

ШЕЛКОВОЙ А.Н., ФЕДЕНЮК Д.В., НАБОКА Е.В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВРАЩЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В статье проведен анализ подходов к механосборочному производству с низким уровнем серийности. Показано, что сборочный процесс является ключевым элементом, определяющим точность и себестоимость узла в целом. Определены задачи, которые необходимо решить для обеспечения высокоточной сборки без подгонки и селективного отбора с минимальными затратами на ее реализацию. Для реализации такого подхода необходимо синхронизировать процессы имитационного моделирования сборочного процесса с реальной сборкой и механической обработкой деталей, входящих в узел. При этом имитация сборки узла является центральной как с точки зрения формирования его свойств, так и с точки зрения формирования технологической сборки, механической обработки резанием и других технологических переделов. Предложен логико-лингвистический подход к разработке 3D модели процесса виртуальной сборки узла, основывающийся на моделировании типовых сборочных операций. В его основу положено решение задач логистики перемещений с использованием моделирования поворотов и переносов твердотельных конструкций. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о высокой схожести моделей и реальных сборочных процессов (степень расхождения по времени 3-8%, по энергозатратам 5-12%), что позволяет сделать выводы о высоком уровне адекватности моделей и методов моделирования реальной организационно-технологической среде.

Ключевые слова: мелкосерийная сборка, технологический процесс, 3D имитационное моделирование, длительность сборочного процесса.

ШЕЛКОВИЙ О.М., ФЕДЕНЮК Д.В., НАБОКА О.В.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОБЕРТАННЯ ДЕТАЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ МАШИНОБУДУВАННЯ

У статті проведено аналіз підходів до механоскладального виробництва з нижнім рівнем серійності. Показано, що складальний процес є ключовим елементом, що визначає точність і собівартість вузла в цілому. Визначено завдання, які необхідно вирішити для забезпечення високоточної збірки без підгонки та селективного відбору з мінімальними витратами на її реалізацію. Для реалізації такого підходу необхідно синхронізувати процеси імітаційного моделювання складального процесу з реальною складанням і механічною обробкою деталей, що входять в вузол. При цьому імітація складання вузла є центральною як з точки зору формування його властивостей, так і з точки зору формування технологій складання, механічної обробки різанням та інших технологічних переділів. Запропоновано логико-лінгвістичний підхід до розробки 3D моделі процесу віртуального складання вузла, який базується на моделюванні типових складальних операцій. В його основу покладено рішення задач логістики переміщень з використанням моделювання поворотів і переносів твердотільних конструкцій. Отримані результати моделювання свідчать про високу схожості моделей і реальних складальних процесів (ступінь розбіжності за часом 3-8%, за енерговитратами 5-12%), що дозволяє зробити висновки про високому рівні адекватності моделей і методів моделювання реальної організаційно-технологічного середовища.

Ключові слова: дрібносерійна збірка, технологічний процес, 3D імітаційне моделювання, тривалість складального процесу.

SHELKOVYU A.N., FEDENYUK D.V., NABOKA E.V.

MATHEMATICAL MODEL OF WRAPPED DETAILS IN THE PROBLEMS OF THE IMPACT MODEL-BATHROOM OF FOLDING OPERATING MACHINE

The article conducted an analysis of the approach to the mechanical storage unit with the lowest level of service. It is shown that a folding process is a key element, and it is a sign of accuracy and a part of a plant as a whole. It's marked the beginning, as needed for the liver of a high-frequency zbirka without the selection and selective selection with a minimum window for realization. For realizing this kind of logic, you need to synchronize the process of the simulation model of the warehouse process with the real folding and mechanical processing of parts, which should be included in the unit. At the same time, the folding of the node is central to the central point of formality of power, so the point of horizontal form of technological folding, mechanical processing of the previous technology. Logged-in linguistic identification was pre-developed before the development of a 3D model for the process of virtual folding of a node, which is based on a model of typical warehouse operations. The foundation is laid on the solution of the tasks of logic logistics to the model of turning and transferring solid constructions. Discriminate the results of the model to talk about the likeness of the models and the real folding processes (step 3–8% after an hour, 5–12% after energy consumption), allowing you to select a higher model for real models. -technological environment.

