

УДК 621.952.5

## МОДЕЛЮВАННЯ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ВЕРСТАТА В СЕРЕДОВИЩІ APM STRUCTURE 3D

Кріль О.С., Бочаров А.К., Кузовов О.Ю.

### MODELING THE SPINDLE NODE OF A MULTIFUNCTIONAL MACHINE IN THE ENVIRONMENT OF APM STRUCTURE 3D

Krol O., Bocharov A., Kuzovov A.

*Розглянуто питання дослідження напружено-деформованого стану двохопорного шпинделя верстата свердлильно-фрезерно-розточувального типу. Запропоновано на початкових етапах проектування використовувати інструментарій тривимірного редактора APM Structure 3D і моделі «дротяного» типу. Розроблено 3D моделі приводу головного руху і формотворного шпиндельного вузла, що монтується на радіально-упорних підшипниках. Проведено комплексне експериментальне дослідження на прикладі шпинделя верстата СФ68ВФ4.*

**Ключові слова:** Шпиндельний вузол, обробний центр, 3D модель, «дротяна» модель, APM Structure 3D.

**Вступ.** Шпиндельні вузли (ШВ) як кінцеві ланки приводу головного руху верстата оцінюються за комплексом критеріїв: здатність навантаження, точність, жорсткість і надійність. Відомі ряд робіт [1, 2, 3], що використовують наближені і уточнені методи розрахунку, засновані, в основному, на використанні алгоритмів матричного обчислення і чисельних методів початкових параметрів. При цьому саме розповсюджене уявлення шпиндельного вузла розглядає його як лінійно-деформовану систему, в якій переміщення вузлів шпинделя виражається у вигляді лінійної функції прикладених сил, не дозволяє вирішити комплексно цю задачу.

У роботі по дослідженню жорсткості формотворчих вузлів розглядаються конструкції обробних центрів середнього типорозміру [4]. Для них пропонується процедура «зондування» показників податливості шпинделя з інструментом в рамках робочої зони обробки з урахуванням типорозміру верстата. При цьому розглядається традиційні технологічні операції фрезерування з «відкритим» доступом до оброблюваних поверхонь [5, 6, 7]. Дослідження стосувалося фіксованого варіанту налагодження головного приводу верстата і не враховує вплив інструментальних блоків на зміни базисної жорсткості, що особливо властиво оброблювальним центрам.

В роботі [8] розглядається процедура комплексного дослідження пружної системи "патрон-деталь" в токарних пруткових автоматах. Наводиться модель на базі методу початкових параметрів, на основі якої оцінюється роботоздатність конструкції оснащення токарних автоматів за критеріями жорсткості і вібростійкості. Разом з тим, у порівнянні з токарними прутковими автоматами в багатоцільових верстатах значно розширюються типи застосовуваної оснастки [9, 10, 11].

Вплив типу, кількості та розташування підшипників на ефективність ШВ розглянуто в роботі [12]. Автор ввів поняття статичного формуляра, що представляє аналітичну залежність податливості вузла шпиндель-опори від параметрів інструментального блоку.

Комплексному використанню CAD SOLIDWORKS і CAE ANSYS software для побудови 3D-моделі шпинделя і дослідження її методом кінцевих елементів (МКЕ) присвячена робота [13]. При формалізації шпинделя використовується 10-вузлова стрижнева модель з трьома ступенями свободи в кожному вузлі. Аналіз динамічних характеристик на 5 власних частотах і форм коливань шпинделя з урахуванням змінюваного навантаження дає можливість прогнозувати поведінку цього виробу поза зоною резонансу і давати оцінку показника жорсткості при домінуванні згинальних напружень.

В якості альтернативи дорогим програмним продуктам для дослідження працездатності машинобудівних виробів доцільно використовувати достатньо ефективні системи автоматизованого проектування КОМПАС-3D і APM WinMachine [14, 15, 16].

