

*М. А. ТКАЧУК, О. В. КОХАНОВСЬКА, Г. В. ТКАЧУК, А. О. ЗАРУБИНА, І. Я. ХРАМЦОВА,
С. І. МАРУСЕНКО, Д. С. МУХІН, С. В. КУЦЕНКО*

РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНВЕЄРІВ

Розроблено моделі та здійснено аналіз напружено-деформованого стану елементів шахтових конвеєрів. Для цього розвинуто та адаптовано метод узагальненого параметричного моделювання. Він дає змогу варіювати проектні рішення досліджуваного об'єкту. При цьому стає можливим здійснювати багатоваріантні дослідження напружено-деформованого стану. На цій основі можливе розв'язання задач цілеспрямованого поліпшення конструкцій за критеріями міцності та жорсткості. У роботі здійснено порівняння двох варіантів конструкції шкребка шахтового конвеєра. Визначено особливості напружено-деформованого стану шкребків, розраховано граничні величини навантаження, які призводять до руйнування шкребків. Ці дослідження продемонстрували можливості розробленого методу дослідження напружено-деформованого стану та обґрунтування технічних рішень виробів із високими технічними характеристиками.

Ключові слова: напружено-деформований стан; конвеєр; метод скінченних елементів; шкребок; міцність; параметризована модель; параметричне моделювання

*Н. А. ТКАЧУК, О. В. КОХАНОВСКАЯ, А. В. ТКАЧУК, А. А. ЗАРУБИНА, И. Я. ХРАМЦОВА,
С. И. МАРУСЕНКО, Д. С. МУХИН, С. В. КУЦЕНКО*

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНВЕЕРОВ

Разработаны модели и осуществлен анализ напряженно-деформированного состояния элементов шахтных конвейеров. Для этого развит и адаптирован метод обобщенного параметрического моделирования. Он позволяет варьировать проектные решения исследуемого объекта. При этом становится возможным осуществлять многовариантные исследования напряженно-деформированного состояния. На этой основе возможно решение задач целенаправленного улучшения конструкций по критериям прочности и жесткости. В работе проведено сравнение двух вариантов конструкции скребка шахтного конвейера. Определены особенности напряженно-деформированного состояния скребков, рассчитаны предельные величины нагрузки, которые приводят к разрушению скребков. Эти исследования продемонстрировали возможности разработанного метода исследования напряженно-деформированного состояния и обоснование технических решений изделий с высокими техническими характеристиками.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; конвейер; метод конечных элементов; скребок; прочность; параметрическая модель; параметрическое моделирование

*М. ТКАЧУК, О. КОХАНОВСКА, Г. ТКАЧУК, А. ЗАРУБИНА, І. ХРАМЦОВА, С. МАРУСЕНКО,
Д. МУХІН, С. КУЦЕНКО*

CALCULATING STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF CONVEYORS ELEMENTS

The models are developed and the analysis of the stress-strain state of the elements of mine conveyors is carried out. For this purpose, the method of generalized parametric modeling has been adapted and developed. It allows to vary design solutions of the studied object. In this case it becomes possible to carry out multivariate studies of stress-strain state. On this basis, it is possible to solve the tasks of purpose-oriented improvement of structures according to the criteria of strength and rigidity. In the work, a comparison is made for two design variants for shaft conveyor scraper. Peculiarities of the stress-strain state of scrapers are determined, limiting loading values are calculated, which leads to scrapers destruction. These studies demonstrated the possibility of a developed method for studying the stress-strain state and the justification of technical solutions for products with high technical characteristics.

Keywords: stress-strain state; conveyor; finite element method; scraper; strength; parametric model; parametric modeling

Вступ. Сучасне машинобудування потребує виробів із високими технічними і тактико-технічними характеристиками. Сучасного рівня технічних характеристик неможливо досягти без здійснення досліджень їх напружено-деформованого стану (НДС). При цьому ключовою є можливість варіювати проектні та технологічні параметри і режими експлуатації в ході розрахункових досліджень. Це створює можливість цілеспрямованого поліпшення технічних рішень за критеріями міцності, жорсткості, навантажувальної здатності, довговічності тощо. Оскільки уже навіть одиничне розв'язання задачі аналізу НДС конструкцій є достатньо складним, то при здійсненні багаточисленних досліджень обсяг потрібних обчислювальних ресурсів стає невиправдано великим. У цьому випадку доцільне цілеспрямоване варіювання технічних рішень. У силу таких обставин важливо будувати такі параметричні моделі, які можуть реалізовувати зручне варіювання конструкції, що досліджується.

Зокрема, подібна проблема постає при визначенні раціональних технічних рішень шкребків шахтових конвеєрів. Стосовно цих шкребків існує вимога міцності при дії екстремальних тягових сил. З іншого боку, існує вимога мінімізації маси шкребка.

Таким чином, протиріччя, що склалося, формує задачу побудови параметричних розрахункових моделей шкребків шахтових конвеєрів. Також важливим є порівняльний аналіз напружено-деформованого стану досліджуваних шкребків. Такі двоетапні дослідження складають мету цієї роботи.

Аналіз існуючих методів. Натепер технології параметричного геометричного моделювання є домінуючими у проектних розробках машинобудівних конструкцій. Дослідження напружено-деформованого стану елементів цих конструкцій, як

© М. А. Ткачук, О. В. Кохановська, Г. В. Ткачук,
А. О. Зарубіна, І. Я. Храмцова, С. І. Марусенко,
Д. С. Мухін, С. В. Куценко, 2019

правило, здійснюється за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) [1]. На шляху інтеграції параметричного геометричного та скінченно-елементного моделювання створюються потужні програмні комплекси типу Creo, SolidWorks, Catia. Вони володіють широким арсеналом можливостей щодо розв'язання як задач аналізу, так і синтезу складних конструкцій за критеріями міцності. Проте весь спектр задач, що постають на практиці, у цих програмних засобах напругу не розв'язується. Крім того, для окремих предметних областей потрібно створення спеціалізованих інструментів досліджень, які орієнтовані на певний специфічний клас конструкцій. Тому слід звернути увагу на альтернативні методи аналізу та синтезу [2–9]. Зокрема, у роботі [10] запропоновані основи методу узагальненого параметричного моделювання процесів і станів у складних механічних системах. На цій основі будуються спеціалізовані програмно-моделні комплекси. Вони складаються із програмних модулів, які оперують із параметризованими моделями досліджуваних об'єктів. Крім того, залучаються можливості універсальних програмних комплексів типу ANSYS, Abaqus, Femap тощо.

Цей підхід продемонстрував високу ефективність [11–13] стосовно широкого класу об'єктів. Тому він був розвинений та адаптований для задач, які поставлені у цій роботі стосовно шкребків шахтових конвеєрів.

Загальний підхід до розв'язання поставлених задач. При розробці методів, алгоритмів та програмного забезпечення для побудови параметричних моделей просторових об'єктів складної геометричної форми потрібно розв'язати задачу створення раціональної структури дослідження напружено-деформованого стану. Застосування методу скінченних елементів передбачає створення сітки скінченних елементів, формування граничних умов та навантажень на вузли сітки. Саме створена скінченно-елементна модель є основою для дослідження впливу різних параметрів на міцність та жорсткість досліджуваних тіл. Зазвичай цей етап є дуже трудомістким та довготривалим.

Основна мета роботи – розробка ефективної системи для побудови параметричних моделей просторових об'єктів складної геометричної форми із використанням сучасних методів, алгоритмів та програмного забезпечення.

Запропоновані підходи, що дозволяють побудувати розрахункові моделі досліджуваних об'єктів на основі їх 3D-моделей, створених у різних CAD-системах. Розроблено загальну схему побудови якісної моделі, яка базується на методі узагальненого параметричного моделювання [10].

Новизна та унікальність запропонованих методів полягає у новому підході до створення моделей досліджуваних тіл на основі поєднання універсальних CAD/CAE-систем та спеціалізованих модулів. Крім того, запропоновано розширений параметричний підхід до створення моделей. Він полягає у тому, що параметрами моделі є не тільки геометричні

розміри, але й структура, компоновка, форма об'єкта і розміри сітки скінченних елементів, граничні умови, умови контактної взаємодії та навантаження.

Результатами при цьому є:

1) схема побудови скінченно-елементних моделей досліджуваних об'єктів;

2) спеціалізовані модулі для опису окремих об'єктів;

3) тестові моделі для дослідження напружено-деформованого стану окремих тіл складної форми.

Отримані результати дозволяють приступити до здійснення багатоваріантних розрахунків НДС з метою обґрунтування раціональних технічних рішень. Зокрема, у роботі це здійснено на прикладі шкребків шахтових конвеєрів.