Key words: other serial, technological process, 3D simulation model, trivial storage process.

1. Вступ. При випуску високоточних виробів малими партіями необхіден підхід до формування як технології складання виробу, так і до технологій формування деталей (ТФД), з яких воно збирається, який полягає в тому, що паралельно з формуванням деталей повинен реалізуватися віртуальний складальний процес виробу (ВСПВ), в якому можуть бути присутніми як реальні розміри вже виготовлених деталей, так і віртуальні розміри поверхонь деталей, які належить ще створити. ВСПВ повинен допомогти вирішити три завдання: 1) контролювати рівень збирання вузла з урахуванням розмірів поверхонь вже виготовлених деталей; 2) періодично дозволяти коригувати розмірні ланцюги з

урахуванням вже виготовлених деталей для розмірів поверхонь деталей, які збираються виробити; 3) передавати в черговий ТФД перелічені розміри у вигляді налаштованих з метою коригування керуючих програм обробних центрів або верстатів з ЧПУ.

2. Аналіз останніх досліджень й публікацій.

Проекти за CALS-технологіями на засадах імітаційного моделювання в українському машинобудуванні перебувають у стадії зародження і є найпоширенішими тільки в авіабудуванні й суднобудуванні [1]. CALS-технології в транспортному машинобудуванні застосовуються ще дуже мало. Зокрема, на ВАТ «НБК «Уралвагонзавод» немає єдиної інформаційної системи, яка б керувала

життєвим циклом виробу, хоча й існують окремофункціонуючі системи керування персоналом, виробничого планування, цехового планування й обліку. Як основу реалізації CALS-технології в роботі пропонується використовувати мультиагентне ІМ.

Необхідною умовою впровадження CALS-технологій на великих підприємствах є складання структурної схеми, на якій відображаються основні елементи досліджуваної системи й зв'язки між ними у вигляді інформаційних, матеріальних, фінансових і інших потоків, включаючи опис виробничо-технологічних, логістичних і бізнес-процесів. Уява роботи підприємства у вигляді імітаційної моделі допоможе особі, що ухвалює рішення (ОУР), провести аналіз «Що, якщо», програти різні сценарії розвитку поточної ситуації й одержати додаткову інформацію для прийняття рішень.

Для моделювання виробничих процесів існують системи ІМ, такі як Arena, eM-Plant, Simul8, AnyLogic, BPsim.MAS [1]. За основні критерії порівняння середовищ імітаційного моделювання візьмемо критерії, які запропоновані Edwin C. Valentin та Alexander Verbraeck в роботі [1] з погляду кінцевого користувача і його можливостей розробки моделі для своєї предметної області й подальшого застосування, доробки та експлуатації нових модельних конструкцій (компонент, фрагментів моделей або бібліотек користувача).

3. Ціль дослідження. З урахуванням особливостей процесів автоматизації українського машинобудування і з метою формулювання вимог до нової системи планування та технологічної підготовки виробництва, сформульовано наступні задачі:

- підтримка стандартів CALS-технологій;
- інтеграція моделей з інформаційними системами підприємства;
- аналіз завантаження устаткування;
- оптимальний розподіл ресурсів між підрозділами;
- моделювання складних ситуацій (паралельні й альтернативні маршрути виготовлення й обробки виробів);
- створення мультиагентних моделей (програмні інтелектуальні агенти потрібні для формалізації моделей ОУР, що брала участь у керуванні й плануванні виробництвом).

4. Викладення основного матеріалу.