Разом з тим, необхідно відзначити, що дослідницькі завдання, в тому числі за критерієм жорсткості проводять як на початкових етапах створення верстатного обладнання, так і на заключних стадіях робочого проекту. Причому на початкових етапах

багатоваріантного проектування потрібні експрес-процедури оцінки жорсткості, в той час як на етапі робочого проекту необхідно проводити досить трудомісткі дослідження методом кінцевих елементів.

У даній роботі ставиться задача моделювання конструкції шпindelного вузла на початкових етапах проектування, в середовищі тривимірного редактора APM Structure 3D (що входить до складу інтегрованої САПР APM WinMachine) методом кінцевих елементів.

**Методика дослідження.** Вузол шпindelя обробного центру, як його основний формоутворювальний компонент, що входить до складу приводу головного руху, являють собою замкнуту динамічну систему, що використовує модульні комплекти оснащення [15, 16]. Для дослідження напружено-деформованого стану та використання методів кінцевих елементів [17] необхідно побудувати 3D-моделі приводу головного руху (рис. 1) і складення ШВ (рис. 2) в інтегрованої САПР КОМПАС-3D [18, 19, 20]. Для фотореалістичного зображення складання даної конструкції (рис. 2) використовується інструментарій Рендерингу в модулі Artisan Rendering [21].

Вузол шпindelя верстата СФ68ВФ4 навантажений консольною силою і представляє порожнистий вал ( $d = 65$  мм;  $d_0 = 28$  мм) зі стандартним кінцем шпindelя (фланцеві типу А ГОСТ 12595), який монтується на двох здвоєних радіально-упорних підшипниках 4-46112 по ГОСТ 831-75, встановлених за схемою «Гандем» [22, 23, 24].

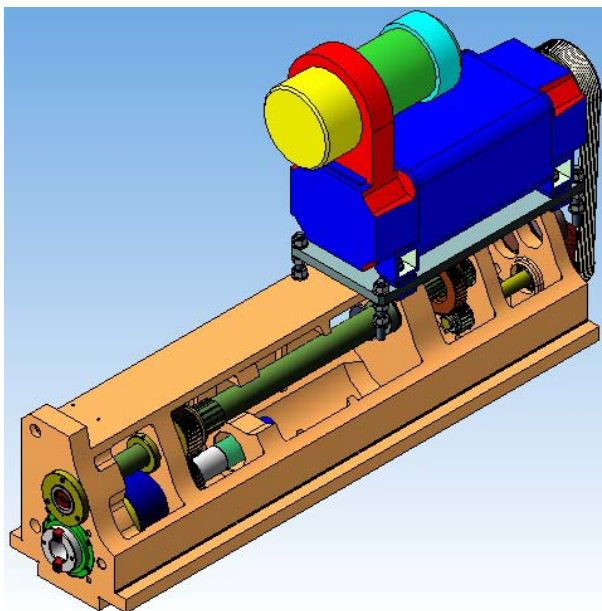


Рис. 1. Привід головного руху обробного центру

Модуль APM Structure 3D призначений для аналізу напружено-деформованого стану довільних тривимірних машинобудівних конструкцій, що складаються із стрижневих, пластинчастих, оболонкових і об'ємних елементів в їх довільній комбінації. Розрахунок виконується чисельним методом – мето-

дом кінцевих елементів і дозволяє розраховувати величини напруг і деформацій в будь-якій точці конструкції шпindelного вузла з урахуванням власної ваги кожного з елементів і різноманітних видів концентраторів напружень. Визначення невідомих силових факторів в кожному з вузлів і внутрішніх силових факторів в межах кожного кінцевого елемента забезпечує достатню інформацію для проектування шліцьових, різьбових та інших з'єднань.

