

## ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ МАШИН

Головна задача машинобудування полягає в організації виробництва спектру машин для забезпечення потреб всіх галузей промисловості. Це енергетичні, транспортні, підйомно-транспортні агрегати, машини сільськогосподарської, будівельної індустрії, тощо. Серед них можна виділити пристрої, в яких призначено здійснювати відносний рух однієї частини по відношенню до іншої, тобто до складу розрахункових моделей входять кінематичні пари. Реальні умови роботи машин різноманітні, але найчастіше пов'язані з періодичними пусками-зупинками, що зумовлює актуальність досліджень нестационарних режимів. Аналіз роботи таких моделей ускладнений. Для успішних результатів проектування проводиться математичне моделювання окремих процесів в механізмах. Одним з перших розрахунків є динамічний. Сучасні, доступні CAD/CAE системи моделювання та аналізу надають можливості автоматизації, побудови більш реалістичних розрахункових схем. В роботі розглядається апробація використання САПР для моделювання динаміки стрілового крана з набором чотирьох агрегатів: платформи, стріли, гільзи та штоку. Розроблена модель комбінована: платформа та гільза відповідають моделі кінетостатики, а стріла та шток пружні. Кран призначений здійснювати операції підйому вантажу у вертикальній площині, з можливостями відносного руху в 3-х обертальних та одній поступальній кінематичних парах. Проведені чисельні розрахунки статичного, модального та динамічного аналізу ланок механізму підтверджують адекватність їх моделей. Серед них задача миттєвого прикладання сили, яка характерна для режиму роботи "підйом з підхватом" механізмів підйому кранів. Розглянуто також деформування всієї конструкції в одному з положень стріли. Визначення реактивних сил в гідроциліндрі дає важливу інформацію для підбору силового агрегату.

**Ключові слова:** системи CAD/CAE моделювання, вантажопідйомні машини, динамічні процеси

Главная задача машиностроения состоит в организации производства спектра машин для обеспечения потребностей всех отраслей промышленности. Это энергетические, транспортные, подъемно-транспортные агрегаты, машины сельскохозяйственной, строительной индустрии, и т.д. Среди них можно выделить устройства, в которых назначено совершать относительное движение одной части по отношению к другой, то есть в состав расчетных моделей входят кинематические пары. Реальные условия работы машин разнообразны, но чаще всего связаны с периодическими пусками-остановками, что обуславливает актуальность исследования нестационарных режимов. Анализ работы таких моделей усложняется. Для успешных результатов проектирования проводится математическое моделирование отдельных процессов в механизмах. Одним из первых расчетов является динамический. Современные, доступные CAD/CAE системы моделирования и анализа дают возможности автоматизации, построения более реалистичных расчетных схем. В работе рассматривается апробация использования САПР к моделированию динамики стрелового крана с набором четырех агрегатов: платформы, стрелы, гильзы и штока. Разработанная модель комбинированная: платформа и гильза соответствуют модели кинетостатики, а стрела и шток упругие. Кран предназначен совершать операции подъема груза в вертикальной плоскости, с возможностями относительного движения в 3-х вращательных и одной поступательной кинематических парах. Проведенные расчеты статического, модального и динамического анализ звеньев механизма подтверждают адекватность их моделей. Среди них задача мгновенного приложения нагрузки, которая характерна для режима работы "подъем с подхватом" механизмов подъема кранов. Рассмотрено также деформирование всей конструкции в одном из положений стрелы. Определение реактивных сил в гидроцилиндре дает важную информацию для подбора силового агрегата.

**Ключевые слова:** системы CAD/CAE моделирования, грузоподъемные машины, динамические процессы

The main task of mechanical engineering is to organize the production of a range of machines to meet the needs of all industries. These are power, transport, lifting and transport units, agricultural machinery, construction industry, etc. Among them, one can single out devices in which the relative movement of their parts is assigned, that is, kinematic pairs are included in the calculation models. The real operating conditions of machines are varied, but most often they are associated with periodic starts-stops, which determines the relevance of the study of unsteady modes. The analysis of the operation of such models becomes more complicated. For successful design results, mathematical modeling of individual processes in mechanisms is carried out. One of the first calculations is dynamic. Modern, available CAD / CAE systems for modeling and analysis provide automation capabilities, building more realistic design models. The paper discusses the approbation of the use of CAD for modeling the dynamics of a jib crane with a set of four units: platform, boom, sleeve and rod. The developed model is combined: the platform and the sleeve correspond to the kinetostatic model, and the boom and rod are elastic. The crane is designed to perform lifting operations in a vertical plane, with the possibility of relative movement in 3 rotational and one translational kinematic pairs. The performed calculations of the static, modal and dynamic analyzes of the links of the mechanism confirm the adequacy of their models. Among them is the task of instantaneous load application, which is typical for the "lifting and picking" operating mode of crane lifting mechanisms. The deformation of the entire structure in one of the boom positions is also considered. The determination of the reaction forces in the hydraulic cylinder provides important information for the selection of the power unit.

**Keywords:** CAD / CAE modeling systems, hoisting machines, dynamic processes.

**Вступ.** Роль машинобудування є провідною, так як виробництво продукції, транспорт, будівництво, сільське господарство та інші тісно пов'язані з експлуатацією машин. Їх широкий спектр задіяний у виробничих процесах в різних галузях промисловості. Це енергетичні, транспортні, підйомно-транспортні (крани стрілові, козлові, порталні) і інші. Це машини авто-та залізничного призначення, будівельної та сільськогосподарської індустрії. До процесу виробництва долучається також різне устаткування, як то: верстати, автоматизовані лінії, навісні пристрої, агрегати.

Тенденція до збільшення об'ємів вантажно-розвантажувальних робіт вимагає прискорення процесів механізації та автоматизації таких операцій. Динамічно

розвивається автомобільний транспорт, залізничні перевезення, будівельна сфера. Тому задача створення нових перспективних машин, здатних забезпечити основні потреби сучасного виробництва є надзвичайно актуальною.