При уявній простоті такого підходу до формування ТФД, в його реалізації є ряд труднощів:

- послідовність реальної складання виробу повинна строго збігатися з послідовністю ВСПВ, від цього залежить, в якій послідовності можна виготовляти деталі, що входять у вузол так, щоб укластися в допуск на розмір останнього у ланки складальної ланцюга;
- в складальні розмірні ланцюги входять не всі розміри деталей, а тільки їх частина; для формування цих розмірів у ТФД існують операції і переходи, якими потрібно управляти при налагодженні верстата;
- на відміну від існуючих ТФД, для яких

характерне формоутворення деталей, що входять в один вузол, паралельне без зв'язку один з одним, для ТФД з ВСПВ існує чітка ієрархія виготовлення деталей, в якій деталь, що стоїть нижче в ієрархії, не може бути виготовлена паралельно або раніше деталі, що стоїть вище за неї;

- формування ієрархії деталей, що підлягають обробці і визначення моментів часу, коли можна запускати ТФД так само є непростим завданням, в якому сходяться як технологічні, так і організаційні проблеми підвищення продуктивності обробки при збереженні 100% гарантії збирання вузла.

- розрахунок конструкторських і технологічних розмірних ланцюгів перетворюється не в одноразовий акт, а повторюється в міру формування реальних розмірів деталей, при цьому можливо їх коригування в залежності від результатів обробки в попередніх ТФД.

Складальні операції машинобудівного виробництва представляють собою дуже складний об'єкт для вивчення, аналізу та моделювання. Це пов'язано з тим, що складальні операції на підприємстві передбачають рішення цілого комплексу проблем, що погано піддаються строгому математичному опису організаційного, економічного, технічного, соціально-психологічного характеру. У таких умовах перспективним методом рішення задач представляє використання методів імітаційного моделювання. [1]

Метод імітаційного моделювання – це один з найбільш ефективних методів вивчення функціонуючих і знову створюваних об'єктів будь-якої природи й ступеня складності. Сутність цього методу полягає в побудові імітаційної моделі досліджуваного об'єкта, й у цілеспрямованому експериментуванню із цією моделлю для вивчення поведінки в різних умовах.

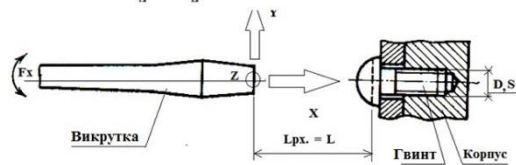
Розглянемо побудову бази знань про взаємодії в системі складання при виконанні основних (рис. 1) і допоміжних операцій (рис. 2).

Типовий складальний технологічний перехід

Завинтити винт діаметром <...> мм. с резьбой шагом <...> мм. отверткой на длине <...> мм.

$$\begin{matrix} \exists u_1 & \exists u_2 & [(u_1 \xrightarrow{b} u_2) \Rightarrow (u_1 \prec u_2)] \\ A & A & \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \exists u_1 & \exists u_2 & [(u_2 \text{ — } (u_1) \Rightarrow (u_1 \prec u_2)] \\ A & A & \end{matrix}$$



Макрос:

Завинтити Отверткой
Винт с резьбой S= <S> мм,
на длине L= <L> мм.,
диаметром D= <D> мм.

Програмовий блок:

Привязка, Винт, Отвертка
Одновременно, 2
Сдвиг, Отвертка, <L>, 0, 0, V=f(D,S), N=f(D,S)
Поворот, Отвертка, <L/S>, 0, 0, V=f(D,S), N=f(D,S)
Привязка, Винт, Корпус

Рис. 1. Приклад запису співвідношення між предикативним описом основного переходу "Завинчування гвинта" і його лінгвістичним відзеркаленням у вигляді макросу

Це дозволяє сформувати бібліотеку знань про характеристики і способи взаємодії елементів системи складання. Для вирішення цього завдання необхідно розробити лінгвістичні засоби відображення в інтерфейсах програмної системи логічних тверджень.

