

P.I., Eremenk M.L., Fel'dshtejn E.Je. Teorija rezanija. Fizicheskie i teplovyje processy v tehnologicheskix sistemah. – Minsk: Vysshaja shkola, 1990. – 512 p. **6.** *Arshinov V.A., Alekseev G.A.* Rezanie metallov i rezhushhij instrument. – Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 440 p. **7.** *Dobrotvorskij S.S., Basova E.V., Shhuchev P.A.* Modelirovanie processa vysokoskorostnogo frezerovanija zakaljonnyh stalej metodom konechnykh jelementov. Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr. – Kharkov: Nac. ajerokosm. un-t «HAI», 2012. – Vol.55. – P. 20-27. **8.** *Dobrotvorskij S.S., Basova E.V., Solomatin R.I.* Issledovanie vlijanija tehnologicheskix parametrov processa vysokoskorostnogo frezerovanija na kachestvo obrabotki zakalennyh stalej. Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr. – Kharkov.: Nac. ajerokosm. un-t «HAI», 2012. – Vol.60. – P. 54-62. **9.** *Basova E.V.* Tehnologicheskoe obespechenie kachestva i tochnosti poverhnostej detalej iz zakalennyh hromomolibdenovyh stalej metodom vysokoskorostnogo frezerovanija: dis.... kand. tehn. nauk : 05.02.08 / *Basova Evgenija Vladimirovna.* – Kharkov, 2014. – 236 p. – Bibliogr. : P. 214–226.

Посмунна (received) 30.01.2021

УДК 621:519

DOI: 10.20998/2079-004X.2021.1(3).04

Н.Р. ВЕСЕЛОВСЬКА, д.т.н., проф. ВНАУ, Вінниця;

О.А. ПЕРМЯКОВ, д.т.н., проф. НТУ «ХПІ»

МОНІТОРИНГ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Основна ідея роботи полягає в розробці принципово нового підходу до моніторингу верстатного комплексу механічної обробки, сутність якого полягає в організації методики керування процесом механічної обробки на основі єдиного інтегрованого інформаційного середовища адаптованого до універсального комплексу комп'ютерного моделювання Matlab/Stateflow та Matlab/Simulink, при структурному поданні всіх складових процесу механічної обробки та

моделювання як інструменту розв'язання задачі, що розширює функціональні можливості верстатних комплексів.

Ключові слова: верстатний комплекс, функціональні можливості, моніторинг, калібрування обладнання, процес механічної обробки, інформаційний, матеріальний та енергетичний потоки, багатоцільові та багатокоординатні верстати, верстати з паралельною кінематикою.

Н.Р. ВЕСЕЛОВСКАЯ, О.А. ПЕРМЯКОВ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Основная идея работы заключается в разработке принципиально нового подхода к мониторингу станочного комплекса механической обработки, сущность которого заключается в организации методики управления процессом механической обработки на основе единой интегрированной информационной среды, адаптированной к универсальному комплексу компьютерного моделирования Matlab/Stateflow и Matlab/Simulink, при структурном представлении всех составляющих процесса механической обработки и моделирования как инструмента решения задачи, расширяющей функциональные возможности станочных комплексов.

Ключевые слова: станочный комплекс, функциональные возможности, мониторинг, калибровка оборудования, процесс механической обработки, информационный, материальный и энергетический потоки, многоцелевые и многокоординатные станки, станки с параллельной кинематикой.

N.R. VESELOVSKAYA, O.A. PERMYAKOV MONITORING THE MACHINING PROCESS

The main idea of the work is to develop a fundamentally new approach to monitoring the machine tool complex of machining, the essence of which is to organize a method for controlling the machining process based on a single integrated information environment adapted to the universal computer simulation complex Matlab/Stateflow and Matlab/Simulink, with a structural representation all components of the process of machining and modeling as a tool for solving a problem that expands the functionality of machine tools.