Побудова параметризованих моделей досліджуваних об'єктів. Задача створення раціональної схеми отримання скінченно-елементних моделей просторових тіл складної форми є однією з найбільш важливих при проектному дослідженні їх НДС. З одного боку, в універсальних CAD/CAE-системах є можливості для створення скінченно-елементних моделей тіл практично будь-якої складності. З іншого боку, найбільші можливості для оперування з моделлю дають спеціальні модулі, що орієнтовані на відповідний клас конструкцій. У роботі запропоновано підхід, що поєднує переваги універсальних та спеціальних систем створення розрахункових моделей. Запропоновано поєднувати у рамках дослідження того чи іншого класу конструкцій універсальні CAD/CAE-системи та спеціалізовані підсистеми. Це різко підвищує оперативність створення моделей. Вони створюються в автоматизованому режимі. Крім того, впроваджується наскрізна параметризація цих моделей. Це дає змогу створювати не одну модель, а цілий клас моделей. Ці моделі на будь-якому етапі досліджень можуть бути модифіковані.

Пропонуються оригінальні методи та алгоритми урахування реальних умов взаємодії елементів досліджуваних систем, зокрема – контактної взаємодії. Вони полягають у новій оригінальній схемі трактовки поведінки контактних елементів та пошуку зон контактної взаємодії. У рамках запропонованого підходу вдається уникнути або значно зменшити час на ітераційний процес пошуку зон контакту та контактного тиску.

При цьому слід зазначити, що при проектуванні нових машинобудівних виробів закономірним і важливим етапом є математичне моделювання різних фізичних процесів і вибір на цій основі їх раціональних конструктивних параметрів (рис. 1).

Зокрема, при проектуванні елементів складних механічних систем актуальним питанням є оптимальний вибір конструктивних і технологічних параметрів, а також режимів експлуатації, що забезпечують міцність, жорсткість і надійність проектного виробу, а також зниження його маси. Для розв'язання цієї задачі плідне використання системного підходу [1]. Дійсно, сучасні машини є складними системами взаємодіючих елементів. У свою чер-

гу самі машини знаходяться у становищі підсистеми до систем, що включають їх самих, зовнішнє середовище, системи керування й операторів.

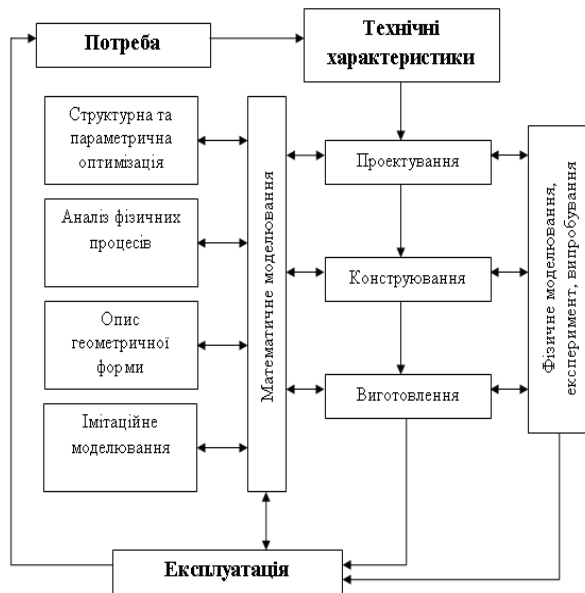


Рисунок 1 – Структура проектування та життя виробу

У зв'язку з цим пропонується розширити ідеї параметричного підходу, запропонованого в роботах [2, 3], а саме розширити множину визначальних параметрів шляхом включення в нього параметрів всіх елементів системи «машина – зовнішнє середовище – система керування – оператор» (М – ЗС – СК – О). Природно, при цьому необхідно розв'язати задачі ранжирування параметрів, визначення значимих і малозначимих з них, а також (за необхідності) – розширення множини значимих параметрів.

Основними факторами успіху в сучасному промисловому виробництві є: скорочення терміну виходу продукції на ринок, зниження її собівартості і підвищення якості. До числа найбільш ефективних технологій, що дають можливість виконати ці вимоги, належать так звані CAD/CAM/CAE-системи (системи автоматизованого проектування, технологічної підготовки виробництва й інженерного аналізу). За останні роки CAD/CAM/CAE-системи пройшли шлях від порівняно простих креслярських додатків до інтегрованих програмних комплексів, що забезпечують єдину підтримку всього циклу розробки, починаючи від ескізного проектування і закінчуючи технологічною підготовкою виробництва, випробуваннями і супроводом. Сучасні CAD/CAM/CAE-системи не тільки дають можливість скоротити термін впровадження нових виробів, але і впливають на технологію виробництва, даючи змогу підвищити якість і надійність продукції, що випускається (підвищуючи, тим самим, її конкурентоздатність). Зокрема, шляхом комп'ютерного моделювання складних виробів конструктор може зафіксувати нестиковку і заощаджує на вартості виготовлення фізичного прототипу.

Як правило, у сучасні CAD-системи входять

модулі моделювання тривимірної об'ємної конструкції (деталі) і оформлення креслень та текстової конструкторської документації (специфікацій, відомостей тощо). Провідні тривимірні CAD-системи дають можливість реалізувати ідею наскрізного циклу підготовки і виробництва складних промислових виробів. САМ-системи (системи технологічної підготовки виробництва) натеper є практично єдиним способом для виготовлення складнопрофільних деталей і скорочення циклу їхнього виробництва. У САМ-системах використовується тривимірна модель деталі, створена у CAD-системі. САЕ-системи (системи інженерного аналізу) є великим класом систем, кожна з яких дає можливість розв'язувати визначену розрахункову задачу (групу задач), починаючи від розрахунків на міцність, аналізу і моделювання теплових процесів до розрахунків гідравлічних систем і машин, розрахунків процесів лиття тощо. У САЕ-системах також використовується тривимірна модель виробу, створена у CAD-системі.

З досвіду використання так званих «важких» CAD/CAM-системи впливає, що вони фактично вимагають повної перебудови виробництва «під себе». Реальному виробництву, якому треба випускати продукцію, навпаки, потрібно налаштувати систему під існуючі техпроцеси обробки інформації.

Крім цього, одним із слабких місць, що мають корені в історії розвитку систем автоматичного проектування, є передача даних між CAD, САЕ, САМ-системами. Цю проблему вирішують різними шляхами: від створення спеціальних інтерфейсних модулів до окремих програмних продуктів, основна задача яких – усунення нестиковок.



Рисунок 2 – Структура CAD/CAM/CAE-системи

Для сучасних САПР характерне поєднання функцій CAD, САЕ, САМ-систем в інтегрованих CAD/CAE/CAM-системах з єдиною базою даних (рис. 2). При цьому тенденція ця є провідною (приклад – Pro/ENGINEER(Creo), CATIA). Таке поєднання, крім усунення проблем передачі даних, приносить і інші очевидні переваги: оперативність; скрізна параметризація; асоціативність; можливість створення з урахуванням блочної структури комплексної системи автоматизованого проектування, дослідження, виготовлення. Останнє передбачає використання або достатньо потужних, дорогих і ресурсомістких систем (типу того ж Pro/ENGINEER(Creo) або CATIA), або розробки оригінальних спеціальних систем, орієнтованих на вузький клас задач.

Більш гнучкою схемою видається та, котра поєднує переваги і недоліки кожного з напрямків: створення спеціалізованих систем проектування, виготовлення і дослідження певних класів конструкторських

цій на базі універсальних систем, у які вбудовуються спеціалізовані модулі. Пропонований підхід, крім очевидних економічних вигод, дає велику перевагу на етапах побудови просторових моделей, способів виготовлення, чисельних моделей і при виборі методів вирішення оптимізаційних задач.

Загальна схема розв'язання сформульованої задачі – на рис. 3.

Аналіз схем на рис. 4 показує, що в цих системах присутні кілька ключових елементів, що визначають як можливості тієї чи іншої системи в цілому, так і ефективність обробки й обміну інформацією з іншими системами. При цьому центральною ланкою

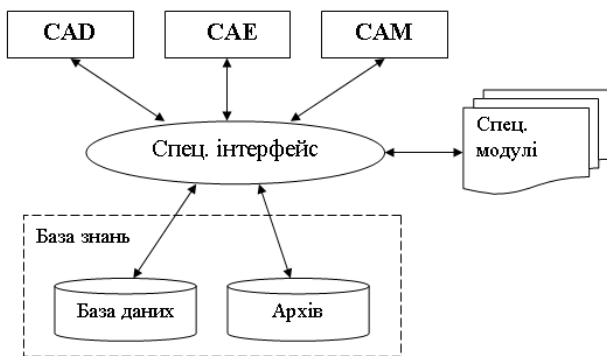


Рисунок 3 – Загальна схема розв'язання

більшості систем є математичне ядро, що визначає технологію роботи з основною первинною геометричною інформацією.

Схема взаємодії елементів інтегрованої системи автоматизованого проектування, дослідження, виготовлення (САПДВ) наведена на рис. 4. На рис. 5 наведена структура даних у системі автоматизованого проектування, дослідження, виготовлення.

Для дослідження складних механічних систем пропонується підхід, заснований у тому числі на параметричному поданні найбільш істотної інформації.