Математична модель системи тривимірного імітаційного моделювання виробничих систем складання вузлів. Передусім, система була побудована на тривимірному зображенні взаємодії її

елементів. Для цього необхідно було сформувати опис:

- тривимірних твердотілих моделей елементів СДС;
- систем координат елементів модельованої системи;
- параметрів кольору елементів моделі;
- приналежності елементу до спільної структури моделі.

Типова операція "переміщення вантажу"

Визначення послідовності виконання переміщення:

$$\exists u \exists v (u \prec v) \Rightarrow \forall u \forall v \{ \forall p [p(u) \sim p(v)] \Rightarrow (u \prec v) \}$$

$A_{S_1} \quad A_{S_2} \quad A_{S_1} \quad A_{S_2}$

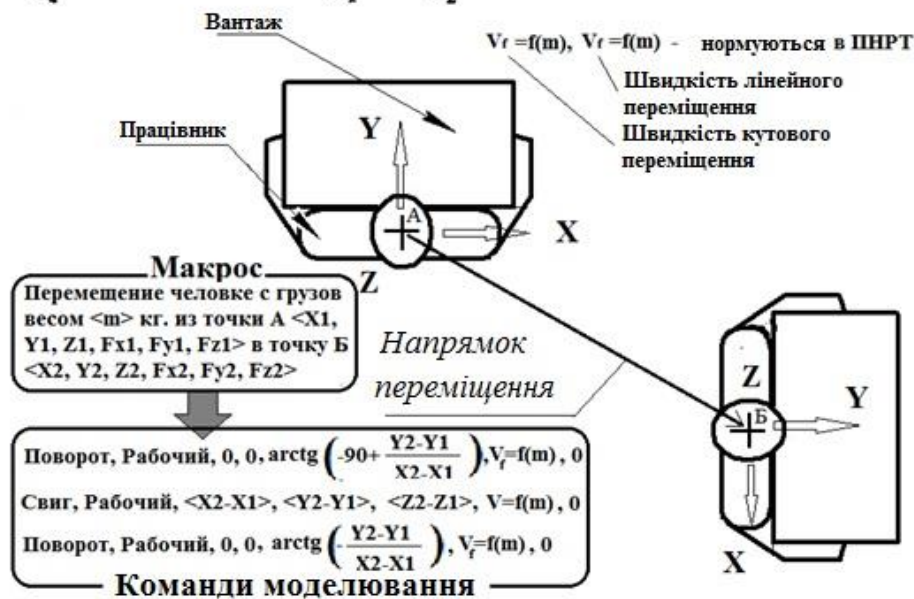


Рис. 2. Приклад запису співвідношення між предикативним описом допоміжного переходу "Переміщення вантажу" та його лінгвістичним відображенням у вигляді макросу

Імітаційне моделювання є універсальним методом, який забезпечує як точний аналіз, так і візуальне представлення альтернативних варіантів управлінської поведінки.

Для побудови інформаційної моделі процесу складання вузлів, розглядаються будь-які впорядковані пари деталей. Інформаційні моделі представляють собою задачі проектування у вигляді послідовності математичних задач проектування інформації із зазначенням для кожного завдання початкових і кінцевих даних у великих кількостях. Інформаційна модель дозволяє розглянути порядок перетворення інформації при рішенні задач. Кожен етап перетворення в інформаційній моделі представляє декартові добутки, що означає необхідність визначення умов (функцій, процедур) формування підмножин з елементів розглянутих декартових добутків.

Інформаційна модель дозволяє виявити основні математичні категорії задачі (множини й наявність відносин). Таким чином, інформаційна модель стає необхідним етапом для побудови формальної схеми

розв'язку поставленої задачі. Задача узгодження алгоритмів роботи окремих складальних ділянок з урахуванням тимчасових співвідношень, що характеризують їхню реалізацію в системі складування, у моделі вирішена за допомогою введення проміжних станів обладнання, тривалості переходів між якими існує та сама величина відрізка часу для всіх елементів системи складання.