У промислово розвинених країнах на ці потреби витрачаються значні ресурси. На світовому ринку продукція машинобудування яскраво представлена здебільшого типово-розмірними рядами зразків сучасних машин різного призначення. І така продукція є затребуваною, має значний попит і перспективи на майбутнє. Відомі фірми західних країн (Німеччини, Канади, Фінляндії, Австрії та інших) спеціалізуються на випуску певних класів машин і вже завоювали "brand

names".

Процес створення сучасних машин складний. Але незважаючи на різноманіття конструктивних форм йому притаманні деякі характерні риси.

1. З позицій структурної класифікації ці пристрої різного призначення, різної будови, що розроблені для перетворення механічного руху, можуть бути розділеними на дві групи:

- пристрої, між складовими частинами моделей яких явно не розглядається відносний рух. До таких приводяться задачі статичного та динамічного деформування конструкцій енергетичних машин (турбоагрегати, ротори газотурбінних установок), крутильних деформацій трансмісійних машин, деформування споруд, тощо. Такі задачі добре розроблені, їм присвячена значна кількість публікацій;
- пристрої, складовим яких призначено явно здійснювати відносний рух однієї частини по відношенню до іншої. Це вантажопідйомні машини, сільськогосподарського призначення, дорожні, будівельні, маніпулятивні системи. Розрахункові моделі для них можуть бути представленими у вигляді простих або розгалужених просторових шарнірно-важільних кінематичних ланцюгів, в яких рухомі ланки з'єднані певними типами кінематичних пар. Моделювання процесів в таких системах ускладнено. Проте в ТММ, динаміці машин розроблені підходи, які можна використовувати для довільних механізмів.

2. У відповідності з принципом стандартизації та уніфікації та багаторічної практики для широкого кола силових установок використовується агрегатний спосіб їх компоновки. При цьому проектування, випробування агрегатів проводиться незалежно (ДВЗ, силові передачі, робочі машини, демпфери і інші). Має місце повторюваність, використання типових схем.

3. Механізм – це основа довільної машини. Розроблено їх чимало. Вони відрізняються типами, призначенням, принципами роботи. Разом з тим у кожному випадку виділяються їх базові складові вузли (кузови, рами, башти, мости, металоконструкції, роторні частини, компресори...), що мають певні функції. В свою чергу останні компонуються з певного набору типових елементів різних форм (балки, стійки, двотаври, пружини, зубчасті колеса, пластинки...). З метою зниження витрат металу, економії при експлуатації постійно впроваджуються нові перспективні форми конструкцій (замкнені коробчасті замість гратчастих; листові несучі контурні елементи; трубчасті профілі для башт, опор, стріл, що знаходяться в умовах стиснення; вигідними можуть бути прокатні, гнуті, зварені з них...).

Питання побудови конструктивних схем вантажопідйомних машин, енергетичних і інших розглядаються в багаточисельній літературі, підручниках, як то [1, 3, 4, 6, 16].

Природно складаються умови для моделювання складних систем за принципом від простих деталей до їх збірок в конструкції з можливістю врахування з'єднань типу кінематичних пар.

Умови роботи таких машин різноманітні та важкі. По перше, металоконструкції відносяться до габаритних несучих елементів машин, на виготовлення яких витрачаються значні об'єми металу. Тобто, впливають вага, динамічні збудження від роботи навісних пристроїв, агрегатів на різних режимах роботи. До підвищеної напруженості або руйнування приводять тривала експлуатація зі значними навантаженнями динамічного характеру, робота ударно-тягових пристроїв, значна швидкість обертання роторних елементів, яка може досягати порядків  $10^4$  об/хв., також нерівність дорожнього полотна, пориви вітру, розкачування вантажу на гнучких канатах. Нестационарний характер роботи з частими пусками-зупинками, повторно-зворотній характер рухів сприяють руйнуванням з активним розвитком тріщин, а надійність роботи металоконструкцій визначається витривалістю металу. Таким чином, складні коливальні процеси різної природи, та спричинений ними шум перешкоджають нормальній роботі.

Безпосередньо для створення образу машини запускається процес проектування. Його задача, зокрема, у виборі та обґрунтуванні структури та параметрів машини, які забезпечують її нормальну роботу. Це значні затрати праці, ресурсів, часу. Для успішних результатів проектування надзвичайно важливим є передбачення та усунення потенційно небезпечних загроз в роботі машин при експлуатації. З цією метою призначається математичне моделювання окремих процесів в них. Одним з перших розрахунків є визначення динамічної поведінки моделей, результати яких впливають на забезпечення надійності, зниження габаритів та металоемності. Значення таких розрахунків тільки зростає. Питання математичного моделювання динамічних процесів в машинах можна знайти в роботах [2,5,7-15] і інших.

Для визначення кінематичних характеристик, підбору двигунів використовують моделі кінестатики. Але врахування пружності дає можливість оцінити реальні навантаження на окремі ланки, кінематичні пари. Врахування реальної жорсткості устаткування є тим фактором, який впливає на точність операцій.

При цьому, з точки зору динамічної поведінки більш достовірні результати можна отримати якщо розглядати машинний агрегат як єдину динамічну систему, що складається з його механізмів, вузлів. Як приклад, пружна система верстатів активно взаємодіє з супортною частиною, приводом, з процесами різання. Складові ротор-корпус-підвіска авіаційних, автомобільних, судових установок взаємодіють як складні розгалужені ланцюги. Слід пам'ятати, що справжня постановка задачі динаміки машин потребує врахування впливу двигунів обмеженої потужності.

Алгоритми рішень поставлених так задач добре розроблені, дозволяють одержати практичні результати та виконати необхідний аналіз. При цьому широкого розповсюдження набув підхід з використанням дискретних моделей. Його головний недолік – це велика трудомісткість всіх операцій на кожному етапі, що обмежує мобільність досліджень. Проектування конструкцій з покращеними характеристиками потребує удосконалення існуючих методів моделювання.