Рисунок 4 – Схема взаємодії елементів систем автоматизованого проектування, дослідження та виготовлення



Рисунок 5 – Схема структури організації даних в інтегрованих системах автоматизованого проектування, дослідження та виготовлення

У параметричній моделі визначальними параметрами можуть бути як конструктивні розміри, так і силові впливи, технологічні параметри, фізико-механічні властивості матеріалів тощо, а також варі-

анти конструктивних рішень. Важливо те, що при параметризації моделі того чи іншого елемента складної механічної системи зберігається цілісність конструкції при варіюванні окремих її параметрів

або наборів таких параметрів. Параметризація також є основним кроком на шляху застосування того чи іншого методу оптимізації конструкції.

У зв'язку з цим запропонована авторами схема побудови параметричних моделей на кожному етапі набуває властивості наскрізної параметризації (рис. 6, 7).

Схема роботи із застосуванням запропонованих авторами технологій побудови розрахункових моделей елементів складних механічних систем передбачає модульну структуру програмного забезпечення. При цьому обмін інформацією між розроблюваними модулями здійснюється за схемою, наведеною на рис. 8.

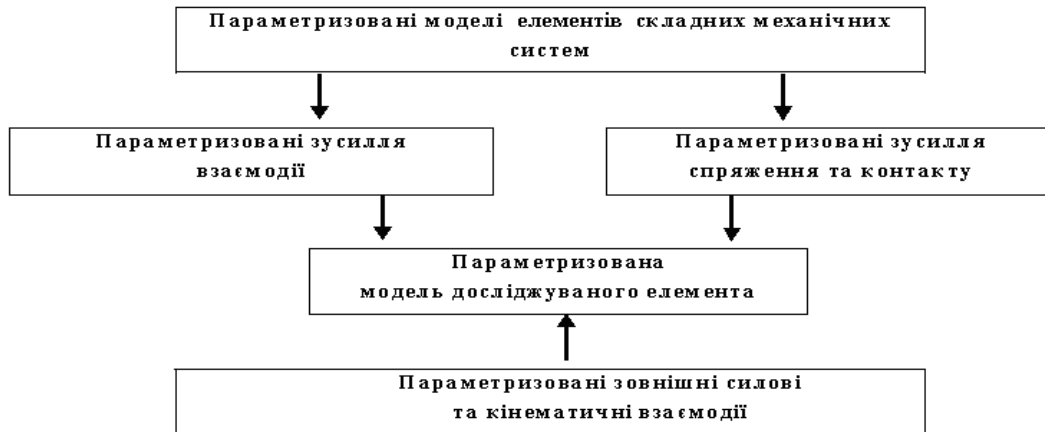


Рисунок 6 – Скрізна параметризація при дослідженні напружено-деформованого стану елементів складних механічних систем

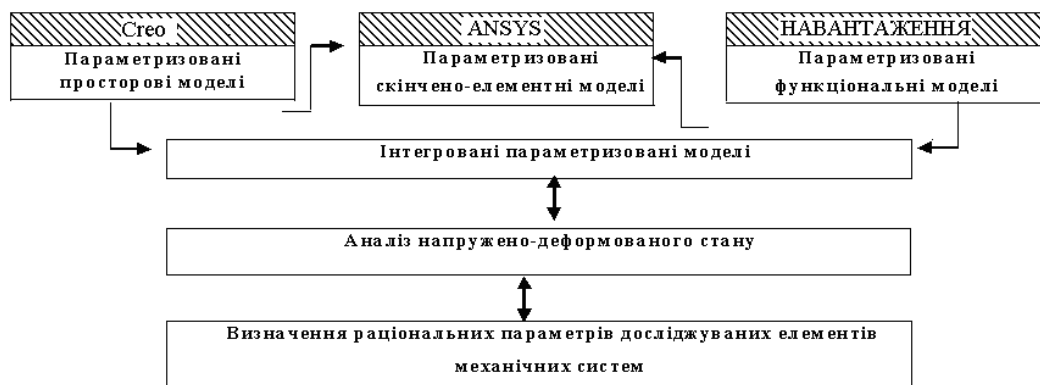


Рисунок 7 – Комплексна схема дослідження напружено-деформованого стану елементів складних механічних систем

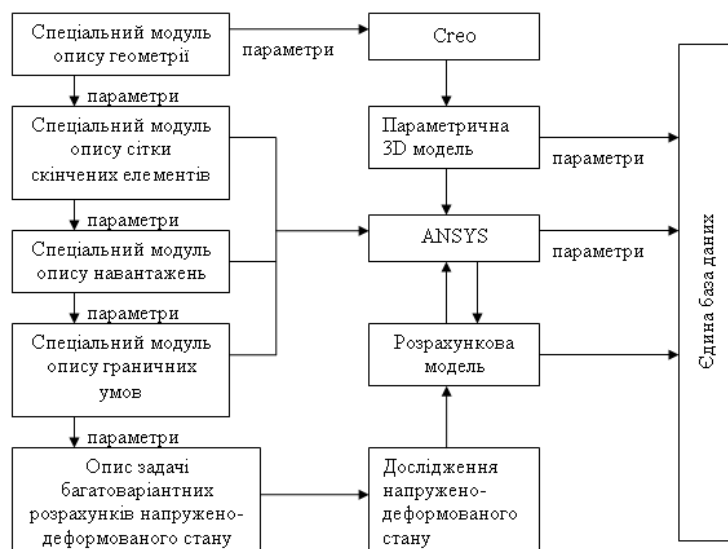


Рисунок 8 – Схема обміну між програмними модулями

Побудова розрахункових моделей шкребків та дослідження їх напружено-деформованого стану. На рис. 9, 10 приведений загальний вигляд конструкції – шкребка I (виробник – завод «Світло Шахтаря», м.Харків). Основні характеристики шкребка наведені в табл. 1.



Рисунок 9 – Шкребок I. Вид знизу

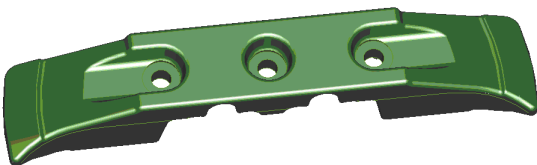


Рисунок 10 – Шкребок I. Вид зверху

Таблиця 1 – Основні характеристики шкребка I

Габаритні розміри	674x135x105
Матеріал	Сталь 35ХГСА
Маса, не більше, кг	24
Пробне навантаження, т	30
Руйнівне навантаження, т	70

Шкребок I, використовуваний у ланцюговому шахтному конвеєрі для подачі вугілля, що добувається, до підйомника, є суцільнометалевим литим тілом. Дослідження напружено-деформованого стану шкребка здійснювалися з метою визначення руйнівного навантаження. З огляду на умови його роботи, а також цілі дослідження, цю задачу не можна звести до двомірної, тому будувалася тривимірна просторова геометрична модель.

Оскільки повністю змоделювати умови роботи шкребка на конвеєрі при транспортуванні породи дуже складно (ця задача вимагає великих обчислювальних ресурсів), то в задачі була реалізована схема навантаження, що використовується в пристосуванні для випробувань нових шкребків у цеху. Модель пристосування показана на рис. 11. Для спрощення задачі в геометричній моделі шкребка перетинання її двома циліндрами були побудовані поверхні, що моделюють опору.

Для прискорення здійснення різноманітних розрахунків було введено низку параметрів. Оскільки цей шкребок є досліджуваним виробом, отже, для нього конструкція випробувального пристосування є варійованою, тому саме розміри і положення опори і були параметризовані. На рис. 12 показані геометричні параметри моделі. Параметри $d693$ і $d692$ відповідають за положення опори, а $d691$ і $d694$ відповідають за її розміри.

Геометричні параметри доповнювалися параметрами, що визначають розміри скінченних елементів, величину навантаження, властивості мате-

ріалу. Докладніше додатковий набір параметрів описано нижче.

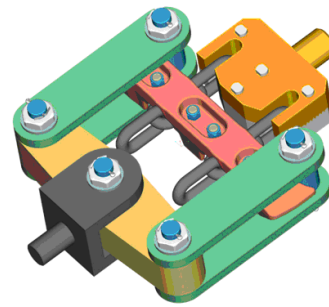


Рисунок 11 – Схема пристосування для випробування шкребка у площині тягового органу на прикладі шкребка I

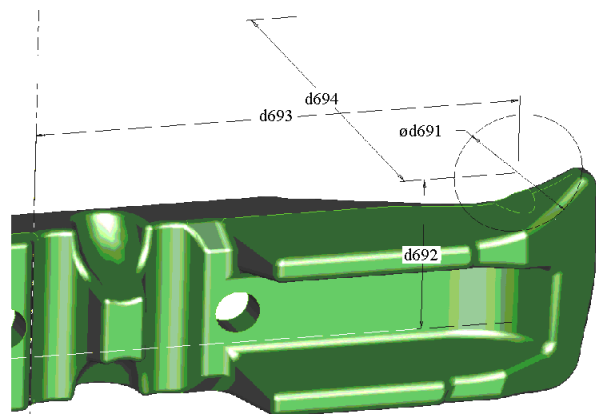


Рисунок 12 – Геометричні параметри моделі шкребка

Геометрична модель. Етапи створення. Геометрична модель будуватися в кілька етапів. Рис. 13–20 ілюструють основні з них. Створення моделі починалося з першого «витягування», у результаті були отримані грубі контури симетричної половини деталі (рис. 13). Наступний етап – підрізування краю, див. рис. 14. На рис. 16 показана модель після прорізки площадок під кріпильні скоби. На наступних двох етапах створюється поверхня контакту з ланкою, що навантажує, і будуватися симетрична частина (рис. 16, 17). Рис. 18, 19 ілюструють подальше видалення зайвого матеріалу, а на рис. 20 показана практично готова модель, на якій створені ливарні ухили, скруглення й отвори для кріпильних скоб. Останнім етапом є створення поверхні контакту шкребка з опорою іспитового пристосування.

