

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-36-41>

УДК 621.952.5:629

МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЧОТИРИОПОРНОГО ВАЛУ ЗА КРИТЕРІЄМ ЖОРСТКОСТІ

Кроль О.С., Голубенко О.Л., Слєпченко К.І.

MODELING OF THE STRUCTURE OF A FOUR-SUPPORT SHAFT BY THE STIFFNESS CRITERION

Krol O.S., Golubenko O.L., Slepchenko K.I.

Наведено засоби та інструменти проектування та моделювання багатоопорних валів із застосуванням твердотілого моделювання та методу скінченних елементів при виборі оптимальної конструкції валу та його опор. Розроблено поперечну компоновку приводу, яка визначатиме характер навантаження та конструктивну схему вала. Цей вал розглядається як стрижнева конструкція на чотирьох шарнірних опорах, у яких основною проблемою продуктивності є недостатня жорсткість і високі рівні напружень на окремих ділянках. Розглянуто процедуру розробки пружно-деформаційної моделі як комплексу двох незалежних завдань: статику вала як стрижня на пружних опорах (розрахунок пружної лінії вала) та відповідні характеристики підшипників. Запропоновано процедуру побудови тривимірної моделі на чотириопорній конструкції валу для багатоопераційного свердлильно-фрезерно-розточувального верстата в інтегрованому робочому місці САПР АРМ WinMachine. Використано взаємопов'язані модулі твердотілого моделювання «АРМ Studio» та «АРМ Structure3D», а також спеціалізований модуль для проектування валів «АРМ Shaft», які входять до середовища САПР АРМ WinMachine. Використовується спеціалізоване параметричне ядро з дуже зручним інтерфейсом, що забезпечує різке підвищення продуктивності конструктора в процесі моделювання валів верстатів. Розрахунок підшипника 4-309 виконано за допомогою модуля «ARM Bear», який базується на комплексі верифікаційних розрахунків неідеальних підшипників, включаючи визначення переміщень і діаграм розподілу зусиль з урахуванням статистичної дисперсії. Розглянуто багатоваріантний розрахунок пружно-деформаційного стану методом скінченних елементів у середовищі інтегрованої системи автоматизованого проектування. Проведений аналіз переміщень і кутів повороту в різних ділянках валу на жорстких шарнірних опорах і встановлено, що їх значення знаходяться в допустимих межах, що підтверджує ефективність роботи чотириопорної валової конструкції. Максимальні напруження, які виникають у циліндровій поверхні, визначаються за допомогою параметра «Напруження в перетині». Показано, як змінюються пружно-деформаційні характеристики при переході від жорстких до пружно-деформаційних шарнірних опор.

Ключові слова: багатоопорний вал, металорізальний верстат, 3D модель, метод скінченних елементів, діаграма напружень, епюри переміщень.

Вступ. Досягнення високих техніко-експлуатаційних показників формотворних вузлів та деталей металорізальних верстатів (МВ) неможливе без повного уявлення про їх механіку та докладного аналізу різноманіття факторів, що впливають на їх якість [1-3]. У цьому виникає практично важливе завдання створення комплексної математичної моделі компонентів МВ [4-6].

Для валів металорізальних верстатів відомі типові схеми, які дозволяють представляти вали у вигляді окремих верстатних модулів, досягаючи при цьому скорочення термінів проектування [7, 8]. Використання цих схем передбачає постійне звернення конструктора до автоматизованих довідників (баз даних), що містять необхідну інформацію: типові схеми валів, каталоги підшипникових опор, довідкові матеріали за нормами точності та ін. Разом з тим існують такі компоновки верстатів (наприклад, верстати оснащені вертикальним та горизонтальним шпинделями), приводи головного руху яких включають вали, які не можна віднести до типових схем. Так, вихідний вал (довжиною більше 1м) широкоуніверсального свердлильно-фрезерно-розточувального верстата моделі СФ68ВФ4 передає через рухому шестірню обертання на горизонтальний шпindel, а через муфту (при виведеній із зачеплення шестірні) на вертикальну головку. [9-11]. Цей вал монтується на чотирьох опорах різного типу, при цьому завдання вибору типу опор, типорозміру підшипників, способу та величини попереднього натягу передбачає застосування процедур моделювання.