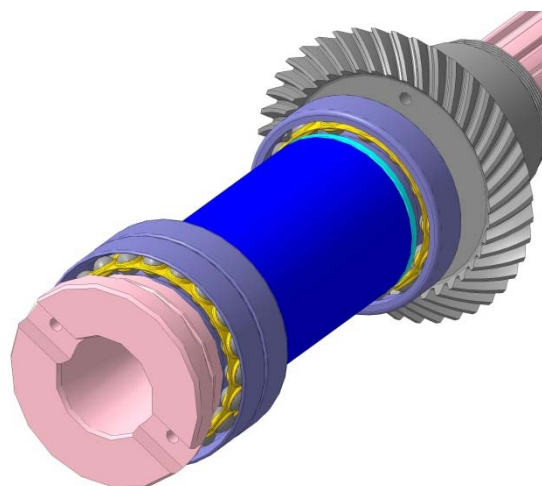


Рис. 2 Шпindelний вузол з рендерінгом

Розглянемо задачу розрахунку вертикального шпindelя приводу головного руху багатоопераційного верстата моделі СФ68ВФ4. На початкових етапах проектування, коли немає точного уявлення про кінцеву форму і конструктивні особливості перспективним видається використання спрощеного уявлення у вигляді «дротяної» моделі. Процес моделювання в середовищі APM Structure 3D пов'язаний зі створенням конструкції (рис.3), в якій кожен стрижень зображений у вигляді лінії, що розташовується по центру тяжкості майбутнього перетину [17, 25, 26, 27]. Кожен стрижень має конкретні розміри і з'єднаний за допомогою вузлів з іншими стрижнями конструкції.

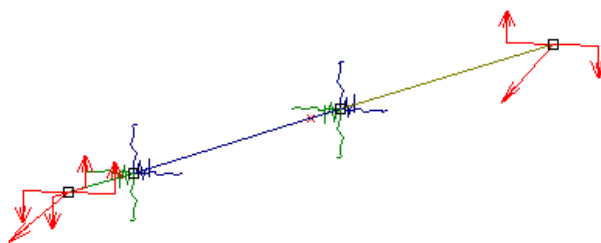


Рис. 3. «Дротова» модель конструкції шпindelя

Для проведення розрахунку цієї конструкції необхідно додатково поставити:

- поперечні перерізи кожному зі стрижнів (рис.4);
- опори для створеної конструкції, що визначають її положення в просторі;

- зовнішні навантаження, що діють на конструкцію (або хоча б власну вагу її елементів);
- параметри матеріалу елементів конструкції.

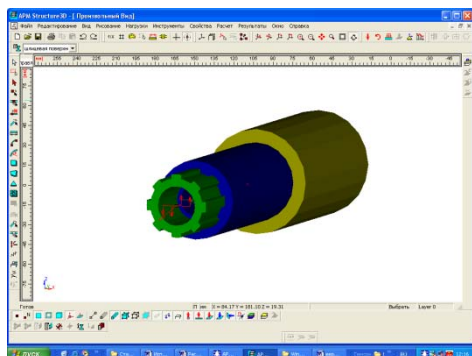


Рис. 4. 3D модель шпинделя в APM Structure 3D

Розрахунок з використанням МКЕ в середовищі APM Structure 3D дозволяє оцінити повну картину напружено-деформованого стану вала в будь-якому його перетині, включаючи оцінку навантажень, силові фактори та ін. (табл.1...табл.6) Представлені в пункті меню «Результати» і наведені нижче (рис. 5).

Таблиця 1

**Навантаження на вузли. Завантаження:**  
**Завантаження 0**

N	Тип	Номер вузла	Проекції			Модуль
			на x	на y	на z	
0	сила, Н	0	-6442	0	-5187	8270.69
1	сила, Н	3	-2355	0	-2616	3519.87

Таблиця 2

**Переміщення вузлів (Завантаження 0)**

N	Лінійне переміщення [мм]			Кутове переміщення [Град]		
	x	z	x	y	z	
0	-0.07	-0.0576	0.025	-0.0454	-0.0297	
1	-0.05	-0.0412	0.013	-0.0023	-0.0182	
2	-0.02	-0.0219	-0.0002	0.00946	-0.0014	
3	-0.03	-0.0293	-0.0043	0.0191	0.00236	

Таблиця 3

**Зусилля в вузлах стрижнів (завантаженість 0)**  
**Індекс стрижня 0 (Rod 0)**

Вузол	Сила [Н]		Момент [Н*М]		
	Fy	Fz	Mx	My	Mz
0	5187	6442	347	0.00	-29.00
1	5187	6442	347	-289.89	-262.4

