмірів деталей, що обробляються у ВП;  $t_{nepi}$  – час переналадження ВП для обробки деталі  $i$ -го типорозміру;  $t_i$  – час обробки деталі  $i$ -го типорозміру;  $N_i$  – величина партії запуску деталей  $i$ -го типорозміру.

Результати розрахунків свідчать, що ступінь гнучкості запропонованого ВП суттєво вищий, ніж ступінь гнучкості ВП із елементів системи УЗП та спеціального ВП за аналогічних виробничих умов. Особливо суттєва різниця спостерігається при малих значеннях величин партії запуску, що при сучасній тенденції до частої зміни номенклатури та типорозмірів деталей призводить до економічно необґрунтованого застосування ВП із низьким ступенем гнучкості. Ступінь гнучкості спеціального ВП дорівнює нулю та залишається незмінним для будь-якої величини партії деталей, оскільки призначений

для виготовлення одного типорозміру деталей. Проведені розрахунки доводять доцільність впровадження швидкопереналаджуваних ВП на машинобудівних підприємствах.

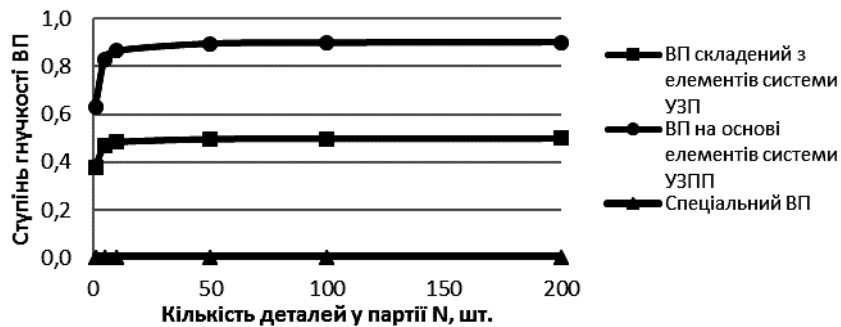


Рис. 4. Графіки залежності ступеня гнучкості від величини партії запуску: для ВП складеного з елементів системи УЗП, ВП на основі елементів системи УЗПП та спеціального ВП

На основі проведених вище розрахунків можна віднести спеціальний ВП до непереналаджуваних, ВП, що складений з елементів системи УЗП до частковопереналаджуваних II рівня, а ВП на основі елементів системи УЗПП – до частковопереналаджуваних III рівня. Для визначення змінної, яка найбільше впливає на величину ступеня гнучкості ВП, проведені розрахунки та побудовані графіки залежності з визначення ступеня гнучкості при варіюванні однієї зі змінних у (1) та при константних значеннях інших змінних (рис. 5–8).



Рис. 5. Залежність ступеня гнучкості від кількості типорозмірів деталей у ВП при постійних значеннях  $N = 50$  шт.,  $t_{пер} = 2$  хв.,  $T_{шт} = 4,7$  хв.

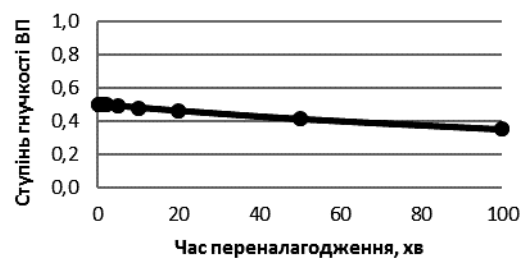


Рис. 6. Залежність ступеня гнучкості від часу переналадження при постійних значеннях  $N = 50$  шт.,  $n = 2$ ,  $T_{шт} = 4,7$  хв.

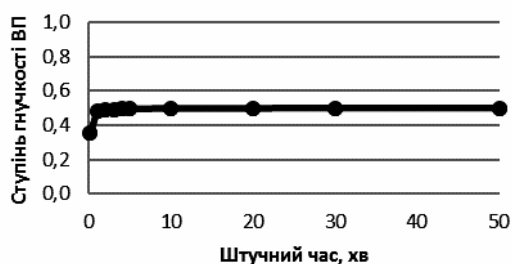


Рис. 7. Залежність ступеня гнучкості від штучного часу при постійних значеннях  $N = 50$  шт.,  $t_{пер} = 2$  хв.,  $n = 2$

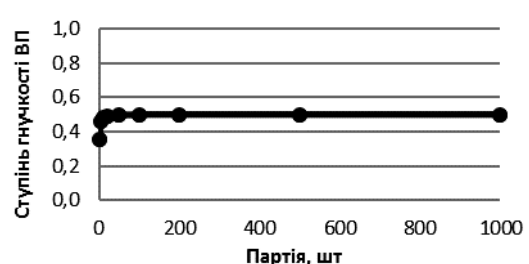


Рис. 8. Залежність ступеня гнучкості від обсягу партії деталей при постійних значеннях  $T_{шт} = 4,7$  хв.,  $t_{пер} = 2$  хв.,  $n = 2$

### Висновки:

1. З метою підвищення ефективності механічної обробки деталей на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах виявлено резерви підвищення гнучкості ВП, визначено основні ознаки та проаналізовано види гнучкості виробничих систем, що дозволило встановити взаємозв'язок між ними та елементами та технологічної системи та розробити класифікацію ВП за рівнями переналадження.