У ранніх роботах з автоматизованого проектування валів [12] представлена програма VAL для перевірочних розрахунків дев'яти основних розрахункових схем двоопорних валів. Для кожної розрахункової схеми виконуються обчислення реакцій опор, значення згинальних та обертових моментів у 5-7 перерізах для побудови епюр; проводяться розрахунки на статичну міцність та опір втоми у трьох небезпечних перерізах, а також розрахунки на жорсткість у 5-7 перерізах. Ще один пакет прикладних програм SPRT для розрахунку пружно-деформаційних характеристик високошвидкісних шпindelних вузлів мають не більше 75 ступенів свободи [12]. Обмеження масштабів завдань спричинено недостатніми обчислювальними ресурсами. У сучасних системах автоматизованого проектування, таких як APM WinMachine [13-15], проводиться моделювання складних конструкцій, максимальна розмірність яких оцінюється величиною до 50 тисяч вузлів і до 300 тисяч ступенів свободи (при максимальному обсязі оперативної пам'яті 2 Гб).

Разом з тим єдиного підходу до оцінки рівня допустимих навантажень і працездатності досить складних чотириопорних конструкцій валів з різними типами підшипникових опор не представлено у роботах, що розглядаються вище.

Метою даної роботи є створення комплексної процедури оцінювання напружено-деформованого стану чотириопорних валів сучасних верстатів з ЧПК та обробних центрів.

Для досягнення цієї мети пропонується така процедура:

1. Здійснити постановку та розв'язання задачі пружно-деформаційного опису конструкції вала приводу головного руху свердильно-фрезерно-розточувального верстата.

2. Розробити тривимірну модель конструкції вала в середовищі інтегрованої САПР.

3. Здійснити розрахунок конструкції методом скінчених елементів та оцінити працездатність конструкції за критерієм жорсткості.

3D моделювання вала багатоопераційного верстата. Розглядаючи чотириопорний вал як складну механічну систему, можна виділити окремі групи його функціональних властивостей, що вимагають розробки самостійних математичних моделей [16, 17]:

- пружно-деформаційної, що визначає навантаження, деформації та жорсткості кожного елемента системи;
- динамічної, що визначає власні частоти та передавальні функції системи;
- вібраційної, що визначає спектральні характеристики системи.

Завдання розробки пружно-деформаційної моделі може розглядатися як сукупність двох незалежних завдань – статика вала як стрижня на пружних опорах (розрахунок пружної лінії вала) і відповідних характеристик підшипників.

Розглянемо задачу представлення пружно-деформаційного опису вихідного вала приводу головного руху верстата моделі СФ68ВФ4 [18, 19]. На Рис.1 представлена поперечна розгортка приводу, яка зумовить характер навантаження та розрахункову схему вала (Рис. 2).

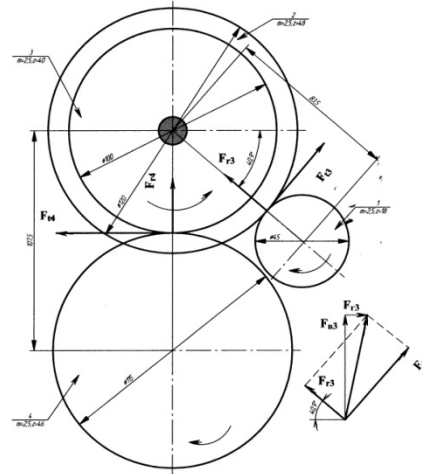


Рис. 1. Поперечне компонентування приводу головного руху



Рис. 2. Розрахункова схема вихідного вала

Даний вал розглядається як стрижнева конструкція на чотирьох шарнірних опорах. Основними проблемами працездатності є недостатня жорсткість і високий рівень напруг у певних перерізах. Підвищення несучих властивостей пов'язане як з вибором форм і конструкції самого вала, так і з вибором типу та типорозмірів опор. Таке завдання багатоваріантного проектування передбачає використання процедур моделювання та чисельних методів [20-22]. В даному випадку використовуються взаємопов'язані модулі твердотільного моделювання «APM Studio» і «APM Structure3D», а також спеціалізований модуль проектування валів «APM Shaft», що входять до CAD/CAM/CAE/PDM «APM WinMachine» [23,24]. Для здійснення процедури моделювання створена твердотільна модель вала (Рис. 3), яку розбиваємо на 29138 скінчених елементів.