Для розв'язку задачі переміщення й обертання виробів на кожному етапі складання й визначення кінцевої точки положення виробу в тривимірному просторі використовуються рівняння кватерніонів (рис. 3).

Кватерніони були вперше введені в 1849 році. Вільямом Гамільтоном. Кватерніони є розширенням комплексних чисел (які, у свою чергу, є розширенням речовинних чисел). Як відомо, довільне комплексне число $c \in \mathbb{C}$ складається з дійсної й уявної частин:

$$c = x + iy.$$

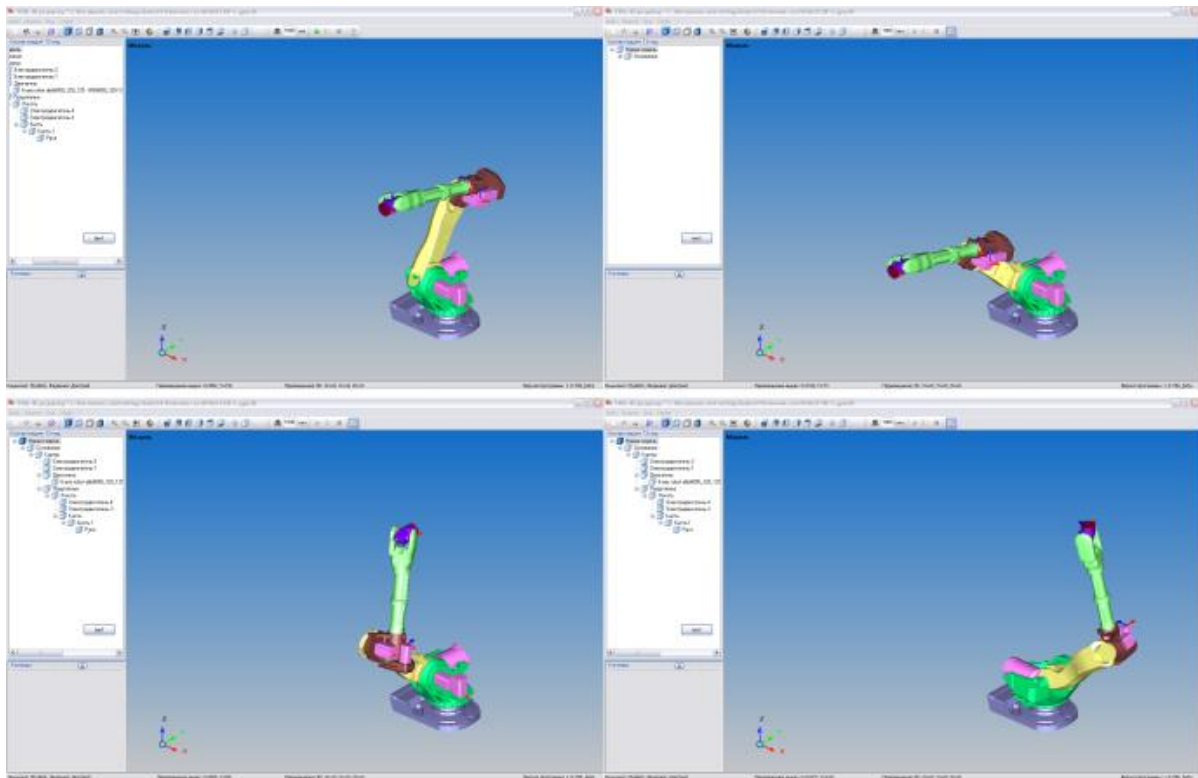


Рис. 3. Послідовність обертів на основі кватерніонів

Тут через i позначена так звана уявна одиниця – число, квадрат якого рівний -1 (тобто $i^2 = -1$). Комплексні числа є розширенням безлічі речовинних чисел, i довільний багаточлен ступені n має рівно n комплексного корінь (з урахуванням кратності). Так, багаточлен $z^2 + 1$ не має жодного речовинного кореня, але два комплексні – i та $-i$. Три, позначувані як i , j та k . Тим самим довільний кватерніон (що також складається з дійсної й уявної частин) може бути представлений у наступному виді:

$$q = w + ix + jy + kz.$$

Тут w – це дійсна частина кватерніона, а x , y , z – його уявна частина.