Таблиця 4

**Зусилля в вузлах стрижнів (завантаженість 0)**  
**Індекс стрижня 1 (Rod 1)**

Вузол	Сила [Н]		Момент [Н*М]		
	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	1485.9	1894.8	138.9	-121.7	-102.3
2	1485.9	1894.8	138.9	-390.8	-313.3

Таблиця 5

**Зусилля в вузлах стрижнів (завантаженість 0)**  
**Індекс стрижня 2 (Rod 2)**

Вузол	Сила [Н]		Момент [Н*М]		
	Fy	Fz	Mx	My	Mz
2	-2616	-2355	347	-346.18	-384.55
3	-2616	-2355	347	0.00	-0.00

Загальна маса конструкції: 7.89 кг  
Максимальне переміщення: 0.09 мм (Rod 0)  
(Завантаженість 0)

Таблиця 6

**Напруга в стрижні (макс.) [МПа]**  
**(Завантаженість 0)**

N	Назва	Вузли	Екв. напруження
0	Rod 0	0.1	124
1	Rod 1	1.2	24.7
2	Rod 2	2.3	12.2

Максимальна напруга: 123.6 МПа (Rod 0)  
(Завантаженість 0)

**Карта результатів (Завантаженість 0)**

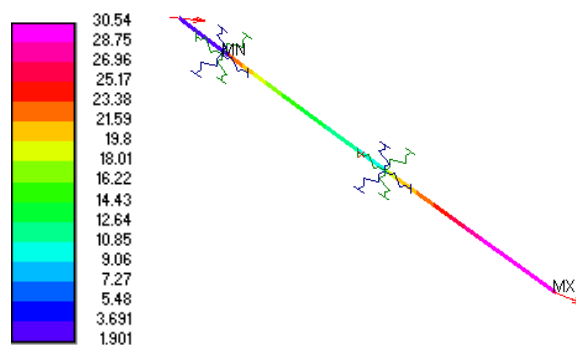


Рис. 5. Результати автоматизованого проектування

**Висновки.** 1. Розроблено твердотільні моделі формотворного шпиндельного вузла в складі приводу головного руху багатофункціонального верстата свердильно-фрезерно-розточувального типу. Тривимірне моделювання проведено в середовищі системи автоматизованого проектування КОМПАС-3D. В ході моделювання використана прикладна бібліотека «Вали і механічні передачі-3D».

2. Проведено комплексне дослідження напружено-деформованого стану шпинделя при комбінованому характері навантаження. Показана ефективність використання інструментарію «дротова» модель в модулі APM Structure 3D.

3. Аналіз отриманих результатів дозволяє вибрати найкращі конструктивні рішення, працюючи з різними навантажених і їх комбінаціями. При цьому з'являється можливість проектувати шпиндельні вузли верстатів, близькі до рівномірних конструкцій за критеріями міцності і жорсткості.