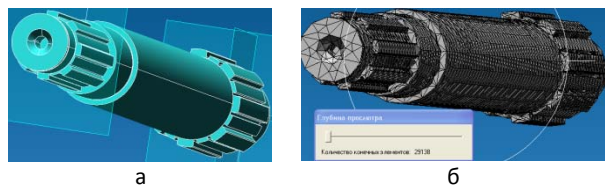


Рис. 3. 3D моделювання вала: а – твердотільна модель; б – скінчено-елементне розбиття

Оцінювання пружно-деформаційного стану вала в САПР APM WinMachine. В результаті розрахунків стає можливим визначити характер напру-

жено-деформованого стану в будь-якій точці конструкції (Рис. 4). Розрахунок показав, що дана конструкція має достатній запас міцності – $\sigma_{\max} = 96$ МПа (Ст20Х характеризується межею плинності $\sigma_T = 635$ МПа, коефіцієнт запасу плинності $n_T = 1,5$). Причому максимальні напруги виникають у шліцевій поверхні з боку проміжного валу. Для визначення характеру домінуючих напруг та оцінки правильності орієнтації перерізу є опція «Напруга в перетині».

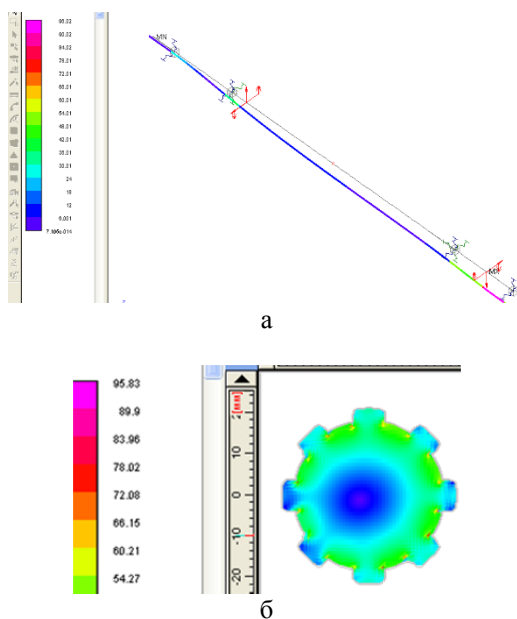


Рис. 4. Результати розрахунку:
а – карта еквівалентної напруги; б – напруга в перетині

Для оцінки жорсткості доцільно використовувати спеціалізований модуль «APM Shaft» [25, 26] в якому побудуємо епюри моментів, переміщень, кутів повороту, напруг і коефіцієнтів запасу за втомною міцністю (Рис. 5) для двох варіантів уявлення опор – жорсткої шарнірної опори і пружної опори.

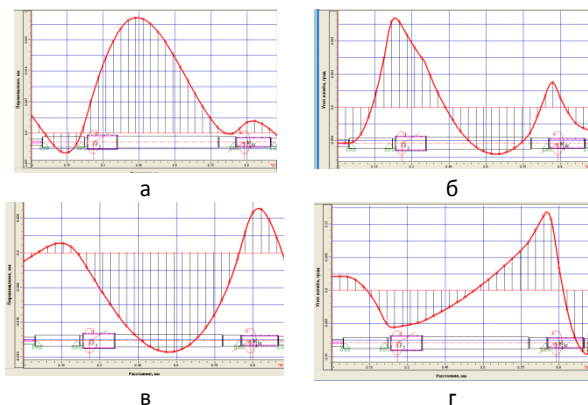


Рис. 5. Епюри переміщень та кутів повороту валу на жорстких опорах: а; б – у вертикальній площині; в; г – у горизонтальній площині

Аналіз переміщень та кутів повороту в різних перерізах валу на жорстких шарнірних опорах показує, що їх значення знаходяться в межах допустимих: $[\theta] = 0,0290^0$; $[y] = 0,1276$ мм; $\Theta_{\max} = 0,01180^0 < [\theta]$; $y_{\max} = 0,032$ мм $< [y]$.

В останні роки для розрахункової оцінки підшипників багатоопорних систем почали застосовувати метод ПВК (підшипник-вал-корпус). Сутність цього методу полягає в тому, що шукані параметри вузла визначаються із спільного вирішення завдання пружної рівноваги вузла в цілому з урахуванням пружних властивостей підшипників, валу та корпусу.