2. Дослідження складових цільової функції визначення ступеня гнучкості дозволило встановити, що найбільший вплив чинить кількість типорозмірів деталей, що можуть бути встановлені у ВП. При цьому суттєве зростання спостерігається при кількості типорозмірів від 2 до 6.

## Список використаної літератури:

1. Development of reconfigurable machines / *Z.M. Bi, Y.T. Sherman, M.Verner, P.Orban* // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 39, Is. 11. – Pp. 1227–1251.
2. *Карпуть В.Е.* Обоснование выбора системы приспособлений в серийном производстве / *В.Е. Карпуть, В.А. Иванов* // Високі технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – Вип. 1 (16). – С. 125–134.
3. *Васильев В.Н.* Организационно-экономические основы гибкого производства / *В.Н. Васильев, Т.Г. Садовська.* – М. : Высшая школа, 1988. – 272 с.
4. *Bi Z.M.* Current status of reconfigurable assembly systems / *Z.M. Bi, L.Wang, S.Y. Lang* // International Journal of Manufacturing Research. – 2007. – Vol. 2, No. 3. – Pp. 303–328.
5. *Gomez Valdez C.R.* The impact of manufacturing flexibility on system performance a simulation based approach / *Gomez Valdez C.R.* // Ph.D. Thesis. – Nottingham : University of Nottingham, 2010.
6. *Jonsson M.* On manufacturing technology as an enabler of flexibility / *M.Jonsson* // PhD Thesis. – Linkoping University, Linkoping, Sweden, 2013.
7. Обратимая технологическая оснастка для ГПС / *Н.Д. Жолткевич, И.Я. Мовшович, А.С. Кобзев* и др. – К. : Техніка, 1992. – 216 с.
8. *Белянин П.Н.* Гибкие производственные системы / *П.Н. Белянин, М.Ф. Идзон, А.С. Жогин.* – М. : Машиностроение, 1988. – 255 с.
9. *Eraslan E.* Fuzzy multi-criteria analysis approach for the evaluation and classification of cognitive performance factors in flexible manufacturing systems / *E.Eraslan, M.Kurt* // International Journal of Production Research. – 2007. – Vol. 45, Is. 5. – Pp. 1101–1118.
10. *Пуховский Е.С.* Технологические основы гибкого автоматизированного производства / *Е.С. Пуховский.* – К. : Высшая школа, 1989. – 240 с.
11. *Бондаренко С.Г.* Основы технології машинобудування / *С.Г. Бондаренко.* – Львів : Магнолія, 2006. – 500 с.
12. *Karpus' V.E.* Universal-composite adjustable machine-tool attachments / *V.E. Karpus', V.A. Ivanov* // Russian Engineering Reseach. – 2008. – Vol. 28, № 11. – Pp. 1077–1083.
13. *Карпуть В.Е.* Универсально-сборные переналаживаемые приспособления / *В.Е. Карпуть, В.А. Иванов* // Вестник машиностроения. – 2008. – № 11. – С. 46–50.
14. Інтенсифікація процесів механічної обробки : монографія / *В.Є. Карпуть, В.О. Иванов, О.В. Котляр* та ін. ; за ред. *В.Є. Карпуся.* – Суми : Сумський державний ун-т, 2012 – 436 с.
15. Чисельне моделювання верстатних пристроїв для механічної обробки деталей типу важелів / *В.О. Иванов, В.Є. Карпуть, І.М. Дегтярьов* та ін. // Вісник НТУ «ХПІ» / Серія «Технології в машинобудуванні». – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 4 (1113). – С. 108–113.
16. Пат. 98925 У Україна, МПК (2015.01) B23B 39/00. Переналагоджуваний установлювально-затискний модуль для обробки деталей типу важелів / *В.О. Иванов, І.М. Дегтярьов, В.Є. Карпуть,* (Україна) ; заяв. та патентовласник Сумський держ. ун-т. – № u201413066 ; заявл. 05.12.2014 ; опубл. 12.05.2015, Бюл. № 9.

ІВАНОВ Віталій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету.

Наукові інтереси:

- переналагоджувані верстатні пристрої;
- автоматизоване проектування верстатних пристроїв;
- багатокритеріальна оптимізація;
- інтенсифікація виробничих процесів.

Тел.: (0542)33–10–24.

E-mail: [ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua)

КАРПУСЬ Владислав Євгенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

Наукові інтереси:

- інтенсифікація виробничих процесів;
- оптимізація технологічних процесів;
- багатоінструментальна обробка на верстатах із ЧПК;
- переналагоджувані верстатні пристрої;
- оптимізація механічної обробки комбінованим осьовим інструментом.

Тел.: 739–2650(4–50).

E-mail: [vladislavkarpus@gmail.com](mailto:vladislavkarpus@gmail.com)

ДЕГТЯРЬОВ Іван Михайлович – аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету.

Наукові інтереси:

- переналагоджувані верстатні пристрої;
- автоматизоване проектування верстатних пристроїв;
- обробка на верстатах із ЧПК.

Тел.: (0542)33–10–24.

E-mail: [ivan\\_dehtiarov@i.ua](mailto:ivan_dehtiarov@i.ua)

Стаття надійшла до редакції 24.11.2015