Key words: machine complex, functionality, monitoring, equipment calibration, machining process, information, material and energy flows, multi-purpose and multi-coordinate machines, machines with parallel kinematics.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення необхідної якості та експлуатації властивостей деталей машин набуває в машинобудуванні все більш важливого значення.

© Н.Р. Веселовська, О.А. Пермяков, 2021

Проте до теперішнього часу не розроблені узагальнені теоретичні залежності між параметрами якості поверхні, точністю обробки, експлуатаційними властивостями деталей і параметрами процесів механічної обробки, що дозволяють вирішувати задачу технологічного забезпечення заданих експлуатаційних властивостей деталей. Керування процесом формування поверхні з необхідними властивостями здійснюється переважно шляхом використання часткових експериментальних залежностей і таблиць режимів обробки. Складність проблеми полягає в тому, що при обробці деталей необхідно встановити такі умови обробки, які б забезпечували

комплекс вимог щодо зносу інструменту, точності обробки, характеристикам якості поверхні, продуктивності тощо. Області найбільш ефективного використання виробничих систем перш за все визначаються технологічним обладнанням, яке є складовою частиною системи, номенклатурою оброблюваних деталей та автоматизованою системою керування.

Основна частина. Розробку системи моніторингу режиму механічної обробки слід починати з визначення критерію оптимізації на основі техніко-економічного аналізу [3, 4, 6, 7]. На практиці найчастіше застосовуються критерії продуктивності та собівартості, які включають залежність стійкості інструменту від параметрів різання. В результаті оптимізації за цими критеріями знаходяться умови, які забезпечують максимальні (у першому випадку) і мінімальні (у другому випадку) значення даних критеріїв в певних ситуаціях. Такими умовами в багатьох ситуаціях виступають певні значення стійкості інструменту. Проте на виробництві часто ставиться задача знаходження максимально можливої продуктивності або мінімально можливої собівартості механічної обробки при заданих значеннях стійкості.

Останніми роками були зроблені спроби розробити інші залежності зносу або стійкості інструменту від параметрів різання. Проте розрахунки оптимальних режимів різання зручніше виконувати за цільовою функцією оптимізації, що є основою нормативів, за якими визначаються режими механічної обробки майже в усіх галузях машинобудування. Тому подальші обчислення будуть проводитися з використанням формули

$$P_v = \frac{bhs}{1 + \tau_{cm} (h^{x_v} \frac{318c_v k_v D^{q_v-1}}{z^{u_v-y_v} b^{r_v}} s^{y_v} n^{1-y_v})^{1/m}}, \quad (1)$$

де $\frac{318c_v k_v D^{q_v-1}}{z^{u_v-y_v} b^{r_v}} = A_1$, c_v – постійна величина для певної групи оброблюваних

матеріалів; k_v – коефіцієнт, залежний від властивостей оброблюваного матеріалу, ріжучою частиною інструменту і від типу рідини, що змачує-охолоджує; D – діаметр фрези або заготовки; n – частота обертання, об./хв.; $sz = s/(nz)$ – подача, мм/об., мм/зуб.; z – число зубців фрези; h і b – глибина і ширина різання, мм; x_v, y_v, r_v, q_v, u_v ; m – показники мір, залежні від властивостей інструменту і умов різання (значення цих показників і коефіцієнтів c_v і k_v містяться у відповідних довідниках).

Для різних видів обробки значення c_v, k_v і показники мір змінних різні. Крім того, показники x_v, y_v, r_v, q_v, u_v використовуються не у всіх видах механічної обробки.

Вхідними даними моделі є електронний образ деталі, який включає геометричні та конструктивні параметри. Як приклад на рис. 1 наведена реалізація електронної моделі виробу (корпусу гідрозподільника) засобами САПР AutoDESK Inventor [5].

Створена система описує всі зазначені вище потоки і відображає такі дії: декомпозицію електронного образу і перетворення його в процес механічної обробки, який відображає система; отримання оптимізованого процесу механічної обробки (шляхом моделювання); вибір в залежності від поточного стану системи маршруту обробки; складання моделі виробничої системи обробки із підсистем; декомпозицію геометричного образу деталі, отриманого із системи автоматизованого проектування; декодування керівної програми для системи числового програмного управління, отриманої із системи адаптивного управління; вибір і призначення інструменту; моніторинг стану процесу обробки на верстаті тощо.