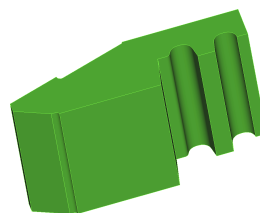


Рисунок 13 – Створення першого «витягування»

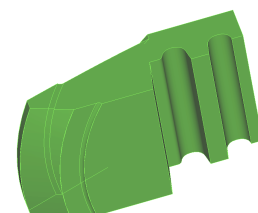


Рисунок 14 – Обрізка краю

дається з першого пакета в другий (див. рис. 21).

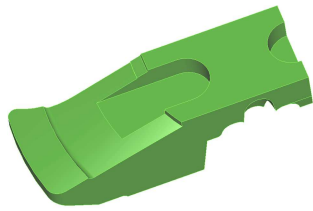


Рисунок 15 – Розмітка площадок під кріпильні скоби



Рисунок 16 – Створення поверхні контакту з ланцюгом

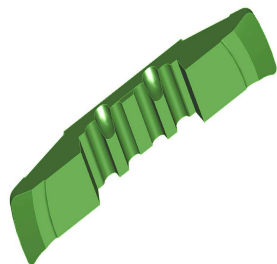


Рисунок 17 – Створення симетричної частини

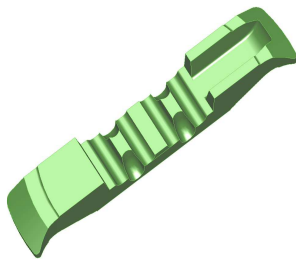


Рисунок 18 – Видалення «зайвого металу», створення двох поверхонь контакту, що залишилися, з ланцюгами

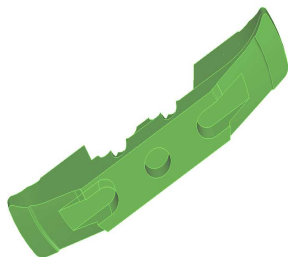


Рисунок 19 – Створення ливарних ухилів

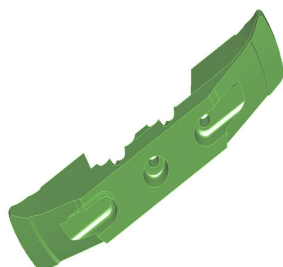


Рисунок 20 – Створення скруглень і отворів під скоби

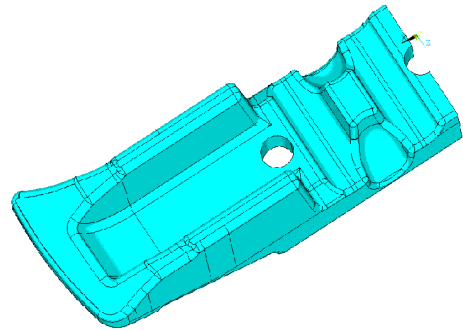


Рисунок 21 – Геометрична модель шкребка, передана в ANSYS

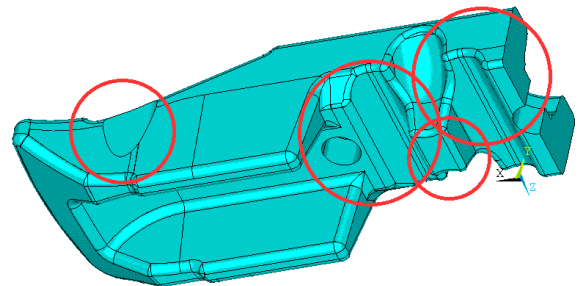
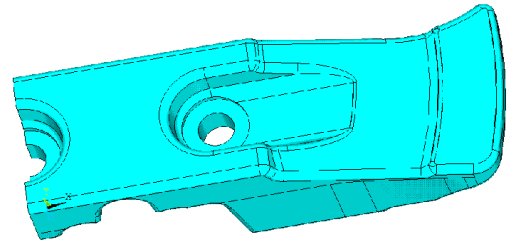


Рисунок 22 – Зони згущення сітки

Створення скінченно-елементної сітки. Для визначення руйнівного навантаження необхідно здійснення нелінійних розрахунків. Нелінійність викликана необхідністю урахування пластичної деформації, виникаючої у конструкції при такому випробуванні.

Нелінійний розрахунок з урахуванням пластичних деформацій вимагає завдання діаграми розтягання, що визначає модель поведінки матеріалу. На жаль, одержання реальної діаграми розтягання металу, використовуюваного в конструкції, вимагало проведення дорогого експерименту, оскільки сталь проходила процедуру перегартування для підвищення характеристик міцності. Єдині значення, що вдалося одержати – це модуль пружності і межа міцності. Для вирішення цієї проблеми в розрахункову схему була закладена модель полілінійного ізотропного матеріалу зі зміцненням. Графік моделі матеріалу наведений на рис. 23.

Далі з використанням ANSYS будувалася скінченно-елементна сітка (рис. 24, 25). Тут використовується низка параметрів, що задають розміри елементів у різних зонах. У моделі після декількох перевірючих розрахунків був виділено ряд «небезпечних» зон, у яких сітка була згущена, що і потребувало введення декількох параметрів. Як «небезпечні» зони були обрані: зона контакту з опорою, зона дії навантаження, а також зони, у яких істотно

зменшується товщина шкребка.

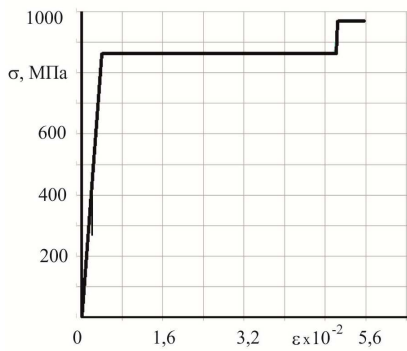


Рисунок 23 – Діаграма розтягання «напруження (σ) – деформації (ϵ)»

Навантаження і граничні умови. У площині

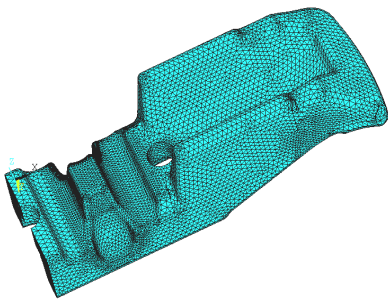


Рисунок 24 – Скінченно-елементна сітка

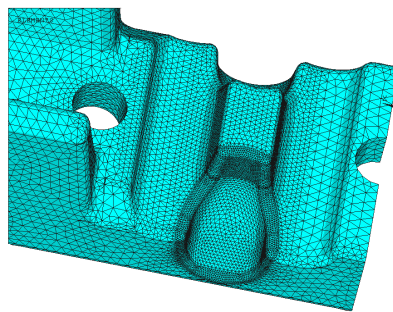


Рисунок 25 – Скінченно-елементна сітка (більш детальна)