Разом з тим успіхи розвитку інформаційно-обчислювальної техніки стрімкі. Розроблені сучасні, доступні CAD/CAE системи моделювання та аналізу здатні сприяти впровадженню передових технологій. Вони надають універсальні інструменти моделювання, сервісу. Використання подібних САПР для прогнозування поведінки машинних агрегатів, дає можливість побудови більш складних та реалістичних схем, які більш повно і точно моделюють їх роботу. При цьому автоматизація розрахунків дозволяє:

- суттєво зменшити трудомісткість;
- візуалізацію форм проектних рішень;
- оперативність та підтримку ітераційного характеру процесу.

Заключний етап рішення задачі один з найвідповідальніших – отримання чисельних результатів. Його не можна вважати простим. Виникають проблеми обчислювального характеру, які найчастіше пов'язані з конфліктами між обмеженнями рухів окремих агрегатів, деталей, що були закладені в побудованих CAD системами реалістичних компоновках. Кількість обмежень стрімко наростає при найменшому ускладненні конструкції. Як правило, перші спроби знайти результативні імітаційні рухи віртуальних моделей закінчуються невдало. Настає черга залагодження конфліктів між рішеннями системи нелінійних диференціальних рівнянь механіки руху та обмеженнями. Воно відбувається шляхом пошуку компромісів, згладжуванням "кутів", спрощенням обмежень.

CAD/CAE пакети – це лише інструменти, напрямок, можливості в реалізації повного моделювання, процедуру якого потрібно випробувати та удосконалювати в кожній конкретній задачі.

**1. Постановка задачі.** Таким чином, для успішного проектування зразків машин, необхідною складовою є побудова віртуальних схем та всебічне моделювання в режимах, наближених до експлуатаційних. Значні переваги в цьому процесі надає використання систем автоматизації розрахунків за допомогою CAD/CAE пакетів. На заводі можуть стати труднощі обчислювального характеру, якість реалізації операцій систем САПР, проблеми організаційного характеру.

Дана робота присвячена аналізу застосування систем САПР на прикладах моделювання динаміки машинних агрегатів в режимах наближених до експлуатаційних. Результати роботи носять характер апробації спроможностей РС. Проблема в цілому складна, дослідницька і потребує вирішення низки питань:

1. Визначення потрібної архітектури засобів

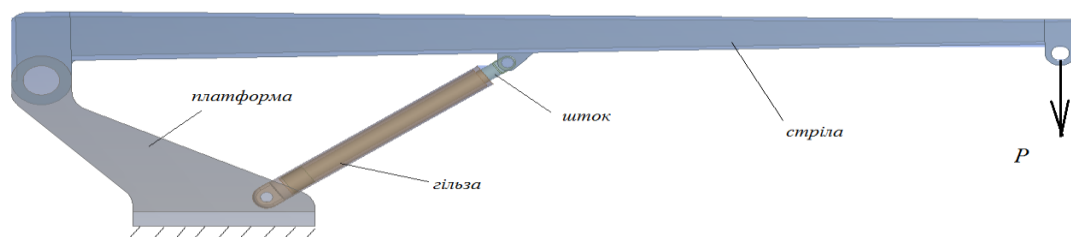


Рисунок 1 – Схема стрілового крану з набором чотирьох агрегатів: платформи, стріли, гільзи та штоку

автоматизації розрахунків, здатних забезпечити 3D моделювання, чисельне рішення рівнянь руху, візуальне супроводження та інформаційне обслуговування.

2. Розробка віртуальної моделі типової вантажопідійомної машини (як єдиної динамічної) засобами комп'ютерного моделювання, з характерними типами з'єднань вузлів.

3. Оцінка спроможності вирішення поставлених задач по результатам імітаційного моделювання.

Цілями роботи являються також напрацювання віртуальних схем окремих вузлів машини (з точки зору як моделей кінестатики так і пружних), характеру їх взаємодії, набуття досвіду.

Надалі для аналізу в роботі поставлені задачі:

- CAD-моделювання агрегатів крану та збірка їх в конструкцію засобами SolidWorks;
- імпортування моделі в середовище Design Modeler ANSYSWorkbench;
- дослідження статичного, модального та динамічного аналізу як окремих ланок так і всієї конструкції (як єдиною динамічною), з використанням як моделі кінестатики так і врахуванням пружності ланок;
- в модельних задачах виконати порівняльний аналіз чисельних та аналітичних результатів; з використанням різних CE сіток.

Для реалізації задач прийнята інтеграція можливостей САПР SolidWorks і ANSYSWorkbench. Це успішні, зручні платформи для реалізації концепції проектування виробів на основі результатів інженерних розрахунків. Значна частина поставлених задач забезпечується можливостями цих потужних середовищ:

- моделювання як окремих деталей так і вузлів, збірок в цілому, з урахуванням рухомості з'єднань; можливостями їх імпортування;
- створення реалістичних моделей та їх зручним модифікуванням на різних стадіях аналізу;
- можливостями завдання граничних умов, обмежень, навантажень та багато іншого.

В якості тестового прикладу розглянута модельна задача роботи стрілового крану з набором чотирьох агрегатів: платформи, стріли, гільзи та штоку. Кран призначений здійснювати операції підйому вантажу у вертикальній площині, з можливостями відносного руху в 3-х обертальних та поступальній кінематичних парах (платформа-стріла, платформа-гідроциліндр, стріла-шток та рух штоку в гільзі).

Платформа вважається закріпленою в основі, а стріла навантаженою зусиллям  $P$ , яке може змінюватись по певній програмі. Немає проблем з врахуванням ваги конструкції. Припускається, що гідроциліндр забезпечений потрібним тиском для рівноважної роботи машини. При успішному вирішенні поставлених так задач відкривається можливість визначення:

- напружено-деформованого стану металоконструкції стріли і платформи та пов'язане з цим зменшення металоемності;
- визначення залежності параметрів НДС від висоти підйому стріли;
- силового навантаження складових гідроциліндра для підбору силового агрегату;
- реакцій в опорі та кінематичних парах;
- моделювання роботи механізму на різних режимах підйому, в тому числі з врахуванням розкачування вантажу на канатах.