Аналіз впливу типу опор на параметри жорсткості валу. Розглянемо як змінюються пружно-деформаційні характеристики при переході від жорстких до пружно-подагливих шарнірних опор. Відповідно до відомих методик проведено розрахунок жорсткості всіх чотирьох опор валу: Ліва опора – здвоєні радіально-упорні підшипники 4-46109 особливо легкої серії, змонтовані за «О-подібною схемою», має жорсткість $j_1 = 8 \cdot 10^4$ Н/мм;

Проміжні опори – радіальні однорядні підшипники 4-109 особливо легкої серії діаметрів 1, серія ширин 0, мають жорсткість: $j_2 = 34599$ Н/мм; $j_3 = 30580$ Н/мм; Права опора – підшипник кульковий радіальний сферичний дворядний 4-1507, що має жорсткість $j_4 = 22510$ Н/мм.

Результати пружно-деформаційного розрахунку показують, що значення кутів повороту в перерізах валу не перевищують допустиме значення Θ_{\max} . Разом про те, переміщення пружної лінії валу в середній частині перевищують допустимі: $y = 0,191$ мм $> [y]$ (Рис. 6).

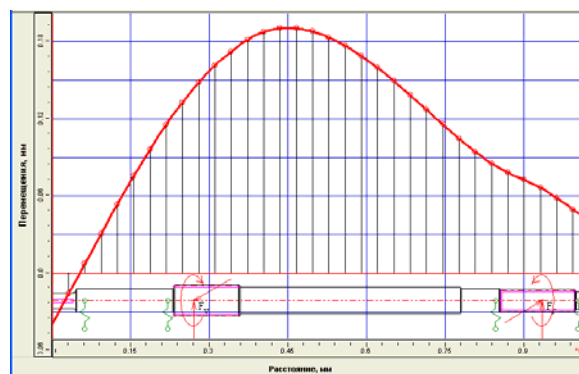


Рис. 6. Епюра переміщень валу

Алгоритм посилення проміжної опори включає перехід від особливо легкої до легкої, потім до середньої та важкої серії. Якщо габарити важкої серії великі або не забезпечують нормативних значень динамічної вантажопідйомності, то здійснюється перехід до іншого типу підшипників, наприклад до жорсткіших радіальних роликотопідшипників або до іншої схеми розташування підшипників на валу. Тільки після цього доцільно збільшити діаметр посадкової поверхні.

Так, перехід до радіального підшипника легкої серії 4-209, дозволив підвищити жорсткість – переміщення в небезпечному перерізі знизилася до $y = 0,178$ мм. Разом про те найкраще наближення до граничних переміщень дає застосування радіального підшипника середньої серії 4-309.

Розрахунок радіального підшипника в модулі АРМ Беар. Зробимо розрахунок підшипника 4-309 за допомогою модуля "АРМ Беар", результати якого представлені на Рис. 7. В середовищі "АРМ Беар" виконується весь комплекс перевірочних розрахунків неідеальних підшипників, що включають визначення переміщень та діаграми розподілу сил з урахуванням статистичного розсіювання.

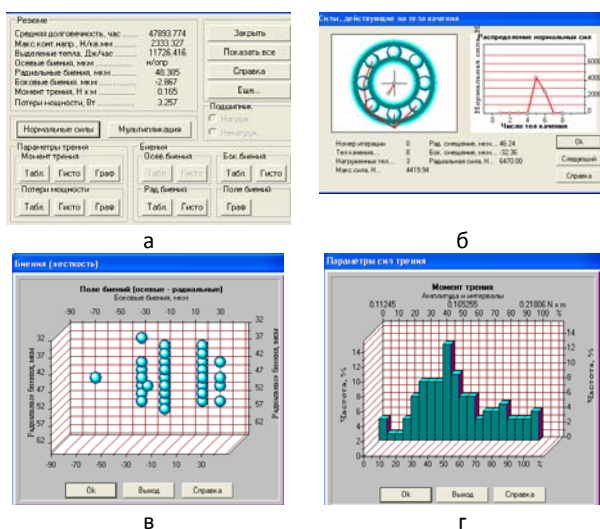


Рис. 7. Результати розрахунку радіального підшипника 4-309: а – основні параметри; б – сили, що діють на тіла кочення; в – биття (жорсткість); г – момент тертя

Висновки

Ефективне проведення моделювання конструкцій 4-х опорних валів здійснюється за допомогою модулів САПР WinMachine. На базі проведеного пружно-деформаційного дослідження знайдено «вузькі» місця конструкції та запропоновано нові рішення щодо вибору опор валів. На базі отриманих результатів показана необхідність зміни серії підшипника правої опори валу до середньої, що забезпечує допустиме переміщення, а значить буде відповідати критерію жорсткості. Такий вибір підкріплюється комплексним дослідженням напружено-деформаційного стану на базі твердотільних моделей та комплексним дослідженням неідеальних підшипників чотирьох опорного валу металорізального верстата.