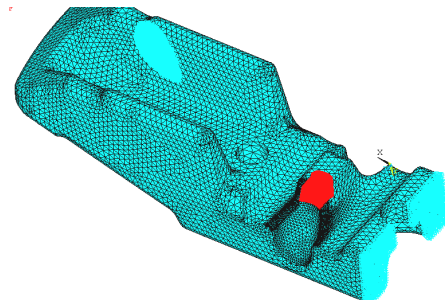


Рисунок 26 – Схема навантаження

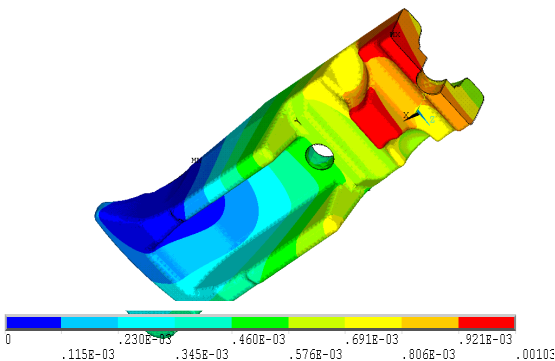


Рисунок 27 – Діаграма розподілу повних переміщень, м

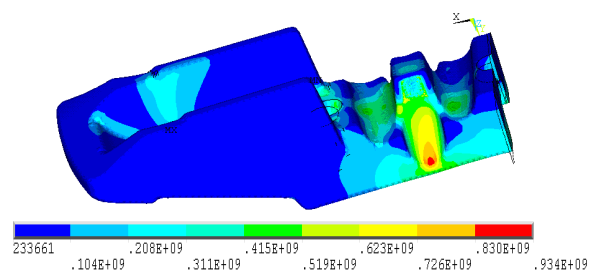


Рисунок 28 – Діаграма розподілу еквівалентних за Мізесом напружень, Па

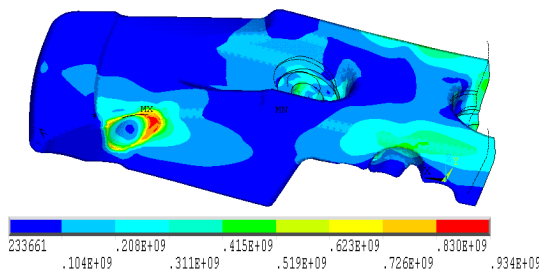


Рисунок 29 – Діаграма розподілу еквівалентних за Мізесом напружень, Па

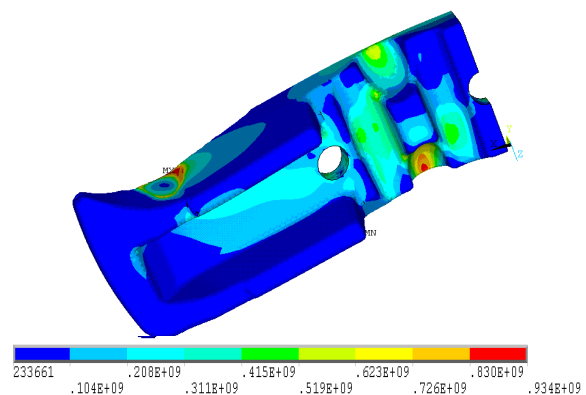


Рисунок 30 – Діаграма розподілу еквівалентних за Мізесом напружень, Па

симетрії (ПС) були задані умови симетрії, а саме, заборонені переміщення з ПС. Контакт з опорою пристосування, завдяки описаним вище спрощенням задачі, звівся до заборони переміщень на поверхні контакту. На поверхні контакту з ланкою навантажувального ланцюга задавалася сила, розподілена на вузлах. Значення сили задавалося окремим параметром. Схема навантаження і граничні умови наведені на рис. 26.

Результати тестових розрахунків. Після підготовки моделі проводився розрахунок. Виходячи з діапазону параметрів і з огляду на всі тестові розрахунки, було проведено більше двох десятків розрахунків.

На рис. 27–30 наведені діаграми розподілу сумарних переміщень і еквівалентних (за критерієм фон Мізеса) напружень.

Порівняльний аналіз НДС двох варіантів конструкцій шкребків. Для дослідження були запропоновані геометричні моделі двох шкребків, створені в САПР Pro/ENGINEER: I та II. На рис. 31 наведено геометричну модель шкребка II.

За кожним шкребком були здійснені наступні розрахункові дослідження:

1. Дослідження у пружній області для визначення пробного навантаження:

а) навантаження у площині руху ланцюга;

б) навантаження у площині, перпендикулярній руху ланцюга.

2. Пружно-пластична деформація для визначення руйнівного навантаження у площині руху ланцюга.

На рис. 32–58 наведені розподіли повних переміщень (м) та еквівалентних за Мізесом напружень (Па) у шкребках I та II.

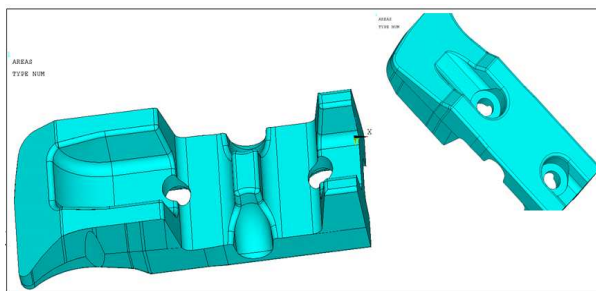


Рисунок 31 – Геометрична модель шкребка II

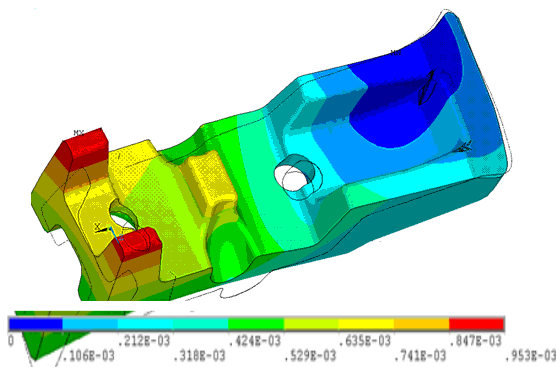


Рисунок 32 – Розподіл переміщень шкребка II під дією навантаження 30т у площині руху ланцюга, м

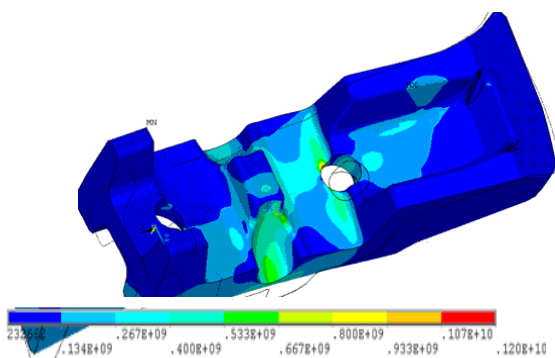


Рисунок 33 – Розподіл напружень шкребка II під дією навантаження 30т у площині руху ланцюга, Па

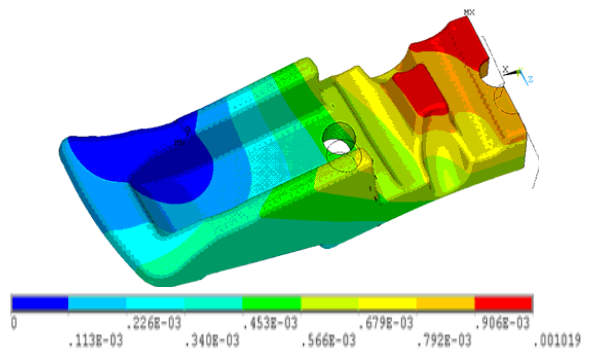


Рисунок 34 – Розподіл переміщень шкребка I під дією навантаження 30т у площині руху ланцюга, м

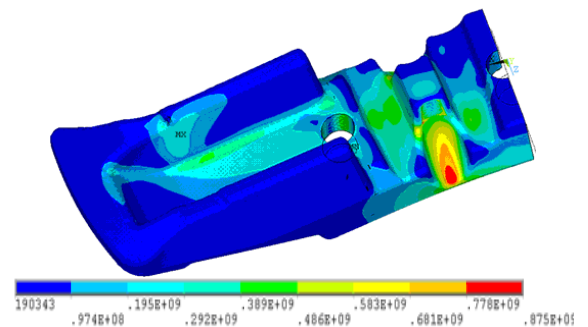


Рисунок 35 – Розподіл напружень шкребка I під дією навантаження 30т у площині руху ланцюга, Па

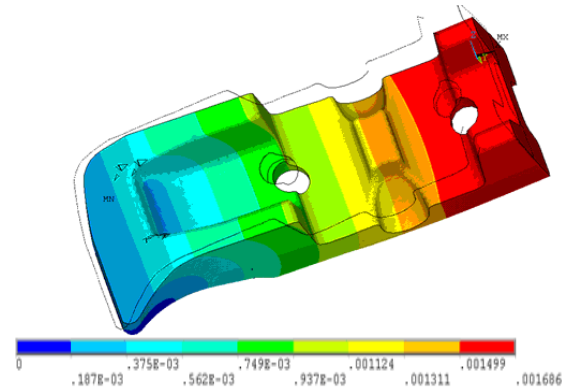


Рисунок 36 – Діаграма розподілу переміщень шкребка I під дією навантаження 10т у площині, яка перпендикулярна руху ланцюга, м

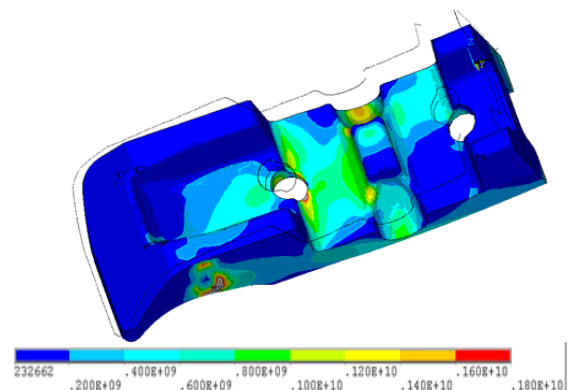


Рисунок 37 – Діаграма розподілу напружень шкребка I під дією навантаження 10т у площині, яка перпендикулярна руху ланцюга, Па