**2. Розробка 3D моделі вантажопідіймного механізму.** Побудова моделі була розпочата з використання CAD системи SolidWorks. Вся конструкція представлена у вигляді чотирьох основних агрегатів: платформи, стріли, гільзи циліндра та штоку. Використовуючи механізм побудови "Деталь" створені моделі цих агрегатів. Залучено такі стандартні операції пакету як побудова ескізу, витягнута бобишка. Фрагменти побудови моделі стріли приведені на рисунках.

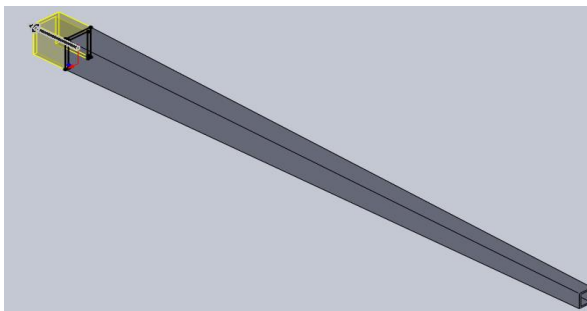


Рисунок 2 – Видовження перерізу

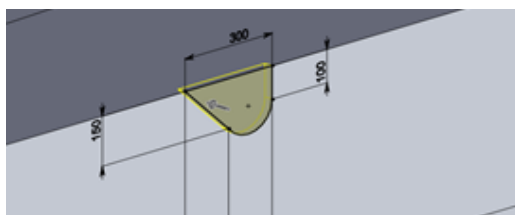
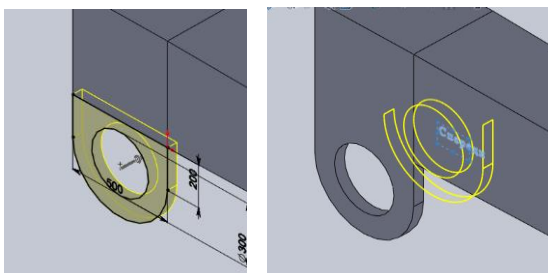


Рисунок 3 – Елементи кріплення Стріли

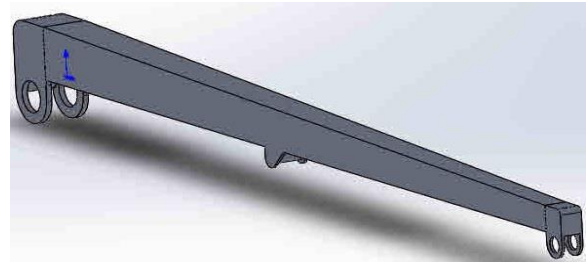


Рисунок 4 – 3D модель Стріли крану

Використовуючи універсальні інструменти моделювання, сервісу побудовані достатньо складні та реалістичні агрегати платформи та гідроциліндру.

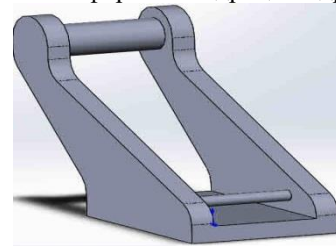


Рисунок 5 – Модель Платформа

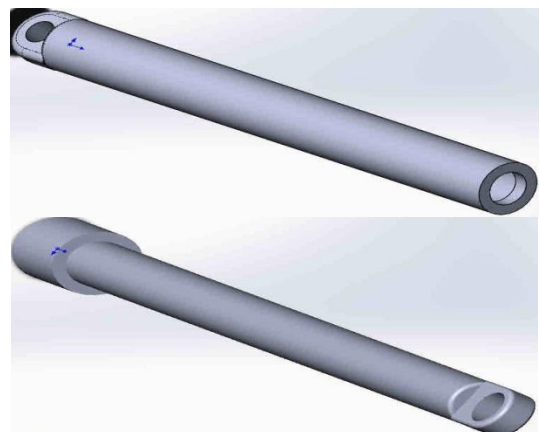


Рисунок 6 – Гільза та Шток з поршнем

Після формування агрегатів було створено їх об'єднання в один механізм (рис. 7). Для цього платформу було зафіксовано, додано обмеження «концентричність» та «відстань між об'єктами», між вухком стріли та верхньою віссю платформи, між вухком гільзи та нижньою віссю платформи, між гільзою гідроциліндру та його штоком, між віссю вухка стріли та вухком штока.

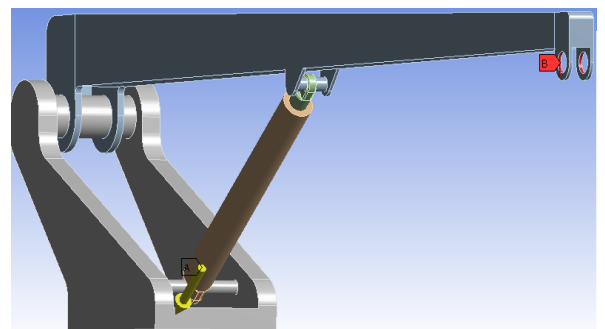


Рисунок 7 – Модель стрілового крану

Накладені обмеження формують чотири кінематичні пари на взаємний рух агрегатів крану. Безумовно, CAD дозволяє побудову більш детального зображення елементів конструкції. Але при цьому потрібно мати на увазі, по-перше, що на даному етапі прийнята схема достатньо відображає характер режимів роботи; а по-друге, що головніше, надалі потрібно буде проводити чисельні дослідження, і завжди в таких випадках постають питання чи можливо знайти рішення для прийнятих схем з наведеною кількістю обмежень.

Таке дослідження можливо провести в Design Modeler ANSYSWorkbench. Тому наступний крок пов'язаний саме з імпортуванням моделі в це середовище.

**3. Статичний, модальний та динамічний аналіз поведінки спрощеної моделі балки-стріли.** Для тестування розрахунків в САЕ ANSYS Workbench розглянуто тестовий приклад консольної балки замкнутого профілю, параметри якої характерні для стріли крана (рис.8).