Послідовне застосування обертів, що задаються одиничними кватерніонами q_1 і q_2 , відповідає повороту за допомогою кватерніона, що виявляє добутком q_1 і q_2 :

$$q_2 \cdot (q_1 \cdot [0, p] \cdot q_1^{-1}) \cdot q_2^{-1} = (q_2 \cdot q_1) \cdot [0, p] \cdot (q_2 \cdot q_1)^{-1}.$$

Для одиничного кватерніона q виходить відповідна йому матриця повороту:

$$R(q) = \begin{pmatrix} 1 - 2(y^2 + z^2) & 2(xy - wz) & 2(xz + wy) \\ 2(xy + wz) & 1 - 2(x^2 + z^2) & 2(yz - wx) \\ 2(xz - wy) & 2(yz + wx) & 1 - 2(x^2 + y^2) \end{pmatrix}.$$

Імітаційне моделювання процесу складання виробів машинобудування здійснюється в системі GPS 3D.

Обертання виробів (моделей) у просторі побудоване на рівняннях кватерніонів. Послідовність перетворень обертів має вигляд (мал.1):

$$R(q_1) \cdot R(q_2) \cdot \dots \cdot R(q_n).$$

У такий спосіб застосування рівнянь кватерніонів у задачах складання виробів машинобудування, дозволяють визначити кінцеве положення виробу в тривимірному просторі, при різноманітних обертах проміжних вузлів.

Висновки. При випуску високоточних виробів малими партіями необхіден підхід до формування як технології складання виробу, так і до технологій формоутворення деталей (ТФД), з яких воно збирається, який полягає в тому, що паралельно з формоутворенням деталей повинен реалізуватися віртуальний складальний процес виробу (ВСПВ), в якому можуть бути присутні як реальні розміри вже виготовлених деталей, так і віртуальні розміри поверхонь деталей, які належить ще створити. Проекти за CALS-технологіями на засадах імітаційного моделювання в українському машинобудуванні перебувають у стадії зародження і є найпоширенішими тільки в авіабудуванні й суднобудуванні. Необхідною умовою впровадження CALS-технологій на великих підприємствах є складання структурної схеми, на якій відображаються основні елементи досліджуваної системи й зв'язки між ними у вигляді інформаційних, матеріальних, фінансових і інших потоків, включаючи опис виробничо-технологічних, логістичних і бізнес-процесів. З урахуванням особливостей процесів автоматизації українського машинобудування і з

метою формулювання вимог до нової системи планування та технологогічної підготовки виробництва, в статті сформульовано низку задач імітаційного моделювання складальних процесів. Визначені види моделей віртуального виробництва і запропоновані способи їхньої реалізації. Це дозволило створити віртуальне інтегроване середовище, в якому з великою точністю можна відтворити та дослідити різні за своїм характером складальні процеси.

Список літератури:

1. Шелковой А., Клочко А., Набока Е. Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства / Авторы: Шелковой А., Клочко А., Набока Е. - Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 528 с.
2. Боресков А. В. Программирование компьютерной графики. Современный OpenGL. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 211 с.
3. Kuipers, Jack B., Quaternions and rotation sequences : a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality, 1999. - 321 с.
4. Шелковий О.М., Феденюк Д.В. Постановка задачі підвищення ефективності систем механо-складального виробництва на основі тривимірного моделювання //Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наукових праць. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2010. - №24. - С.95 -111.
5. Соломенцев Ю. М. Моделирование технологической среды машиностроения / Ю. М. Соломенцев, В. В. Павлов. – М. : МГТУ «Станкин», 1994. – 104 с.
6. Ямпольский Л. С. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах / Л. С. Ямпольский, М. Н. Полищук. – Киев : Техника, 1988. – 175 с.
7. Соломенцев Ю. М. Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, В. В. Павлов, Л. В. Рыбаков. – М. : Наука, 2003. – 292 с.
8. Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления / Д. А. Поспелов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 232 с.
9. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахаха. – М. : Мир, 1973. – 344 с.
10. Маловицкий В. И. Система имитационного моделирования дискретных процессов / В. И. Маловицкий, Е.М. Сурхов. – Київ : Вища шк., 1981. – 96 с.

References (transliterated)

17. . Shelkovej A., Klochko A., Naboka E. Imitacionnoe modelirovanie v zadachakh mekhanosborochnoho proizvodstva /Avtory: Shelkovej A., Klochko A., Naboka E. - Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 528 s.
18. Boreckov A. V. Programirovanie komp'yuternoj grafiki. Sovremennyj OpenGL. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 211 с.
19. Kuipers, Jack B., Quaternions and rotation sequences : a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality, 1999. – 321 s.
20. Shelkovij O.M., Fedenyuk D.V. Postanovka zadachi` pi`dvishhennya effektivnosti` sistem mekhano-skladal'nogo virobnicztva na osnovi` trivimi`rnogo modelyuvannya //Vi`snik Naczi`onal'nogo tekhnichnogo uni`versitetu "Kharki`vs`kij poli`tekhnichnij i`nstitut": Zbi`rka naukovikh pracz`.. - Kharki`v: NTU "KhPI". - 2010. - #24. - S.95 -111.
21. Solomenczev Yu. M. Modelirovanie tekhnologicheskoy sredy` mashinostroeniya / Yu. M. Solomenczev, V. V. Pavlov. – М. : MGТУ «Станкин», 1994. – 104 с.
22. Yampol`skij L. S. Optimizacziya tekhnologicheskikh procezzov v gibkikh proizvodstvenny`kh sistemakh / L. S. Yampol`skij, M. N. Polishuk. – Kiev: Tekhnika, 1988. – 175 s.
23. Solomenczev Yu. M. Informacionno-vy`chislitel`ny`e sistemy` v mashinostroenii CALS-tekhnologii / Yu. M. Solomenczev, V. G. Mitrofanov, V. V. Pavlov, L. V. Ry`bakov. – М. : Nauka, 2003.
24. Pospelov D. A. Logiko-lingvisticheskie modeli v sistemakh upravleniya / D. A. Pospelov. – М. : E`nergoizdat, 1981. – 232 s.
25. Mesarovich M. Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevny`kh sistem / M. Mesarovich, D. Mako, I. Takakha. – М. : Mir, 1973. – 344 с.
26. Maloviczkij V. I. Sistema imitacionnogo modelirovaniya diskretny`kh procezzov / V. I. Maloviczkij, E.M. Surkhov. – Kiyiv : Vishha shk., 1981. – 96 s.

Поступила (received) 05.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шелковий Олександр Миколайович – доктор технічних наук, завідувач кафедрою інтегрованих технологій машинобудування імені М.Ф. Семка, верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38-096-92-34-980; e-mail: alnikshelk@gmail.com, ORCID iD 0000-0002-7414-4854

Феденюк Дмитро Віталійович (Феденюк Дмитрій Витальєвич, Fedenyuk Dmitry Vitalievich) – зам. начальника цеху Павлоградського хімічного заводу, м. Павлоград; тел.: +38-096-92-34-980; e-mail: alnikshelk@gmail.com

Набока Олена (Набока Олена Володимирівна, Набока Елена Владимировна) – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (050) 986-50-27; e-mail: namirgauza@gmail.com, ORCID iD 0000-0003-3997-5481.