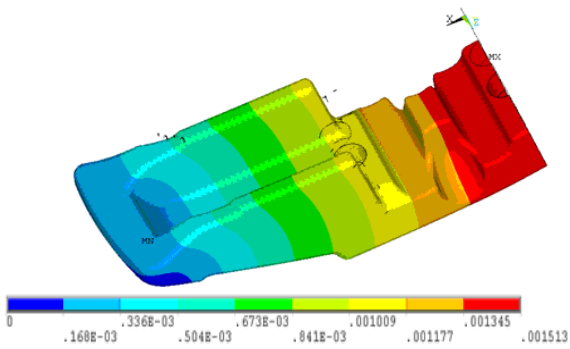


Рисунок 38 – Діаграма розподілу переміщень шкребка I під дією навантаження 10т у площині, яка перпендикулярна руху ланцюга

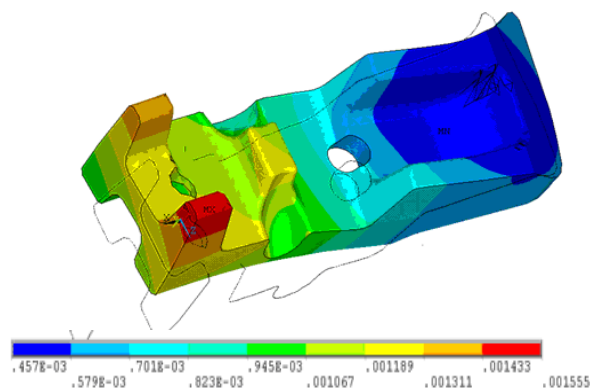


Рисунок 42 – Діаграма розподілу переміщень шкребка II під дією навантаження 35т у площині руху ланцюга, м

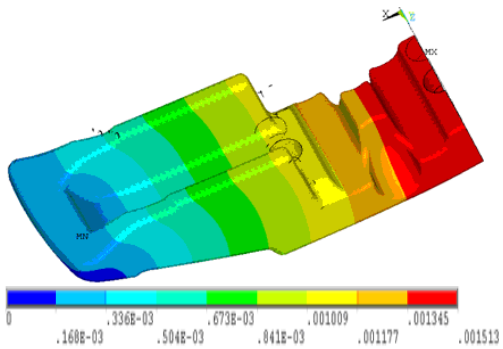


Рисунок 39 – Діаграма розподілу напружень шкребка I під дією навантаження 10т у площині, яка перпендикулярна руху ланцюга, Па

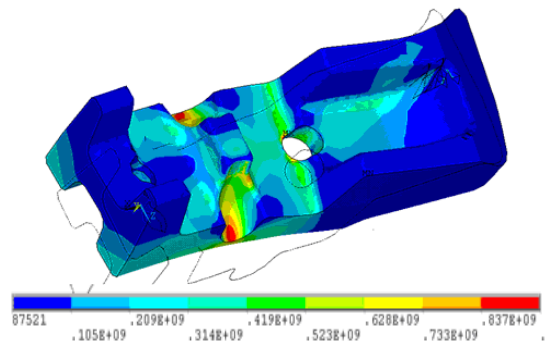


Рисунок 43 – Діаграма розподілу напружень шкребка II під дією навантаження 35т у площині руху ланцюга, Па

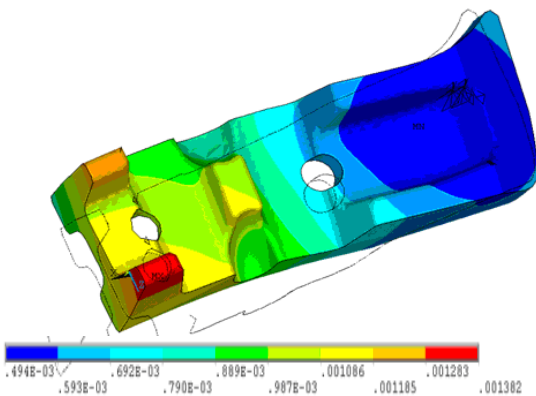


Рисунок 40 – Діаграма розподілу переміщень шкребка II під дією навантаження 30т у площині руху ланцюга, м

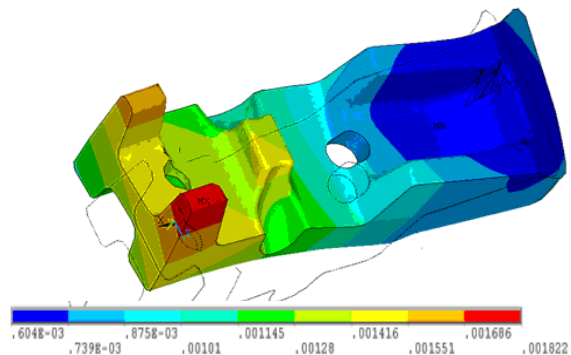


Рисунок 44 – Діаграма розподілу переміщень шкребка II під дією навантаження 40т у площині руху ланцюга, м

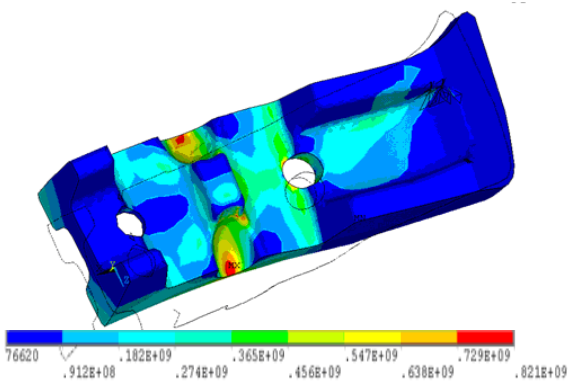


Рисунок 41 – Діаграма розподілу напружень шкребка II під дією навантаження 30т у площині руху ланцюга, Па

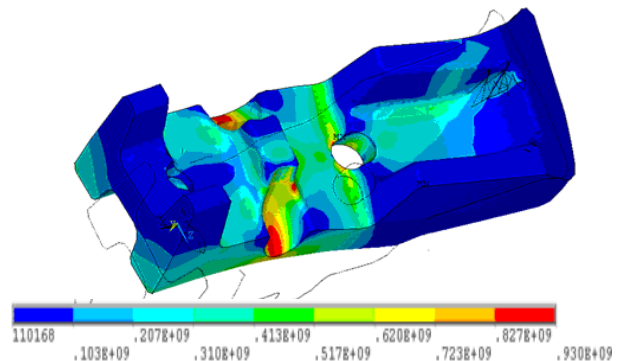


Рисунок 45 – Діаграма розподілу напружень шкребка II під дією навантаження 40т у площині руху ланцюга, Па

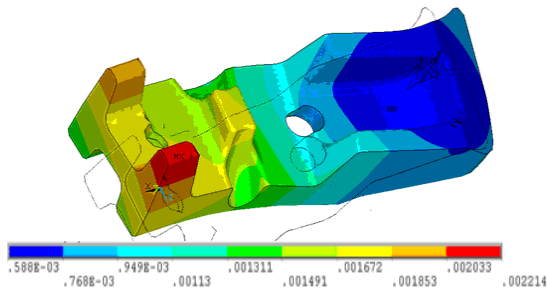


Рисунок 46 – Діаграма розподілу переміщень шкребка II під дією навантаження 50т у площині руху ланцюга, м

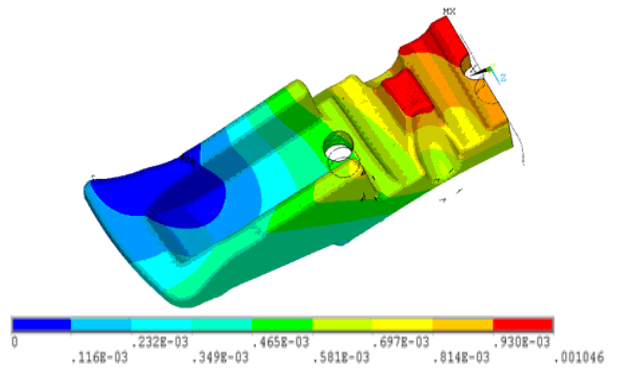


Рисунок 51 – Діаграма розподілу переміщень шкребка I під дією навантаження 30т у площині руху ланцюга, м

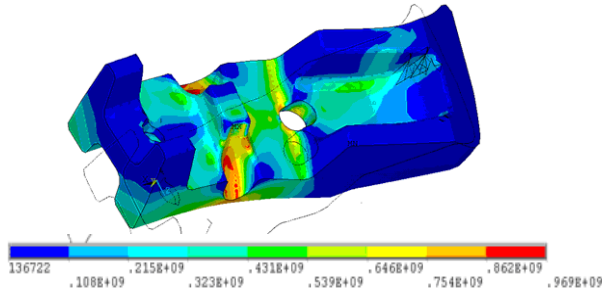


Рисунок 47 – Діаграма розподілу напружень шкребка II під дією навантаження 50т у площині руху ланцюга, Па

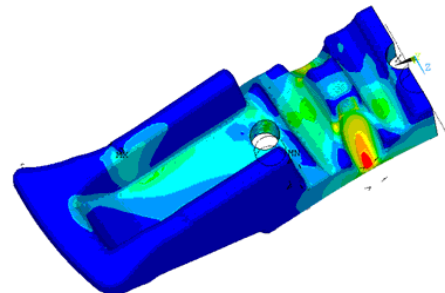


Рисунок 52 – Діаграма розподілу напружень шкребка I під дією навантаження 30т у площині руху ланцюга, Па