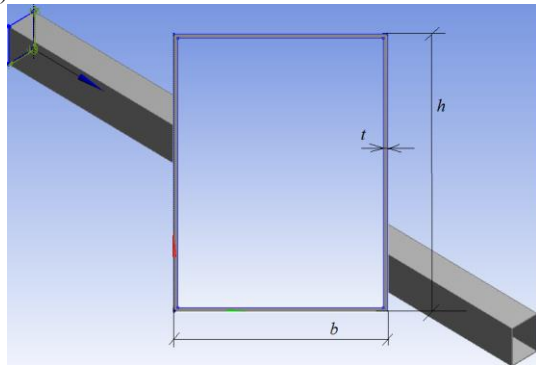


Рисунок 8 – Модельний приклад балки-стріли

Прийнято:

E, Па	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	b, м	h, м	t, м	P, Н
$2e^{11}$	7850	0.4	0.5	0.008	$10e^4$

При обчисленнях використовувались різні скінченно-елементні моделі.

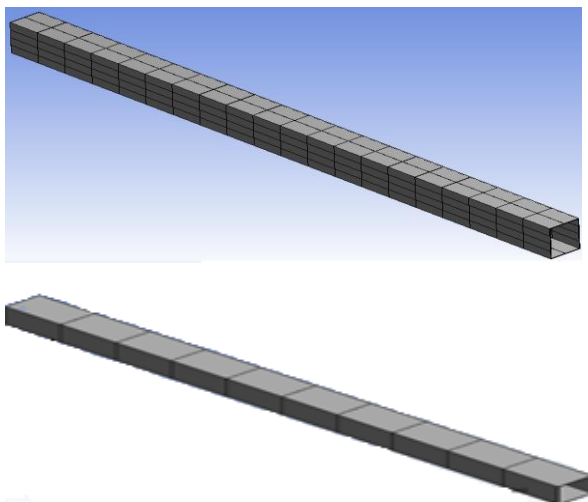


Рисунок 9 – Модель з об'ємним та стержневим СЕ

**3.1. Статичний аналіз згинання балки.** Вибраний модельний приклад допускає просте аналітичне рішення опору матеріалів.



$$y_{\text{стат}} = \frac{PL^3}{3EI} = 15,85 \text{ мм.}$$

Результати розрахунків на РС з використанням стержневого СЕ приведені на рис 10.

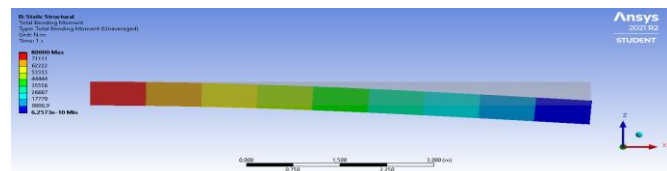
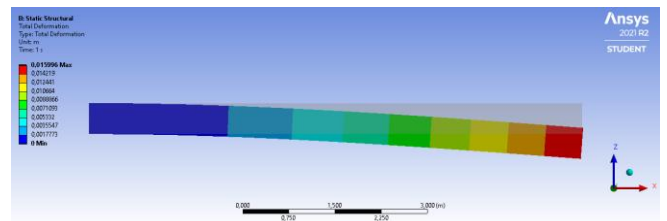


Рисунок 10 – Епюри переміщень та моменту  
Максимальний прогин: 15.99 мм.  
Максимальний момент: 80000 Н·м.

Для об'ємного елемента результати на рис.11.

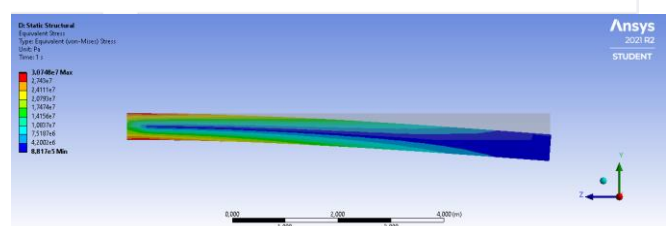
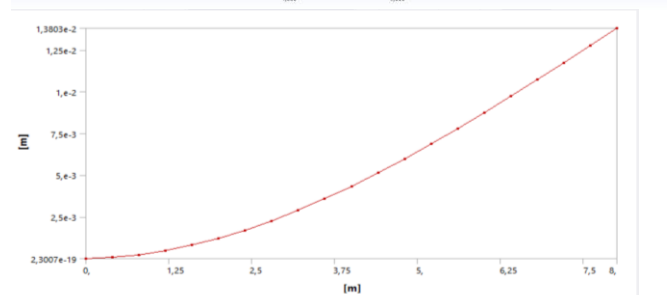
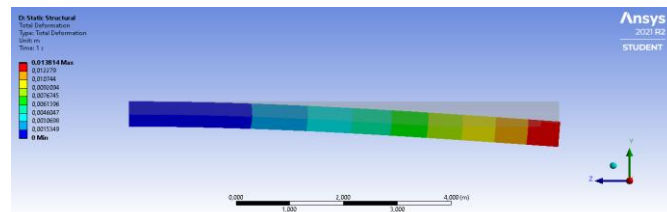


Рисунок 11 – Епюри переміщень та еквівалентних напружень для об'ємного СЕ

Порівняння значень максимального прогину балки отриманих аналітично та чисельно з різними типами скінченних елементів наведено у таблиці.

Таблиця 1 – Порівняння рішень для різних моделей

№	аналіт	beam188	solid186	solid185
у, мм	15.85	15.99	16.86	13.81

В цілому для узгоджених типів SE результати інженерних розрахунків НДС та їх якісна картина розподілу добре співпадають з аналітичними.

**3.2. Частотний аналіз балки.** Для вибраного консольного стержня з розподіленими параметрами також відомі аналітичні значення нижньої частини спектру згинальних коливань. Їх можна записати так:

$$\omega_i = \left(\frac{s_i}{l}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho F}}; \quad s_i = \{1.875, 4.694, 7.855, 10.996\}.$$

$$F = 2t(b+h-2t); \quad I = [bh^3 - (b-2t) \cdot (h-2t)^3] / 12.$$

Для чисельного моделювання в ANSYS-Workbench було створено проект з аналізом «Modal». Обчислено спектр частот та форм. Порівняльні результати частот наведені в таблиці 2, а перші форми коливань – на рис.12.