## Література

1. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т. 2. Ч. 1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А. С. Проников, Е. И. Борисов, В. В. Бушуев и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 371 с.
2. Кріль О.С. Методи та процедури динаміки шпиндельних вузлів: Монографія. – Луганськ: изд-во ВНУ ім. В. Даля, 2014. – 154 с.
3. Krol, I Sukhorutchenko 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 / Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – Vol. 13. – Is. 3, 2013. – P. 114 – 119.
4. Угринов П. Жесткость обрабатывающих центров среднего типоразмера / Автоматизация и управление в машиностроении. – № 5. – 2001. – С. 43–47.
5. Мицьк А.В. Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали / А.В. Мицьк, В.А. Федорович // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2011. – № 6 (83). – С. 26 – 34.
6. Романченко А.В. Синтез элементов классификации деталей подлежащих вибрационной обработке. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2015. – №5 (222). – С. 102–106.
7. Романченко А.В. Выбор системы синхронизации электропривода длинномерных вибрационных станков. Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Механико-технологические системы и комплексы. 2015. – № 52 (1162). С. 13–22.
8. Кузнецов Ю.И., Маслов А.Р., Байков А.Н. Оснастка для станков с ЧПУ: справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 510 с.
9. Мицьк А.В. Технологический и конструкторский мониторинг, компонетика и 3D визуализация гибридных вибростанков, регламент и опыт внедрения мультитехнологических технологий отделочно-зачистной виброобработки // Вісник СНУ ім. В. Даля, № 7 (237), С. 33 – 50.
10. Mamalis, A., Grabchenko, A., Mitsyk, A., Fedorovich, V., Kundrak, J.: Mathematical simulation of motion of working medium at finishing-grinding treatment in the oscillating reservoir. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 70, 263 – 276 (2014). doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>.
11. Романченко А.В. Разработка технологического процесса изготовления длинномерного контейнера вибрационного станка из композиционных материалов. Международный научный журнал «Технологический аудит и резервы производства». Сборник научных трудов. Рубрика: Системы и процессы управления. 2015. – № 6/3 (26). С. 31–37.
12. Попов В.А., Локтев В.А. Динамика станков. – К.: Техніка, 1975. – 136 с.
13. Krol O and Sokolov V 2018 Modelling of spindle nodes for machining centers J. Phys.: Conf. Ser. 1084 doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1084/1/012007>
14. Кріль О.С., Кріль А.А., Бурлаков Е.И. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра / Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПИ» – № 16(989), 2013. – С. 14 – 18.
15. Krol O. Sokolov V. (2018). Development of models and research into tooling for machining centers. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(1(93)), 12–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131778>
16. Krol, O., Tsankov, P., Sokolov, V. (2018). Rational choice of two-support spindles for machining centers with lubrication system. EUREKA: Physics and engineering, 3, 52–58. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00648>
17. Замрий А.А. Практический учебный курс CAD/CAE АРМ WinMachine. Учебно-методическое пособие. – М.: Изд-во АПМ, 2007. – 144 с.
18. Krol, O., Zhuravlev, V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3. TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 13. – Is. 4, 2014. – P. 141–147.
19. Кріль О.С., Соколов В.І. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. –Севродонецьк: СНУ ім. В. Даля. – 2016. – 160 с.
20. Кріль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов. Монография. / Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля. – 2012. – 116 с.
21. Krol, O., & Sokolov, V. (2018). Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 1–5. doi: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501799>
22. Кріль О.С., Кріль А.А. Расчет податливости станка СФ68ВФ4 и моделирование динамики формообразования // Вісник СевНТУ, вип. 117 «Машинобудування та транспорт». – 2011, С. 81–84.
23. Krol O., Shevchenko S., Sukhorutchenko I., Lysenko A. 3D-modeling of the rotary table for tool SVM1F4 with non - clearance worm gearing / TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol.14. – Is. 1, 2014. – Lublin, Poland. – P. 126–133.
24. Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O. Gear Clutch with Modified Tooth Profiles. Procedia Engineering, 206, 979–984 (2017) doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.581>
25. Шелюфаст В.В., Чугунова Т.Б. Основы проектирования машин. Примеры решения задач. – М.: Изд-во АПМ, 2004. – 240 с.
26. Николаенко А.П., Калмыков М.А. Исследование зависимости интенсивности вибрационной обработки от расположения вибровозбудителя / Восточно-Европейский журнал передовых технологий №2 (5). – С. 54-56
27. Николаенко А.П.. Формирование поверхности изделия при вибрационной обработке / Вібрації в техніці та технологіях №2 (58). – Вінницький національний аграрний університет, 2010 – С. 167–184.

