

***В. О. КОВАЛЕНКО, О. О. КОВАЛЕНКО, В. В. СТРИЖАК, О. М. ВУДВУД,
А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, М. Г. СТРИЖАК***

ЧИСЕЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ З ДИНАМІКИ РОБОТИ БАШТОВОГО КРАНУ

В статті розглянуті етапи проведення чисельного експерименту з визначення напружено-деформованого стану металокопструкції баштового крану. Приведено результат 3d моделювання металокопструкції баштового крану. При переході до моделювання методом кінцевих елементів запропоновано представляти дану модель у вигляді балкових елементів із зшиванням їх в більш великі елементи, що відповідають секціям металокопструкції реального крану. Описані прийняті припущення при закріпленні елементів балкової моделі між собою та моделюванні канатної системи. На прикладі розрахунку доведена прийнятність застосованого підходу до моделювання динаміки баштового крану методом кінцевих елементів.

Ключові слова: баштовий кран, механізм повороту, динаміка, FEM, FEA.

***V. KOVALENKO, O. KOVALENKO, V. STRYZHAK, O. VUDVUD, A. VASILIEV,
M. STRYZHAK***

NUMERICAL EXPERIMENT ON THE DYNAMICS OF THE TOWER CRANE

The article discusses the stages of conducting a numerical experiment to determine the stress-strain state of the metal structure of the tower crane. The result of 3d modeling of the metal structure of the tower crane is given. When moving to finite element modeling, it is proposed to represent this model in the form of beam elements with stitching them into larger elements that correspond to the sections of the metal structure of a real crane. The adopted assumptions are described when fixing the elements of the beam model to each other and modeling the rope system. Using the calculation example, the acceptability of the applied approach to modeling the dynamics of the tower crane by the finite element method is proven.

Keywords: tower crane, slewing mechanism, dynamics, FEM, FEA.

Вступ і обґрунтування актуальності. Основною метою виконання експериментальних досліджень є перевірка адекватності отриманих теоретичним шляхом наукових результатів. Однак, на сьогоднішній день проведення експериментальних досліджень на реальних кранах є досить суттєвою проблемою. Це пов'язано з вимогами дотримання техніки безпеки, складністю монтажу відповідного реєструючого обладнання тощо, економічними витратами. Тому для вирішення даної проблеми все частіше використовують чисельні експерименти. Зокрема для дослідження навантажень на металокопструкцію і її напружено-деформованого стану доцільно використовувати метод кінцевих елементів. Проте для моделювання кранів виявляється ряд специфічних складнощів моделювання, пов'язаних з їх розміром і складністю будови. Більш точне моделювання призводить до перевантаження розрахункових можливостей комп'ютерної техніки. Особливо це актуально для динамічного розрахунку. Тому моделі потребують суттєвого спрощення, але при цьому повинні відтворювати ті процеси, що відбуваються в реальності. Об'єктом дослідження в даній роботі є баштовий кран. Особливостями копструкції, які ускладнюють моделювання в цьому випадку є значні розміри несучих елементів (довжина налічує десятки метрів), а також велика кількість деталей через їх ґратчасту будову. Побудова спрощеної моделі баштового крану і проведення за допомогою неї динамічного розрахунку і є завданням даної роботи.

Огляд досліджень

З огляду досліджень можна зробити висновок, що підхід, пов'язаний з чисельними експериментами в галузі вантажопіддомних машин знаходить все ширше застосування. Однак, дослідженню динамічних процесів в елементах копструкції баштових кранів присвячена не значна кількість робіт. Велика частина з них стосується сейсмічного впливу.

Так автори в статті [1], створили моделі гібридних елементів баштового крану із використанням балки, оболонки тощо, які мають можливість відображати детальну поведінку

вузлів та стиків (болтових з'єднань) щогли крана під час землетрусів. Для цього авторами було використано метод кінцевих елементів. Проведений аналіз показав, що спільна поведінка початкової осьової сили попереднього натягу болта значно зменшується після того, як осьова сила болта перевищує межу текучості. У результаті, авторами вдалося забезпечити безпечні з'єднання кранової конструкції, (враховуючи контроль осьової сили під час натягу попереднього натягу болтів) та зменшення самої вартості конструкції. Застосування запропонованих конструкцій моделей та метод моделювання дає змогу ефективно проектувати болтові з'єднання для кранів. Крім того, запропонований метод можна застосувати для аналізу сейсмічних реакції загальних та тимчасових споруд на будівельних майданчиках.