Таблиця 2 – Порівняння значень власних частот для різних моделей

№	аналіт	beam188 , 10 елем	beam188 , 20 елем	solid185
$\omega_{1y}$ , Гц	7.26	7.20	7.22	7.27
$\omega_{1z}$ , Гц	8.61	8.54	8.55	8.62
$\omega_{2y}$ , Гц	45.50	43.12	43.33	44.12
$\omega_{2z}$ , Гц	54.0	50.98	51.11	51.96
$\omega_{кр}$ , Гц	-	84.26	84.23	96.42
$\omega_{3y}$ , Гц	127.42	113.25	115.21	117.9
$\omega_{3z}$ , Гц	151.13	133.46	139.46	137.81

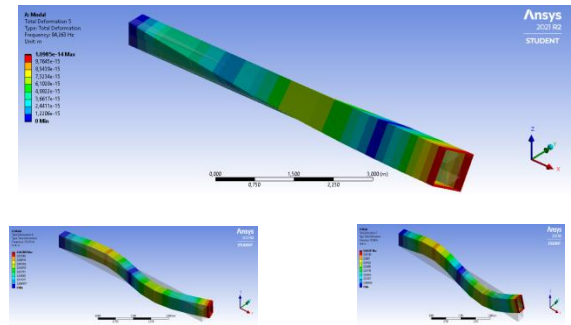
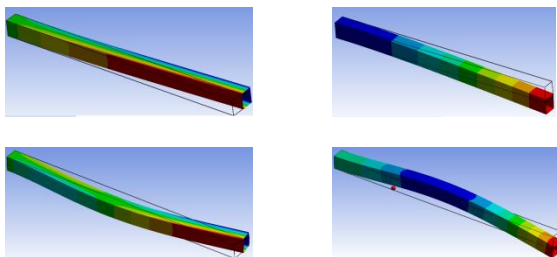


Рисунок 12 – Форми коливань

**Висновок:** спектр частот металоконструкції розглянутої форми, загалом, адекватно визначається апроксимаціями скінченних елементів.

**3.3. Динамічний аналіз.** Апробація дослідження нестационарної поведінки нерухомої на старті металоконструкції була виконана для режиму миттєвого прикладання навантаження. Розглянемо відоме аналітичне рішення задачі, зображеної на рисунку, коли програма навантаження задається графіком.



Рівень коливань, знайдений аналітично, характеризується подвоєним коефіцієнтом динамічності і має вигляд:

$$y(t) = y_{\text{стат}} \cdot (1 - \cos \omega t),$$

$$u_{\text{дин}} = 2u_{\text{стат}} = 31.70 \text{ мм}.$$

Для чисельного рішення в цьому випадку навантаження в ANSYSWorkbench було створено проект з аналізом «Model».

Програма дії сили задана так, як на рис.13. Вона включає інтервал наростання сили до  $10e4$  Н від 0 до 0.01с а потім діє на протязі 0.2с.

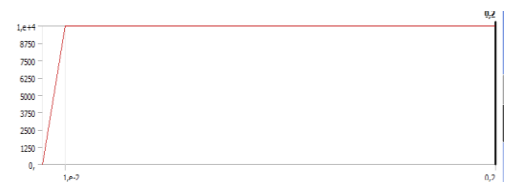


Рисунок 13 – Режим дії сили на консолі балки-стріли

Такий характер навантаження цілком відповідає сценарію динамічного режиму "підйом з підхватом" в механізмах підйому кранів при виборі послаблень в канатах. Заданого інтервалу спостережень також достатньо, так як період основної гармоніки згинальних коливань у вертикальній площині в декілька разів менше. Аналіз результатів моделювання в цьому режимі наведений нижче.

На рис.14 показані графіки кривої переміщень у кутовій точці, та реактивної сили в заземленні. Горизонтальна пунктирна лінія на них відповідає результатам статичного деформування.

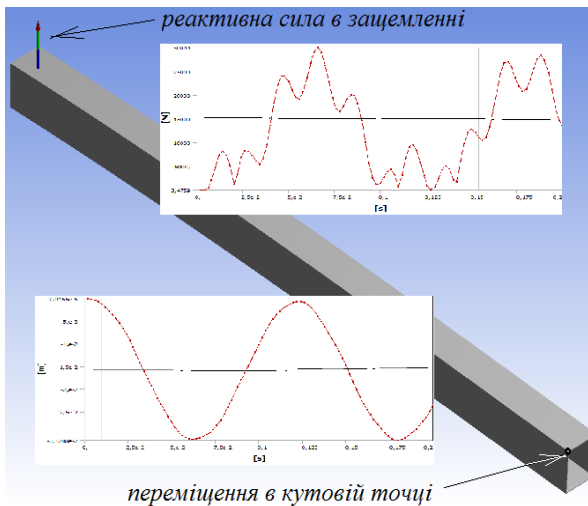


Рисунок 14 – Складові динамічного процесу на консольному краї та в заземленні

Видно, що максимальні динамічні значення майже вдвічі перевищують статичні показники, що добре узгоджується з аналітичними результатами спрощеної моделі. Відмінності, безумовно, є. Наприклад, динамічна активність в заземленні виявилась двочастотною та іншої. Динамічна крива прогину балки-стріли в кінці інтервалу по формі мало відрізняється від статичної.

**4. Приклади деформування елементів механізму, при взаємодії їх в складі конструкції.** В роботі були розглянуті окремі розрахунки деформування моделі всієї конструкції крана як єдиної динамічної системи. Для таких розрахунків є можливість формувати як моделі кінестатики так і гібридні з врахуванням пружності окремих ланок. Ці можливості надають САПР. Доцільною є модель з раціональним співвідношенням між інженерною точністю, затратами часу та об'ємом оперативної пам'яті РС. Зокрема, використовувалась SE-модель, в якій пружними приймалися стріла та штоки. На рис.15 приведена одна з таких SE моделей.