Література

1. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных вузов / Под ред. В.Э. Пуша. Москва: Машиностроение, 1985. 575 с.
2. Бочков В.М., Сілін Р., Гаврильченко О.В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів: Підручник. Львів: Вид-во «Бескид Біт», 2008. 448 с.

3. Кіпчарський В.П. Металорізальні верстати: Навчальний посібник. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2018. 143 с.
4. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. Vol.17. – № 1, 2017. – Lublin, Poland. P. 27–32.
5. Krol O., Juravlev V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 // *TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture*. – OL PAN, 2013, Vol.13, No. 4, Lublin, Poland. P. 141–147.
6. Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. – Vol.13. – № 3. 2013. – Lublin, Poland. P. 114–119.
7. Гайдамака А.В. Детали машин. Основы теории та розрахунків: навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 275 с.
8. Дубинець О. Детали машин. Розрахунок та конструювання. Київ: Талком, 2014. 684 с.
9. O Krol, V Sokolov and P Tsankov. Modelling of vertical spindle head for machining centre / *J. Physics: Conf. Series* **1553** (2020) 012012. – VSPID-2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>
10. Oleg Krol, Olga Porkuian, Volodymyr Sokolov, Petko Tsankov. Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters/ *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*, 2019, Vol 72, No 11, pp. 1546-1556. DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12>
11. Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. 1278, 012002. VSPID-2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
12. Расчет деталей машин на ЭВМ: Учеб. пособие для машиностр.вузов / Д.Н. Решетов, С.А.Шувалов, В.Д.Дудко и др.; Под.ред. Д.Н.Решетова и С.А. Шувалова. М.: Высш.шк., 1985. 368 с.
13. Замрий А.А. Практический учебный курс CAD/CAE АРМ WinMachine. Учебно-методическое пособие. Москва: Изд-во АПИМ, 2004. 240 с.
14. 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. № 1. 2014. Lublin, Poland. P. 126–133.
15. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. The effect of a shock wave in an oscillating working medium during vibration finishing-grinding processing. *Cutting & Tools in Technological System. Kharkiv: NTU "KPI"*, 2020. Ed. 93. P. 43 – 55. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.93.06>
16. Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Baturin Y. (2020) Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_8
17. Кроль О.С., Кроль А.А., Бурлаков Е.И. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. № 16(989). С. 14–18.