Рис. 1 – Електронний образ деталі: а - 3D модель корпусу розподільника; б - фрагмент текстового файлу, в - параметрична модель корпусу, що містить опис геометрії та елементів деталі

Оптимізація технології обробки деталі на верстаті здійснюється за класичною методикою на основі критерію максимальної продуктивності обробки. У верстатів традиційних схемних рішень задаються і вимірюються порівняно прості графічні об'єкти: лінії, площини, циліндри, які відповідають простим рухам, а верстати паралельної кінематики мають складні елементарні рухи контроль яких є утруднений. Тому розроблено подійно-орієнтований граф станів процесу обробки, який реалізований за допомогою комплексу Stateflow [2].

Оптимізація процесу обробки деталі на верстаті здійснюється за методикою, що базується на основі критерію максимальної продуктивності обробки. Конструктивними та технологічними обмеженнями виступають найменша можлива частота обертання фрези $n_{d \min}$, при якій погіршуються умови отримання стружки і з'являється наріст, найбільша можлива частота обертання фрези $n_{d \max}$, що визначається конструктивно заданою верхньою межею діапазону та величиною $n_{d \max}$, при перевищенні якої відбувається швидкий знос і руйнування інструменту внаслідок його нагрівання, найбільша

подача на зубец s_{z1max} , обмежена допустимою чистотою обробки та міцністю інструменту, найбільша і найменша подачі $s_{min} \leq s \leq s_{max}$ зміни частоти обертання приводу подачі. Допустимий момент на інструменті $M \leq \min(M_{1d}, M_{2d})$, що визначається міцністю інструменту і механізмів верстата (рис. 2). Особливістю оптимізації процесу механічної обробки на верстаті паралельної кінематики є те, що подача S_z здійснюється одночасними переміщеннями декількох кінематичних ланок. Тому оптимізацію процесу обробки доводиться здійснювати в два етапи. На першому визначати необхідні технологічні показники процесу обробки (s_z , h і b , n_d). На другому етапі за визначеним значенням s_z визначати оптимальний розподіл переміщень кожного кінематичного ланцюга, необхідних для реалізації визначеного s_z . За цільову функцію обрано мінімум суми робіт, виконаних на кожному переміщенні:

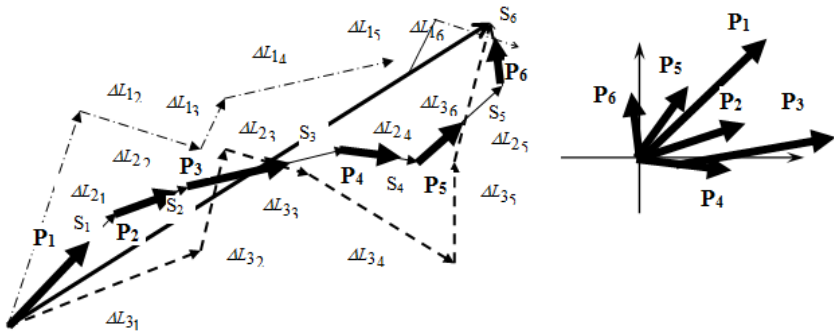


Рис. 2 – Варіанти траєкторій координатних рухів приводів верстата паралельної кінематики

За конструктивні обмеження на цьому етапі приймаються геометричні характеристики робочого простору верстата (здатність приводу забезпечити необхідне значення переміщення під заданим кутом), похибка апроксимації траєкторії переміщення (що визначається мінімальною дискретністю переміщень приводів) та максимально допустимі зусилля, що розвиваються приводами переміщення [1, 3, 5]. Просторова система верстата паралельної кінематики є статично невизначеною системою. Для визначення навантажень, що виникають в приводах подачі верстата, необхідно створювати та реалізовувати його математичну модель. Моделювання руху платформи верстата паралельної кінематики здійснюється за допомогою пакета Simulink математичної системи Matlab. Розрахунок здійснюється за допомогою блоків розширення пакета SimMechanics. Пакет розширення SimMechanics системи Simulink призначений для фізичного моделювання. Його мета - технічне проектування та моделювання механічних систем (в межах законів

теоретичної механіки). Модель механізму створюється на основі задання інерційних параметрів його рухомих частин.