## References

1. Proektirovanie metallorezhuschih stankov i stanochnyih sistem: Spravochnik-uchebnik. V 3-h t. T. 2. Ch. 1. Raschet i konstruirovaniye uzlov i elementov stankov / A. S. Pronikov, E. I. Borisov, V. V. Bushuev i dr. – M.: Mashinostroenie, 1995. – 371 s.
2. Krol O.S. Metody i protseduryi dinamiki shpindelnyih uzlov: Monografiya. – Lugansk: izd-vo VNU im. V. Dalya, 2014. – 154 s.
3. Krol O, Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 / Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – Vol. 13. – Is. 3, 2013. – P. 114–119.
4. Ugrinov P. Zhestkost obrabatyvayuschih tsentrov srednego tiporazmera / Avtomatizatsiya i upravlenie v mashinostroenii. – № 5. – 2001. – S. 43–47.

5. Mitsyik A.V. Puti intensivifikatsii vibratsionnoy otdelochno-zachistnoy obrabotki kombinirovaniem shem energeticheskikh vozdeystviy na rabochuyu sredu i detali / A.V. Mitsyik, V.A. Fedorovich // Aviatsiyno-kosmichna tehnika i tehnologiya. – 2011. – № 6 (83). – S. 26 – 34.
  6. Romanchenko A.V. Sintez elementov klassifikatsii detaley podlezhashchih vibratsionnoy obrabotke. Visnik ShidnoukraYinskogo natsionalnogo unIversitetu imeni Volodimira Dalya. 2015. – № 5 (222). – S. 102–106.
  7. Romanchenko A.V. Vybor systemy sinhronizatsii elektroprivoda dlennomernykh vibratsionnykh stankov. Vestnik NTU "HPI". Seriya: Mehaniko-tehnologicheskije systemy i kompleksy. 2015. – № 52 (1162). S. 13–22.
  8. Kuznetsov Yu.I., Maslov A.R., Baykov A.N. Osnastka dlya stankov s ChPU: spravochnik. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 510 s.
  9. Mitsyik A.V. Tehnologicheskij i konstruktorskiy monitoring, komponentika i 3D vizualizatsiya gibridnykh vibrostankov, reglament i opyt vnedreniya multienergeticheskikh tehnologiy otdelochno-zachistnoy vibroobrabotki // Visnik SNU Im. V. Dalya, № 7 (237), S. 33–50.
  10. Mamalis, A., Grabchenko, A., Mitsyik, A., Fedorovich, V., Kundrak, J.: Mathematical simulation of motion of working medium at finishing–grinding treatment in the oscillating reservoir. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 70, 263 – 276 (2014). doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>
  11. Romanchenko A.V. Razrabotka tehnologicheskogo protsessa izgotovleniya dlennomernogo konteynera vibratsionnogo stanka iz kompozitsionnykh materialov. Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Tehnologicheskij audit i rezervnyi proizvodstva». Sbornik nauchnykh trudov. Rubrika: Systemy i protsessy upravleniya. 2015. – № 6/3 (26). S. 31-37.
  12. Popov V.A., Loktev V.A. Dinamika stankov. – K.: Tehnika, 1975. – 136 s.
  13. Krol O and Sokolov V 2018 Modelling of spindle nodes for machining centers J. Phys.: Conf. Ser. **1084** doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1084/1/012007>
  14. Krol O.S., Krol A.A., Burlakov E.I. Tverdotelnoe modelirovanie i issledovanie shpindel'nogo uzla obrabatyvayushchego tsentra / Visnik Natsionalnogo tehniknogo universitetu «HPI». Seriya: Novi rishennya v suchasniy tehnologiyah. – H: NTU «HPI» – № 16(989), 2013. – S. 14–18.
  15. Krol O. Sokolov V. (2018). Development of models and research into tooling for machining centers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1(93)), 12–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131778>
  16. Krol, O., Tsankov, P., Sokolov, V. (2018). Rational choice of two-support spindles for machining centers with lubrication system. *EUREKA: Physics and engineering*, 3, 52–58. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00648>
  17. Zamriy A.A. Prakticheskiy uchebnyy kurs SAD/CAE APM WinMachine. Uchebno-metodicheskoe posobie. – M.: Izd-vo APM, 2007. – 144 s.
  18. Krol, O., Zhuravlev, V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3. TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 13. – Is. 4, 2014. – P. 141–147.
  19. Krol O.S., Sokolov V.I. Trivimirne modelyuvannya metalorizalnih verstativ ta instrumentalnogo osnaschennya. –Severodonetsk: SNU im. V. Dalya. – 2016. – 160 s.