18. Мицьк А.В., Федорович В.А. Развитие новых технологий вибрационной отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей общемашиностроительного применения. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 47 (953). С. 226 – 233.
19. Krol O.S., Osipov V.I. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4 / Commission of Motorization and Power Industry of Agriculture. OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 108–113.
20. Кріль О.С. Методи и процедури оптимізації режимів різання. Монографія. Луганськ: Вид-во СНУ ім. В.Далія, 2013. 260 с.
21. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures / EUREKA: Physics and engineering, Number 4, 2018. p. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00667>
22. Кріль О.С., Сухорутченко І.А. Трехмерное моделирование многооперационного станка модели СВМ1Ф4 в среде компас 3D. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 4. № 7 (70). С. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
23. Кріль О.С., Кріль А.А. Расчет податливости станка СФ68ВФ4 и моделирование динамики формообразования // Вісник СевНТУ, вип. 117 «Машинобудування та транспорт», Севастополь, 2011. С. 81–84.
24. Кріль О.С., Кріль А.А., Синдеева Е.В. Моделирование конструкции четырехопорного вала в САПР АРМ «WinMachine» // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. Зб. наук. пр. Луганськ: СНУ ім. В.Далія, 2008. С. 139–143.
25. Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O. (2020) Gear Transmission with Conic Axoid on Parallel Axes. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_1
26. Кріль О.С. Построение параметрических моделей ременных передач с использованием системы АРМ WINMACHINE / Восточноевропейский журнал передовых технологий. 2012. № 2/7(62). С. 61–63.
27. Кріль О.С., Шевченко С.В., Синдеева О.В., Покінтелиця М.І. Проектування механічних передач металорізальних верстатів за допомогою системи WinMachine. Навчальний посібник. Луганськ: Вид-во СНУ ім. В.Далія, 2007. 200 с.
28. Krol O, Sokolov V. Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. *Diagnostyka*. 2020; 21(3):87–93. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/126026>
29. Нерубашенко А.А., Кріль О.С., Кріль А.А. Создание базы данных параметрических моделей деталей станков в модуле АРМ Base // Вісник СевНТУ, 2010, вип.107. С.107–109.
30. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
31. Metallorazhushhye stanky: Uchebnyk dlja mashynostroytel'nyh vtuzov / Pod red. V.Э. Pusha. Moskva: Mashynostroeny, 1985. 575 s.
32. Bochkov V.M., Silin R., Gavryl'chenko O.V. Rozrazhunok ta konstruivannja metalorizal'nyh verstativ: Pidruchnyk. L'viv: Vyd-vo «Beskyd Bit», 2008. 448 s.
33. Kipchars'kij V.P. Metalorizal'ni verstati: Navchal'nij posibnik. Mariupol': DVNZ «PDTU», 2018. 143 s.
34. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. Vol.17. – № 1. 2017. – Lublin, Poland. – P. 27–32.
35. Krol O., Juravlev V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 // TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. OL PAN, 2013, Vol.13, № 4, Lublin, Poland. P. 141–147.
36. Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. Vol.13. № 3. 2013. Lublin, Poland. P. 114–119.
37. Gajdamaka A.V. Detali mashyn. Osnovy teorii' ta rozrahunkiv: navchal'nyj posibnyk dlja studentiv mashynobudivnyh special'nostej usih form navchannja. Harkiv: NTU «HPI», 2020. 275 s.
38. Dubynec' O. Detali mashyn. Rozrazhunok ta konstruivannja. Kyi'v: Talkom, 2014. 684 s.
39. Krol, V Sokolov and P Tsankov 2020 Modelling of vertical spindle head for machining centre / J. Physics: Conf. Series 1553 (2020) 012012. VSPID-2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>
40. Oleg Krol, Olga Porkuian, Volodymyr Sokolov, Petko Tsankov. Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters/ Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, Vol 72, No 11, pp.1546-1556. DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12>
41. Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. 1278, 012002. VSPID-2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
42. Raschet detalej mashyn na ЭVM: Ucheb. posobyje dlja mashynostr. Vuzov / D.N. Reshetov, S.A.Shuvalov, V.D.Dudko y dr.; Pod. red. D.N. Reshetova y S.A. Shuvalova. M.: Vissh. shk., 1985. 368 s.
43. Zamryj A.A. Prakticheskyj uchebnyj kurs SAD/CAE АРМ WinMachine. Uchebno-metodycheskoe posobyje. Moskva: Yzd-vo АРМ, 2004. 240 s.
44. 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. № 1. 2014. Lublin, Poland. P. 126–133.
45. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. The effect of a shock wave in an oscillating working medium during vibration finishing-grinding processing. *Cutting & Tools in Technological System. Kharkiv: NTU “KPI”*, 2020. Ed. 93. P. 43 – 55. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.93.06>
46. Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Baturin Y. (2020) Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_8
47. Krol' O.S., Krol' A.A., Burlakov E.Y. Tverdotel'noe modelirovanye y yssledovanye shpyndel'nogo uzla obrabatyvajushhego centra. *Visnyk Nacional'nogo uzhlehnogo univertsytetu «HPI»*. Serija: Novi rishennja v