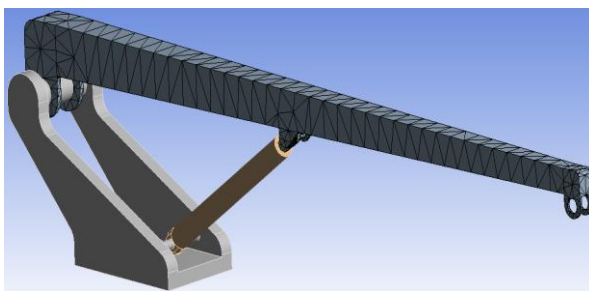


Рисунок 15 – SE- модель крана з пружною стрілою та штоком

Побудована модель механізму допускає взаємний відносний рух в чотирьох кінематичних парах, що забезпечує мобільність при підйомі вантажу.



Рисунок 16 – Різні положення стріли при ході штоку в гідроциліндрі

• В якості прикладу наведені результати НДС стріли, яка перебуває в складі крана. При цьому шток було жорстко зафіксовано в циліндрі. Така модель дозволяє визначити реакцію – силу опору в гідроциліндрі, як важливу інформацію при підборі силового агрегату.

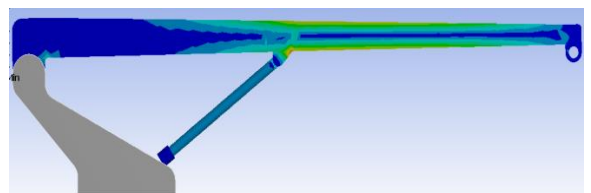
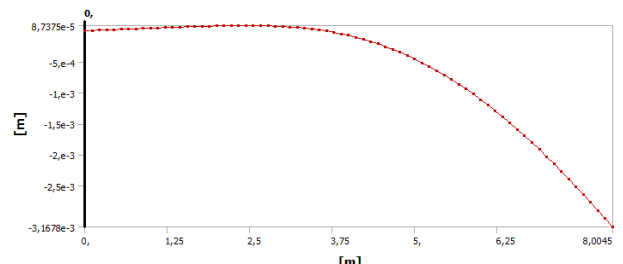
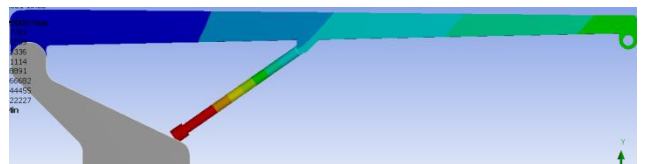
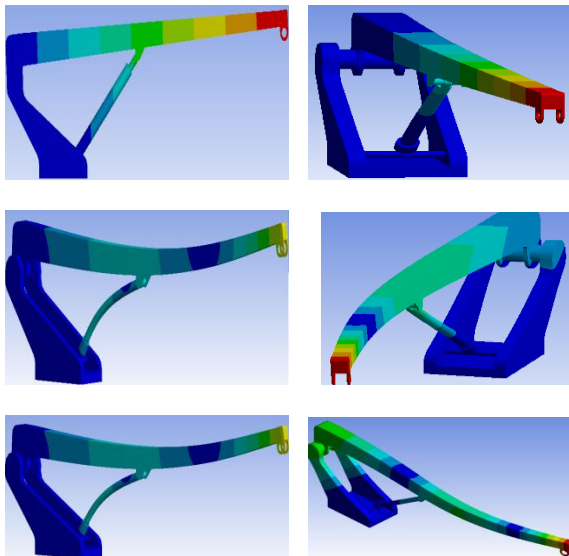


Рисунок 17 – Переміщення та еквівалентні напруження при статичному деформуванні всього крана.

Максимальний прогин : 3.17 мм.  
Максимальні напруження : 13.6 МПа.  
Сила опору в штоці : 41055 Н.

• Проведені розрахунки спектра частот-форм власних коливань крана при горизонтальному положенні стріли та незакріпленому штоку.

Mode	1	2	3	4	5	6
Hz	0	7.00	22.02	24.50	26.19	43.89



При більш детальному аналізі нестационарного руху крана виникали проблеми обчислювального характеру, які в основному були пов'язані з конфліктами між чисельним рішенням системи нелінійних диференціальних рівнянь та заданими обмеженнями між агрегатами при підніманні стріли. Для усунення таких конфліктів, можливо, знадобиться перебудова імітаційної моделі.

**5. Висновки.** Загалом по результатам проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

- комп'ютерні системи дають можливість по-новому ставити та вирішувати задачі динамічної поведінки машинних агрегатів в умовах більш реалістичних до експлуатаційних;
- САД-системи успішно працюють та здатні забезпечити побудову 3D віртуальних моделей практично необхідних в інженерній практиці деталей та агрегатів;
- чисельні підходи МСЕ при варіюванні типами СЕ надають реалістичні сценарії поведінки машин;
- потрібна подальша апробація в напрямку ускладнення моделей та умов їх роботи.

#### Список літератури

1. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины: учебник для вузов/ М.П.Александров.-М.:Высшая школа, 1985.-520с.
2. Вибрации в технике: Справочник.т.3. Колебания машин конструкций и их элементов/ Под ред. Ф.М.Диментберга, К.С.Колесникова. М.: Машиностроение, 1980, 544с.
3. Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин/ М.М.Гохберг.-Л: Машиностроение, 1976.-456с.
4. Жирицкий Г.С., Стрункин В.А. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин. -М.: Машиностроение, 1968.-520с.
5. Зуева Е.П. Автоматизация проектирования консольных стационарных кранов: дис. канд.техн.наук: 05.13.12/ Е.П.Зуева.-Брянск: Брянский гос.-тех.ун-т, 2007.-242с.
6. Иванченко Ф.К. Конструкция и расчет подъемно-транспортных машин: учебник для вузов/ Ф.К.Иванченко.-Киев: Вища школа, 1988.-424с.
7. Казак С.А. Динамика мостовых кранов./С.А.Казак.-М.: Машиностроение, 1968.-332с.
8. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин./М.С.Комаров.-Киев: Mashgiz, 1962.-267с.
9. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов./Н.А.Лобов.-М.:

Машиностроение, 1987.-160с.