Найпростіший спосіб визначення цих параметрів - використання твердотільної моделі механізму (рис 3), створеної за допомогою CAD системи. SimMechanics дозволяє моделювати поступальний та обертовий рух в трьох площинах. SimMechanics містить набір інструментів для задання параметрів ланок (маса, моменти інерції, геометричні параметри), кінематичних обмежень, локальних систем координат, способів задання і вимірів параметрів руху. SimMechanics дозволяє створювати моделі механічних систем подібно іншим Simulink-моделям у вигляді блок-схем.

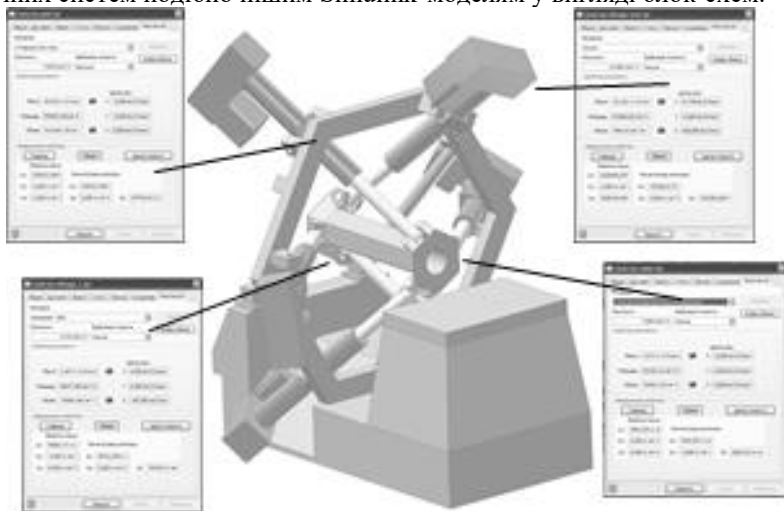


Рис.3 – Твердотільна модель механізму, створеної за допомогою CAD системи

На рис. 4 наведено процедури розрахунку кінематичних і силових параметрів верстата паралельної кінематики та геометрична модель механізму. В моделі передбачено задання двох основних видів навантаження – обробка осьовими інструментами (свердла, зенкери, розвертки) та фрезами (кінцевими, канавковими, грибковими). Моделювання руху платформи здійснюється за принципом зворотної динаміки. Геометричні характеристики руху визначаються на основі точної геометричної моделі. А далі в розраховані координати вноситься поправка, яка враховує динамічні явища, що виникають при русі внаслідок інерційних властивостей самої платформи і ланок приводів.

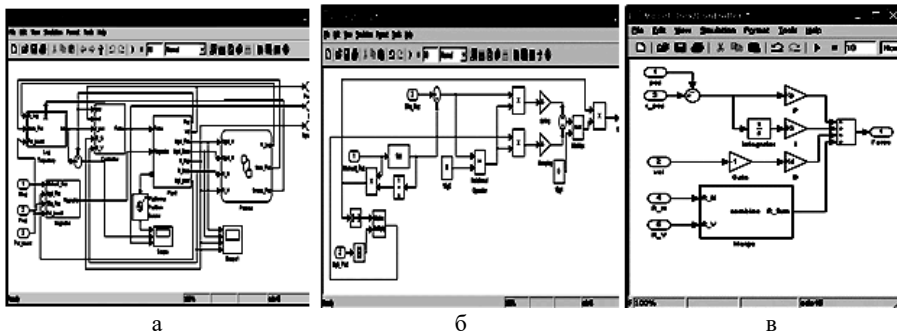


Рис. 4 – Математична модель розрахунку параметрів верстата: а - головний модуль процедури; б - модуль задання навантаження платформи; в - модуль визначення навантаження в приводі лінійного переміщення штанги