References

- suchasnyh tehnologijah. Har'kiv: NTU «HPI», 2013. № 16(989). S. 14–18.
18. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O., Grabchenko A.I. Mehano-fiziko-himichne modeljuvannja procesu rujnuvannja poverhni detali u vil'nomu abrazivnomu seredovishhi. Rizannja ta instrument v tehnologichnih sistemah: Mizhnar. nauk.-tehn. zb. Kharkiv: NTU «KPI», 2020. Vip. 92. S. 62 – 67. <https://10.20998/2078-7405.2020.92.08>
 19. Krol O.S., Osipov V.I. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4 / Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 108–113
 20. Krol' O.S. Metody y procedury optymizaciyi rezhymov rezannya. Monografija. Lugansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalja, 2013. 260 s.
 21. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures / EUREKA: Physics and engineering, Number 4, 2018. p. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00667>
 22. Krol' O.S., Suhorutchenko Y.A. Trehmerne modelyrovanye mnogooperacyonnogo stanka modely SVM1F4 v srede kompas 3D. Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. 2014. T. 4. № 7 (70). S. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
 23. Krol' O.S., Krol' A.A. Raschet podatlyvosty stanka SF68VF4 y modelyrovanye dynamyky formoobrazovannya // Visnyk SevNTU, vyp. 117 «Mashynobuduvannya ta transport», 2011. S. 81–84
 24. Krol' O.S., Krol' A.A., Syndeeva E.V. Modelyrovanye konstrukcyyi chetyrehopornogo vala v SAPR ARM «WinMachine» // Resursozberigajuchi tehnologii' vyrobnyctva ta obrobky tyskom materialiv u mashynobuduvanni. Zb. nauk. pr. Lugansk: SNU im. V. Dalja, 2008. S. 139–143.
 25. Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O. (2020) Gear Transmission with Conic Axoid on Parallel Axes. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_1
 26. Krol' O.S. Postroyeniye parametrycheskoy modelej remennyh peredach s yspol'zovanyem systemy ARM WINMACHINE / Vostochnoevropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. 2012. № 2/7(62). S. 61–63.
 27. Krol' O.S., Shevchenko S.V., Sindjejeva O.V., Pokintelycja M.I. Proektuvannja mehanichnyh peredach metalorizal'nyh verstativ za dopomogoju systemy WinMachine. Navchal'nyj posibnyk. Lugansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalja, 2007. 200 s.
 28. Krol O, Sokolov V. Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. Diagnostyka. 2020; 21(3):87–93. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/126026>
 29. Nerubashhenko A.A., Krol' O.S., Krol' A.A. Sozdanye bazy dannyh parametrycheskoy modelej detalej stankov v module ARM Base // Visnyk SevNTU, 2010, vyp.107. S.107–109.
 30. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>

Krol O., Golubenko O.L., Slepchenko K.I. Modeling of the structure of a four-support shaft by the stiffness criterion

The means and tools of designing and modeling of multi-support shafts with the use of solid-state modeling and the finite element method in choosing the optimal design of the shaft and its supports are presented. A transverse layout of the drive has been developed, which will determine the nature of the load and the design scheme of the shaft. This shaft is considered as a rod structure on four hinged supports in which the main problem of performance is insufficient rigidity and high stress levels in certain sections. The procedure of development of elastic-deformation model as a set of two independent tasks is considered: statics of a shaft as a rod on elastic supports (calculation of an elastic line of a shaft) and the corresponding characteristics of bearings. The procedure of a three-dimensional model construction on a four-support shaft design for a multi-operation drilling-milling-boring machine in the integrated WinMachine CAD workstation is proposed. Interconnected solid-state modeling modules "ARM Studio" and "ARM Structure3D" were used, as well as a specialized module for designing shafts "ARM Shaft", which are included in the APM WinMachine CAD environment. A specialized parametric core with a very user-friendly interface is used, which provides a sharp increase in the productivity of the designer in the process of modeling machine tool shafts. The calculation of bearing 4-309 was performed using the module "ARM Bear", which is based on a set of verification calculations of non-ideal bearings, including the determination of displacements and force distribution diagrams taking into account statistical dispersion. The multivariate calculation of the elastic-deformation state using the finite element method in the environment of the integrated system of automated design APM WinMachine is considered. The analysis of displacements and angles of rotation in different sections of the shaft on rigid hinged supports and determined that their values are within acceptable limits, which confirms the efficiency of the four-support shaft structure. The maximum stresses that occur in the slotted surface are determined using the "Cross-sectional stress" option. It is shown how the elastic-deformation characteristics change during the transition from rigid to elastic-deformation hinged supports.

Keywords: multi-shaft, metal-cutting machine, 3D model, finite element method, stress diagram, displacement plots.

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

Голубенко Олександр Леонідович – д.т.н., проф., професор кафедри залізничного транспорту, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) olgol@snu.edu.ua

Слепченко Карина Ігорівна – студ. гр. ПМЕ-20дм факультет інженерії, кафедра машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) alisakatrine@gmail.com

Стаття подана 01.02.2022 р.