10. Solidworks. Компьютерное моделирование в инженерной практике/ А.А.Алямовский, А.А.Собачкин, Е.В.Одинцов, А.М.Харитонович, Н.Б.Пономарев.-СПб.: БХВ-Петербург, 2006.-799с.
11. Сухарев Э.А. Основы динамики подъемно-транспортных и дорожно-строительных машин: Учебное пособие.-Ровно: НУВХП, 2012.-191с.
12. Щербак В.С. Система автоматизированного моделирования стрелового грузоподъемного крана/ В.С.Щербак, С.А.Зырянова, М.С.Корытов; СибАДИ.-Омск: СибАДИ, 2009.-104с.
13. Akhtulov A. L. Building the automation system for designing load-lifting cranes of bridge Type // European Science and Technology: materials of the XVII International research and practice conference, June 7th–8th, 2017. Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2017. p. 29–35.
14. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Titenko V. V. Analytical solution of the problem of acceleration of cargo by a bridge crane with constant acceleration at elimination of swings of a cargo rope // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. no. 1. p. 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012062.
15. Shcherbakov V., Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane//Applied Mechanics and Materials. 2014.vol.701-702.p.715-720.
16. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника.М.:Мир,1990, 527с.

#### References (transliterated)

1. Aleksandrov M.P. Pod"emno-transportnye mashiny: uchebnik dlja vuzov/ M.P.Aleksandrov.-M.:Vysshaja shkola, 1985.-520s.
2. Vibracii v tehnikе: Spravochnik.t.3. Kolebanija mashin konstrukcij i ih jelementov/ Pod red. F.M.Dimentberga, K.S.Kolesnikova. M.: Mashinostroenie, 1980, 544s.
3. Gohberg M.M. Metallicheskie konstrukcii pod"emno-transportnyh mashin/ M.M.Gohberg.-L: Mashinostroenie, 1976.-456s.
4. Zhirickij G.S.,Strunkin V.A. Konstrukcija i raschet naпрочnost' detalej parovyh i gazovyh turbin. -M.: Mashinostroe-nie, 1968.-520s.
5. Zueva E.P. Avtomatizacija proektirovanija konsol'nyh stacionarnykh kranov: dis. kand.tehn.nauk: 05.13.12/ E.P.Zueva.-Brjansk: Brjanskij gos.-teh.un-t, 2007.-242s.
6. Ivanchenko F.K. Konstrukcija i raschet pod"emno-transportnyh mashin: uchebnik dlja vuzov/ F.K.Ivanchenko.-Kiev: Vishha shkola, 1988.-424s.
7. Kazak S.A. Dinamika mostovykh kranov./S.A.Kazak.-M.: Mashinostroenie, 1968.-332s.
8. Komarov M.S. Dinamika gruzopod"emnyh ma-shin./M.S.Komarov.-Kiev: Mashgiz, 1962.-267s.
9. Lobov N.A. Dinamika gruzopod"emnyh kranov./N.A.Lobov.-M.: Mashinostroenie, 1987.-160s.
10. Solidworks. Komp'juternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike/ A.A.Aljamovskij, A.A.Sobachkin, E.V.Odincov, A.M.Haritonovich, N.B.Ponomarev.-SPb.: BHV-Peterburg, 2006.-799s.
11. Suharev Je.A. Osnovy dinamiki pod"emno-transportnyh i dorozhno-stroitel'nyh mashin: Uchebnoe posobie.-Rovno: NUVHP, 2012.-191s.
12. Shherbakov V.S.Sistema avtomatizirovannogo modelirovanija strelovogo gruzopod"emnogo kрана/ V.S.Shherbakov, S.A.Zyrjanova, M.S.Korytov; SibADI.-Omsk: SibADI, 2009.-104s.
13. Akhtulov A. L. Building the automation system for designing load-lifting cranes of bridge Type // European Science and Technology: materials of the XVII International research and practice conference, June 7th–8th, 2017. Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2017. r. 29–35.
14. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Titenko V. V. Analytical solution of the problem of acceleration of cargo by a bridge crane with constant acceleration at elimination of swings of a cargo rope // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. no. 1. p. 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012062.
15. Shcherbakov V., Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane//Applied Mechanics and Materials. 2014.vol.701-702.p.715-720.
16. Fu K., Gonsales R., Li K. Robototekhnika.M.:Mir,1990, 527s.

Надійшла (received)



*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Грищенко Володимир Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри динаміки та міцності машин, Національний технічний університет«ХПІ»;м. Харків;тел.: (057) 707 68 79. E-mail: [grivn\\_dmm@ukr.net](mailto:grivn_dmm@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8880-0982>.

**Грищенко Владимир Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры динамики и прочности машин, Национальный технический университет«ХПИ»;г. Харьков;тел.: (057) 707 68 79. E-mail: [grivn\\_dmm@ukr.net](mailto:grivn_dmm@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8880-0982>.

**Grischenko Volodimir Mikolayovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Docent of the Dynamical and strength Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”;Kharkiv; tel.: (057) 707 68 79. E-mail: [grivn\\_dmm@ukr.net](mailto:grivn_dmm@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8880-0982>.

**Леонова Катерина Сергіївна** – магістрант кафедри динаміки та міцності машин, Національний технічний університет«ХПІ»;м.Харків; тел.: (057) 707 68 79. E-mail: [katusha4leon@gmail.com](mailto:katusha4leon@gmail.com)

**Леонова Екатерина Сергеевна** – магістрант кафедры динамики и прочности машин, Национальный технический университет«ХПИ»;г.Харьков; тел.: (057) 707 68 79. E-mail: [katusha4leon@gmail.com](mailto:katusha4leon@gmail.com)

**Leonova Kateryna Serhiivna** - master's student of the Dynamical and strength Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”; tel.: 707 68 79. E-mail: [katusha4leon@gmail.com](mailto:katusha4leon@gmail.com)