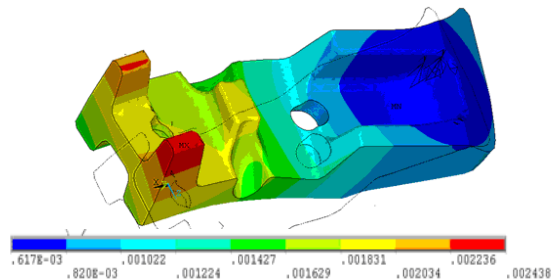


Рисунок 48 – Діаграма розподілу переміщень шкребка II під дією навантаження 55т у площині руху ланцюга, м



Рисунок 52 – Діаграма розподілу напружень шкребка I під дією навантаження 30т у площині руху ланцюга, Па

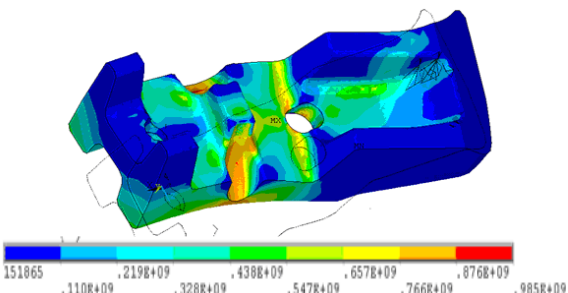


Рисунок 49 – Діаграма розподілу напружень шкребка II під дією навантаження 55т у площині руху ланцюга, Па

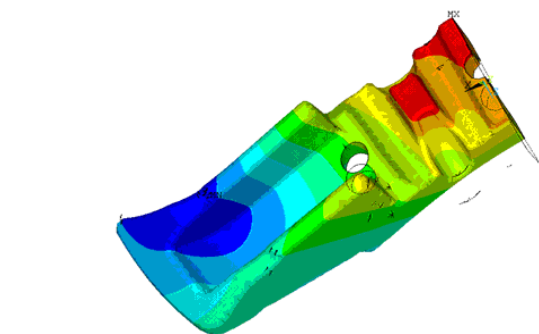


Рис. 53 – Діаграма розподілу переміщень шкребка I під дією навантаження 40т у площині руху ланцюга, м

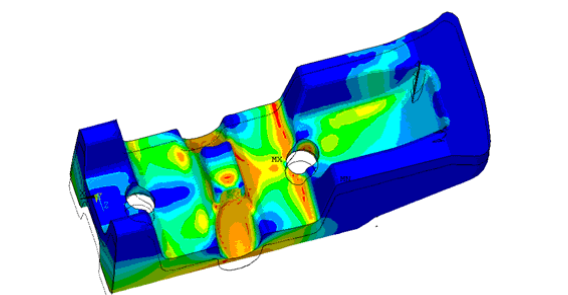


Рисунок 50 – Діаграма розподілу напружень шкребка II під дією навантаження 70т у площині руху ланцюга, Па

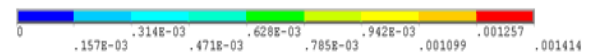


Рис. 54 – Діаграма розподілу напружень шкребка I під дією навантаження 40т у площині руху ланцюга, Па

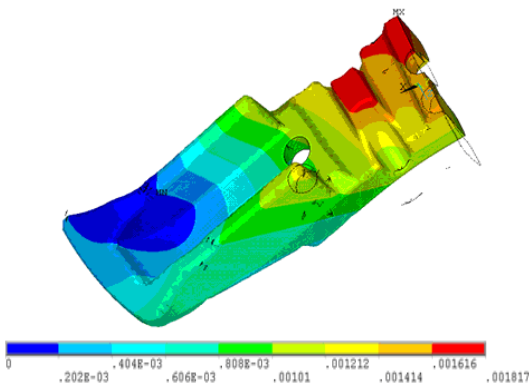


Рисунок 55 – Діаграма розподілу переміщень шкребка I під дією навантаження 50т у площині руху ланцюга, м

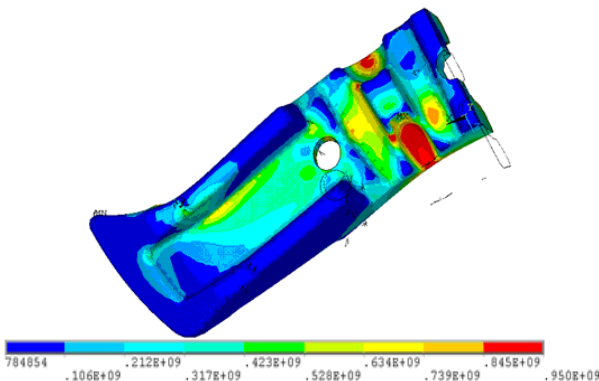


Рис. 56 – Діаграма розподілу напружень шкребка I під дією навантаження 50т у площині руху ланцюга, Па

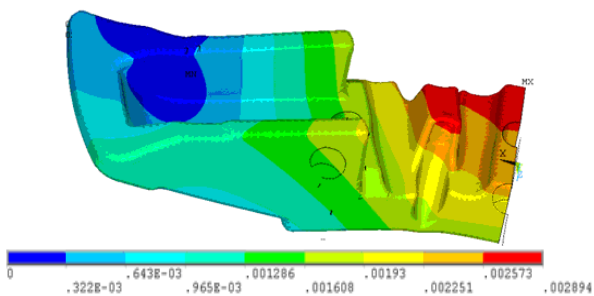


Рисунок 57 – Діаграма розподілу переміщень шкребка I під дією навантаження 70т у площині руху ланцюга, м

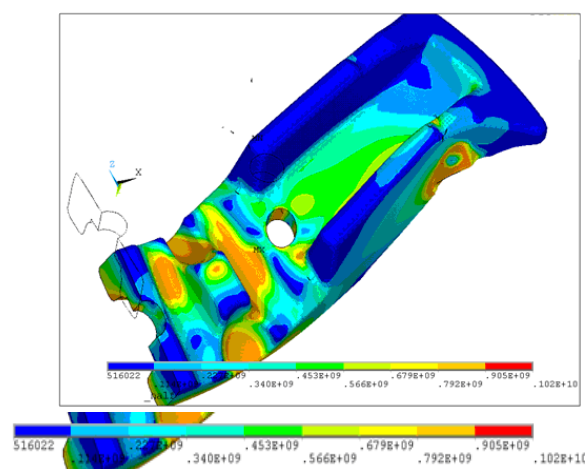


Рисунок 58 – Діаграма розподілу напружень шкребка I під дією навантаження 70т у площині руху ланцюга, Па

Аналіз результатів. На рис. 59 наведена підсумкова інформація про міцність шкребків шахтових конвеєрів (варіанти «I» та «II»). Ці дані є основою для обґрунтування тих чи інших технічних рішень шкребків.

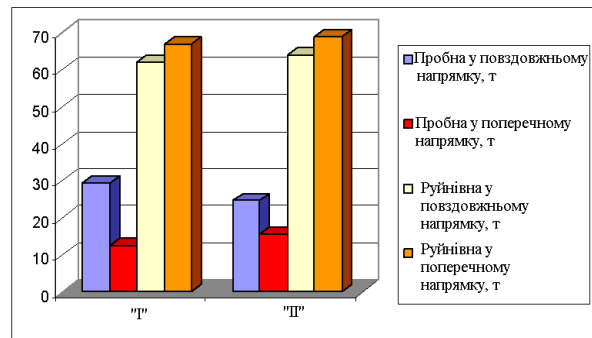


Рисунок 59 – Підсумкова інформація про міцність шкребків шахтових конвеєрів

Висновки. Результатами роботи є:

1) схема побудови розрахункових моделей елементів складних механічних систем на базі інтегрованих технологій досліджень напружено-деформованого стану та узагальненого параметричного підходу;

2) схема обміну інформацією між програмними модулями;

3) методи, алгоритми та програмне забезпечення для побудови розрахункових моделей, а також апробація запропонованої технології на конкретних задачах. При цьому на конкретних прикладах продемонстрована ефективність розробленого підходу, методу, моделей та програмних засобів досліджень.

Отримані результати дають можливість продовжити дослідження із обґрунтування прогресивних технічних рішень досліджуваних об'єктів. Крім того, отримані при розрахунках дані можуть бути використані для порівняння з результатами експериментів.