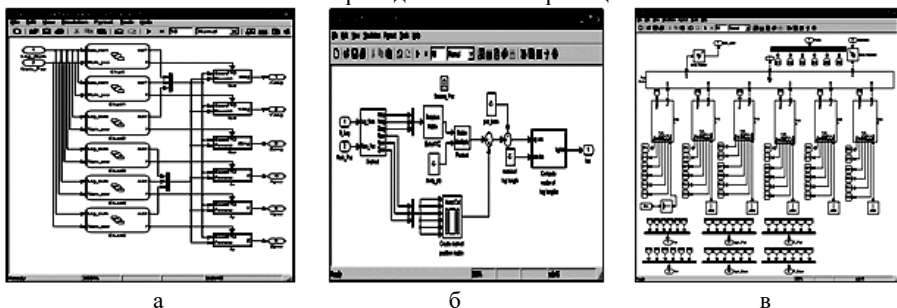


Рис. 5 – Математичні моделі розрахунку координат траєкторії руху платформи: а - модуль задання; б - модуль розрахунку; в - модуль моделювання

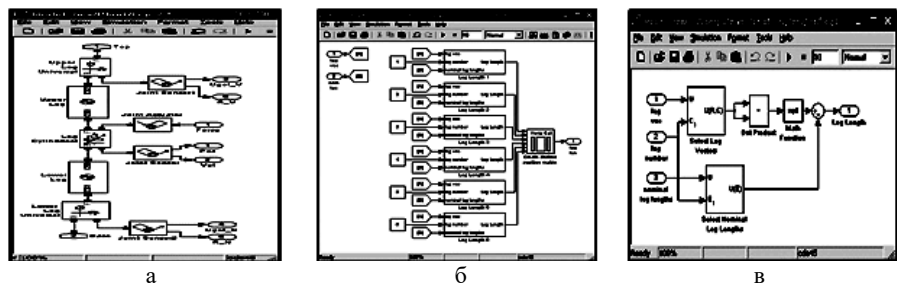
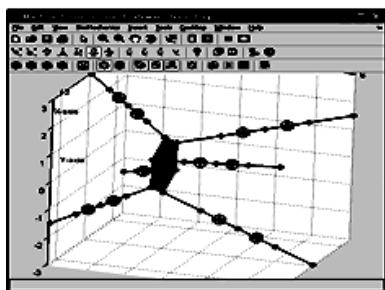
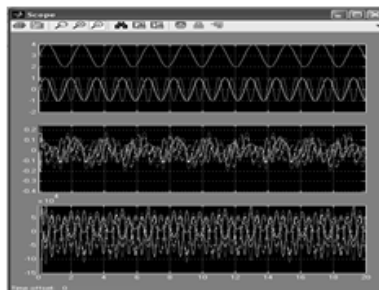


Рис.6 – Математичні моделі визначення переміщень штанги: а - модуль моделювання руху штанги; б - модуль визначення поточної довжини штанг механізму; в - модуль розрахунку поточної довжини і-ої штанги



а



б

Рис. 7 – Результати моделювання: а - візуалізація результатів моделювання; б - результати моделювання руху платформи

На основі розрахунку параметрів руху приводної штанги платформи визначаються кути нахилу штанги, реакції в шарнірах та приводах переміщення штанг механізму. Моделі, що використовують блоки функцій пакета SimMechanics, є універсальними і дозволяють створювати моделі нових механізмів просто заміною деяких модулів.

Висновки Використання даного інструменту дозволяє автоматизувати процес програмування і модифікації та налаштувань системи ЧПК з метою зниження трудомісткості проведення контрольних робіт. Використання результатів роботи суттєво підвищить показники ефективності та надійності виробничих систем механообробки і дозволить ввести корекцію в план-графіки роботи автоматизованої лінії, що забезпечує більш ефективне її використання і зниження енергозатрат. Встановлені умови обробки забезпечують вимогу до зносу інструменту, точності обробки, характеристик якості поверхні, продуктивності.