  20. Krol O.S. Parametricheskoe modelirovanie metallorezhuschih stankov i instrumentov. Monografiya. Lugansk: SNU im. V. Dalya. – 2012. – 116 s.
  21. Krol, O., & Sokolov, V. (2018). Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines. *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 1–5. doi: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501799>
  22. Krol O.S., Krol A.A. Raschet podatlivosti stanka SF68VF4 i modelirovanie dinamiki formoobrazovaniya // Visnik SevNTU, vip. 117 «Mashinobuduvannya ta transport». – 2011, S. 81–84.
  23. Krol O., Shevchenko S., Sukhorutchenko I., Lysenko A.. 3D-modeling of the rotary table for tool SVM1F4 with non-clearance worm gearing / TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol.14. – Is. 1, 2014. – P. 126–133.
  24. Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O. Gear Clutch with Modified Tooth Profiles. *Procedia Engineering*, 206, 979–984 (2017) doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.581>
  25. Shelofast V.V., Chugunova T.B. Osnovniy proektirovaniya mashin. Primeryi resheniya zadach. – M.: Izd-vo APM, 2004. – 240 s.
  26. Nikolaenko A.P., Kalmyikov M.A. Issledovanie zavisimosti intensivnosti vibratsionnoy obrabotki ot raspolozheniya vibrovzбудitelya / Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredoviykh tehnologiy №2 (5). – S. 54-56.
  27. Nikolaenko A.P. Formirovanie poverhnosti izdeliya pri vibratsionnoy obrabotke / Vibratsiyyi v tehniitsi ta tehnologiyah №2 (58). – Vinnitskiy natsionalniy agrarniy universitet, 2010 – S. 167-184.
- Кроль О.С., Бочаров А.К., Кузовов А.Ю. Моделирование шпиндельного узла многофункционального станка в среде APM STRUCTURE 3D**
- Рассмотрены вопросы исследования напряженно-деформированного состояния двухопорного шпинделя станка сверлильно-фрезерно-расточного типа. Предложено на начальных этапах проектирования использовать инструментарий трехмерного редактора APM Structure 3D и модели «проволочного» типа. Разработаны 3D модели привода главного движения и формообразующего шпиндельного узла, монтируемого на радиально-упорных подшипниках. Построены аналитические модели (статические формулы) оценки податливости методом начальных параметров в матричной постановке. Определена степень влияния линейной и угловой податливости на жесткость шпиндельного узла. Проведено комплексное экспериментальное исследование на примере шпинделя станка СФ68ВФ4.*
- Ключевые слова:** Шпиндельный узел, обрабатывающий центр, 3D модель, «проволочная» модель, APM Structure 3D.
- Krol O., Bocharov A., Kuzovov A. Modeling the spindle node of a multifunctional machine in the environment of APM STRUCTURE 3D**
- The study of the stress-strain state of a dual-support spindle of a drilling-milling-boring machine is considered. It is proposed to use the tools of a ARM Structure 3D and “wire” type tools at the initial design stages. Developed 3D models of the main movement drive and the form-making spindle node mounted on duplexed angular contact ball bearings. Analytical models (static formula) of compliance assessment by the method of initial parameters in the matrix*

*formulation are constructed. The degree of influence of linear and angular compliance on the stiffness of the spindle node is determined. A comprehensive experimental study was carried out using the example of an SF68VF4 machine spindle.*

**Keywords:** *Spindle node, machining center, 3D model, "wire" model, APM Structure 3D.*

**Кроль Олег Соломонович** – к.т.н., доц., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) krolos.snu.edu@gmail.com

**Бочаров Артем Костянтинович** – студент групи ПМЕ–18ДМ, факультет інженерії, кафедра машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)

**Кузовов Олексій Юрійович** – студент гр. ОФБ–18ДМ, факультет інженерії, кафедра машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) alexvto-manchenko@gmail.com

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 05.02.2019.