Список літератури

1. Zienkiewicz O.C., Taylor L.R. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th Edition. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
2. Литвиненко А. В. , Шейченко Р. И. , Граборов Р. В. , Бондаренко М. А. Метод линеаризации поверхности отклика в задаче обоснования проектных параметров тонкостенных элементов машиностроительных конструкций. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ». 2014. № 31. С. 88–99.
3. Бондаренко М. А. , Шейченко Р. И. , Граборов Р. В. , Шинкин Д. Г. , Киричук Д. В. Билинеаризация поверхности отклика в оптимизационных исследованиях тонкостенных элементов машиностроительных конструкций. та машинобудування. 2014. № 1. С. 18–23.
4. Мартиненко О. В. , Веретельник О. В. , Танченко А. Ю. , Чубань М. О. , Литвиненко О. В. Вплив проектно-технологічних параметрів на міцність та динамічні характеристики тонкостінних конструкцій. Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки: Тези доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції. Київ, Вид. дім Дмитра Бурого, 2015. С. 154–155.
5. Чубань М. А. Аппроксимация поверхности отклика для

- использования в процессе параметрического синтеза машиностроительных конструкций. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ». 2015. №43. С. 161–164.
6. Чубань М. А., Шейченко Р. И., Граборов Р. В. Модели аппроксимации поверхности отклика в оптимизационных исследованиях машиностроительных конструкций. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ». 2015. № 62. С. 46–51.
 7. Бондаренко М. О. Методи оптимізації із застосуванням поверхонь відгуку, адаптовані до розв'язання задач аналізу та синтезу конструктивних параметрів тонкостінних машинобудівних конструкцій. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ». 2016. № 42. С. 22–28.
 8. Бондаренко М.А. Линеаризация и билинеаризация поверхности отклика в случае нелинейного поведения оптимизируемых конструкций. Механіка та машинобудування. 2017. №1. С. 32–37.
 9. Tkachuk M., Bondarenko M., Grabovskiy A., Vasiliev A., Sheychenko R., Graborov R., Posohov V., Lunyov E., Nabokov A. Thin-walled structures: analysis of the stressed-strained state and parameter validation. Східно-Європейський журнал передових технологій. Харків: УДАЗТ. 2018. 1/7 (91). С. 18–29.
 10. Ткачук Н. А., Гриценко Г. Д., Чепурной А. Д., Орлов Е. А., Ткачук Н. Н. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания. Механіка та машинобудування. 2006, №1, с.57–79.
 11. Tkachuk M. A Numerical Method for Axisymmetric Adhesive Contact Based on Kalker's Variational Principle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, no. 3/7(93), pp. 34–41.
 12. Tkachuk M.M., Skripchenko N. B., Tkachuk M. A., Grabovskiy A. V. Numerical Methods for Contact Analysis of Complex-Shaped Bodies with Account for Non-Linear Interface Layers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, no. 5/7(95), pp. 22–31.
 13. Atroshenko O., Tkachuk M., Martynenko O., Tkachuk M., Saverska M., Hrechka I., Khovansky S. The study of multi-component loading effect on thin-walled structures with bolted connections. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, no. 1/7 (97), pp. 15–25.
4. Martynenko O. V., Veretel'nyk O. V., Tanchenko A. Yu., Chuban' M. O., Ly'tvy'nenko O. V. Vplyv proektno-technologichny'x parametrov na mizchnist' ta dy'namicni karaktery'sty'ky' tonkostinny'x konstrukcij. [Putting on design-technological parameters on the structure and dynamical characteristics of thin-walled constructions]. *Problemi py'tannya rozvy'tku ozbroynnyia ta vijs'kovoyi tekhniki: Tezy' dopovidej VI mizhnarodnoyi naukovo-prakty'chnoyi konferenciyi. Ky'iv, Vy'd. dim Dmy'tra Burago*, 2015. pp. 154–155.
 5. Chuban' M. A. Approssimacija poverhnosti otklika dlja ispol'zovaniia v processe parametricheskogo sinteza mashinostroitel'nyh konstrukcij [Approximation of the response surface for use in the process of parametric synthesis of engineering structures]. *Visnyk Nacional'nogo texnichnogo universy'tetu «Kharkivs'kyj politexnichnyj insty'tut»*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2015, no. 43, pp. 161–164.
 6. Chuban' M. A., Sheychenko R. I., Graborov R. V. Modeli approssimacii poverhnosti otklika v optimizacionnyh issledovanijah mashinostroitel'nyh konstrukcij [Approximation models of the response surface in optimization studies of engineering structures]. *Visnyk Nacional'nogo texnichnogo universy'tetu «Kharkivs'kyj politexnichnyj insty'tut»*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2015, no. 62, pp. 46–51.
 7. Bondarenko M. O. Metody' opty'mizaciyi iz zastosuvannyam poverxon' vidguku, adaptovani do rozvyazannya zadach analizu ta sy'ntezu konstruktyvny'x parametrov tonkostinny'x mashynobudivny'x konstrukcij [Methods of optimization using response surfaces, adapted to the solution of problems of analysis and synthesis of structural parameters of thin-walled engineering constructions.]. *Visnyk Nacional'nogo texnichnogo universy'tetu «Kharkivs'kyj politexnichnyj insty'tut»*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2016, no. 42, pp. 22–28.
 8. Bondarenko M.A. Linearizacija i bilinearizacija poverhnosti otklika v sluchae nelinejnogo povedeniia optimiziruemyh konstrukcij [Linearization and bilinearization of the response surface in the case of nonlinear behavior of optimizable structures]. *Mexanika ta mashynobuduvannya*. 2017, no. 1, pp. 32–37.
 9. Tkachuk M., Bondarenko M., Grabovskiy A., Vasiliev A., Sheychenko R., Graborov R., Posohov V., Lunyov E., Nabokov A. Thin-walled structures: analysis of the stressed-strained state and parameter validation. *Sxidno-Yevropejs'kyj zhurnal peredovy'x tehnologij*. Xarkiv: UDAZT. 1/7 (91), pp. 18–29.
 10. Tkachuk N. A., Gricenko G. D., Chepurnoj A. D., Orlov E. A., Tkachuk N. N. Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnyh mehanicheskijh sistem: tehnologija avtomatizirovanoj genera-cii i parametrizovannogo opisaniia [Finite – element models of elements of complex mechanical systems: automated generation technology and parameterized description]. *Mexanika ta mashinobu-duvannya*. 2006, №1, pp. 57–79.
 11. Tkachuk M. A Numerical Method for Axisymmetric Adhesive Contact Based on Kalker's Variational Principle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, no. 3/7(93), pp. 34–41.
 12. Tkachuk M.M., Skripchenko N. B., Tkachuk M. A., Grabovskiy A. V. Numerical Methods for Contact Analysis of Complex-Shaped Bodies with Account for Non-Linear Interface Layers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, no. 5/7(95), pp. 22–31.
 13. Atroshenko O., Tkachuk M., Martynenko O., Tkachuk M., Saverska M., Hrechka I., Khovansky S. The study of multi-component loading effect on thin-walled structures with bolted connections. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, no. 1/7 (97), pp. 15–25.

References (transliterated):

1. Zienkiewicz O.C., Taylor L.R. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th Edition. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
 2. Litvinenko A. V., Sheychenko R. I., Graborov R. V., Bondarenko M. A. Metod linearizacii poverhnosti otklika v zadache obosnovaniia proektnykh parametrov tonkostennyh jelementov mashinostroitel'nyh konstrukcij [Method of linearization of the response surface in the problem of justifying the design parameters of thin-walled elements of engineering structures.]. *Visnyk Nacional'nogo texnichnogo universy'tetu «Kharkivs'kyj politexnichnyj insty'tut»*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2014, no. 31, pp. 88–99.
 3. Bondarenko M. A., Sheychenko R. I., Graborov R. V., Shinkin D. G., Kirichuk D. V. Bilinearizacija poverhnosti otklika v optimizacionnyh issledovanijah tonkostennyh jelementov mashinostroitel'nyh konstrukcij [Bilinearization of the response surface in optimization studies of thin-wall elements of machine-building structures]. *Mexanika ta mashynobuduvannya*. 2014, no. 1, pp. 18–23.
- Поступила (received) 09.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри

«Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; e-mail: tma@tmm-sapr.org

Кохановська Ольга Владиславівна (Кохановская Ольга Владиславовна, Kokhanovska Olga) – провідний інженер, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин»; м. Харків, Україна; тел.: (057)7076901; e-mail: olgavk12@gmail.com

Ткачук Ганна Володимирівна (Ткачук Анна Владимировна, Tkachuk Ganna) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Інформаційні технології та системи колісних і гусеничних машин ім. О.О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0435-1847>; e-mail: TkachuckAV@tmm-sapr.org

Зарубіна Алла Олександрівна (Зарубина Алла Олександрівна, Zarubina Alla) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3334-792X>; e-mail: zaralla8@gmail.com.

Храмцова Ірина Яківна (Храмцова Ирина Яковлевна, Khramtsova Iryna) – науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9506-790X>. тел.: (057)7076901; e-mail: iyakhram@gmail.com

Марусенко Світлана Іванівна (Марусенко Светлана Ивановна, Marusenko Svitlana Ivanivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1340-5491>; e-mail: svivmar@ukr.net

Мухін Дмитро Сергійович (Мухин Дмитрий Сергеевич, Mukhin Dmitriy) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; Харків, Україна; e-mail: s814@tmm-sapr.org

Куценко Сергій Володимирович (Куценко Сергей Владимирович, Kutsenko Serhii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна, e-mail: skutsenko@tmm-sapr.org