Список літератури

1. *Веселовська Н.Р.* Подійно-орієнтований графо-аналітичний опис елементів гнучких інтегрованих виробничих систем/ *Н. Р. Веселовська* //Всеукраїнський НТЖ «Вібрації в техніці та технологіях».-2010.- №1(57).-С.43-53. 2. *Метьюз Д. Г.* Численные методы. Использование MATLAB / *Метьюз Д. Г., Финк К. Д.* - 3-е изд. - М.: Изд. Дом "Вильямс", 2001. - 720 с. 3. *Митрофанов В.Г.* САПР в технологии машиностроения / *В.Г. Митрофанов, О.Н. Калачев., А.Г. Схиртладзе* и др. - Ярославль. Изд. ЯрГТУ.1995. -298 с. 4. *Струтинський В.Б.* Загальні методи діагностування та принципи підвищення надійності технологічних систем та процесів/ *В. Б. Струтинський, Н. Р. Веселовська* // Всеукраїнський НТЖ «Вібрації в техніці та технологіях».- 2007. - №4(49). - С.81-85. 5. *Петраков Ю.В.* Пути развития интегрированных CAD/CAM систем в машиностроении / *Ю.В. Петраков* // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП», – 2009. – №3. – С.160-167. 6. *Пермяков А.А.* Компонетика многопозиционных агрегатированных технологических систем механообработки / *А.А. Пермяков* // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2005. – Вып.3/1(15). – С.9-17. 7. *Пермяков А.А.* Об экономии электроэнергии и ее нормировании в механообработке / *А.А. Пермяков, А.С. Забара* //Вісник Національного технічного університету «ХП». - Харків: НТУ

Bibliography (transliterated)

1. *Veselov's'ka N.R.* Podijno-orientovany`j grafo-anality`chny`j opy`s elementiv gnuchky`x integrovany`x vy`robnny`chy`x sy`stem. Vseukrayins`ky`j NTZh «Vibraciyi v texnici ta texnologiyax».- 2010.- No1(57).-P.43-53. 2. *Met'juz D.G., Fink K.D.* Chislennyye metody. Ispol'zovanie MATLAB - 3-e izd. - Moscow: Izd. Dom "Vil'jame", 2001. - 720 P. 3. *Mitrofanov V.G., Kalache O.N., Shirladze A.G. i dr.* SAPR v tehnologii mashinostroenija. - Jaroslavl'. Izd. JarGTU.1995. -298 P. 4. *Struty`ns`ky`j V.B., Veselov's'ka N. R.* Zagal`ni metody` diagnostuvannya ta pry`ncy`py` pidvy`shhennya nadijnosti texnologichny`x sy`stem ta procesiv. Vseukrayins`ky`j NTZh «Vibraciyi v texnici ta texnologiyax».- 2007. - No4(49). - P.81-85. 5. *Petrakov Yu.V.* Puty` razvy`ty`ya y`ntegry`rovany`x CAD/CAM sy`stem v mashy`nostroeny`y`. Suchasni texnologiyi v mashy`nobuduvanni. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2009. – No3. – P.160-167. 6. *Permyakov A.A.* Komponenty`ka mnogopozo`y`cy`oppny`x agregaty`rovanny`x texnologiy`chesky`x sy`stem mexanoobrabotky`. Sxidno-Yevropejs`ky`j zhurnal peredovy`x texnologij. – Kharkiv. – 2005. – Vol.3/1(15). – P.9-17. 7. *Permjakov A.A., Zabara A.S.* Ob jekonomii jelektrojenerгии i ee normirovanii v mehanoobrabotke. Visnik Nacional'nogo tehničnogo universiteta «KhPI». - Kharkiv: NTU "KhPI". - 2009. - No1. - P.43-51.

Надійшла (received) 15.01.2021