В статті [2], авторами було представлено більш точний підхід до дослідження поведінки баштових кранів при синусоїдальних сейсмічних рухах. В даному підході авторами розроблена динамічна модель крана з трьома ступенями свободи та еквівалентна модель будівлі з одним ступенем свободи. Математичне моделювання сейсморозвідки допускає пряме інтегрування системи диференціальних рівнянь руху, що призводить до отримання аналітичних виразів закону руху. З досліджень випливає, що максимальні згинальні подовження крана відповідають першому режим коливань, в якому знаходяться протидія сейсмічному руху. Результати представлені для параметрів баштового крана МТО-180. Удосконалена модель крану отримана з урахуванням пружності деформації стріли, в горизонтальній площині. В цьому випадку динамічна система матиме додатковий ступінь свободи. Ще одна можливість доопрацювати динамічну модель полягає у врахуванні внутрішнього демпфірування крана. Після ослаблення сейсмічного впливу, кран виконує вимушені коливання, що передаються від будівлі.

В статті [3], дослідниками розглянуто динамічний аналіз для оптимального проектування конструкції баштового крана. Виконано статичний та модальний аналіз башти крану. Окрім того, виконано оптимальне проектування конструкції баштового крана за допомогою методу кінцевих елементів у програмному середовищі ANSYS. Результати показали, що запропонований метод динамічної оптимізації проектування не тільки зменшує загальну масу конструкції крана, а також, забезпечує повну статичну ємність матеріалу.

В статті [4], авторами досліджується поведінка баштових кранів під час сейсмічного впливу. Розглянуто два варіанти динамічних моделей: один ступінь вільності для кранів, що не виконують технологічний процес (без вантажу). два ступені вільності для кранів, що здійснюють технологічний процес (з вантажем). Однак у даному дослідженні, авторами не було зазначено для яких саме параметрів і моделей (марок) баштових кранів було виконано дослідження.

Як випливає з аналізу наукових праць, питанню моделювання динамічних процесів у кранах баштового типу приділена певна увага. Однак, динамічні навантаження у елементах конструкції баштового крана під час роботи механізму повороту вантажу не розглянуті на достатньому рівні.

Мета: створити спрощену модель баштового крану і провести за допомогою неї динамічний розрахунок.

Результати досліджень.

Для досягнення поставленої мети була розроблена твердотільна модель баштового крана, технічні характеристики якої відповідають основним параметрам досліджуваного крану КБ-403А. Загальний вигляд моделі представлено на рис. 1. Представлена твердотільна модель складається з таких частин: монтажна секція, секції башти, секція стрілової системи та оголовок. Конструкція монтажної секції баштового крана складається труб 140x10 та 102x6. Загальний вигляд монтажної секції представлено на рис. 2. До складу секції башти входять труби 57x4 та 140x10. Зовнішній вигляд секції башти крана представлено на рис. 3. Секція стрілової системи баштового крана складається з труб 102x9, 60x4, 76x6 та 38x3. А також кутників розміром 125x80x8 Вст3сп5 ТУ14-1-3023-80. Загальний вигляд секції стрілової системи представлено на рис. 4. Матеріал всіх трубчастих елементів Сталь 20 ГОСТ 8731-74.

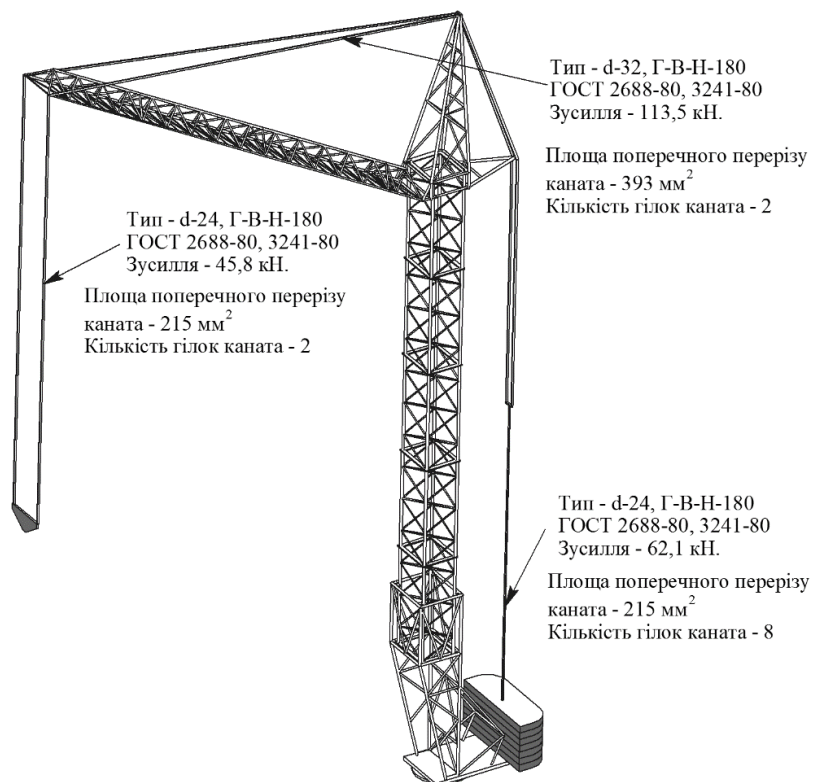


Рис. 1 – Загальний вигляд твердотільної моделі баштового крана КБ-403 А

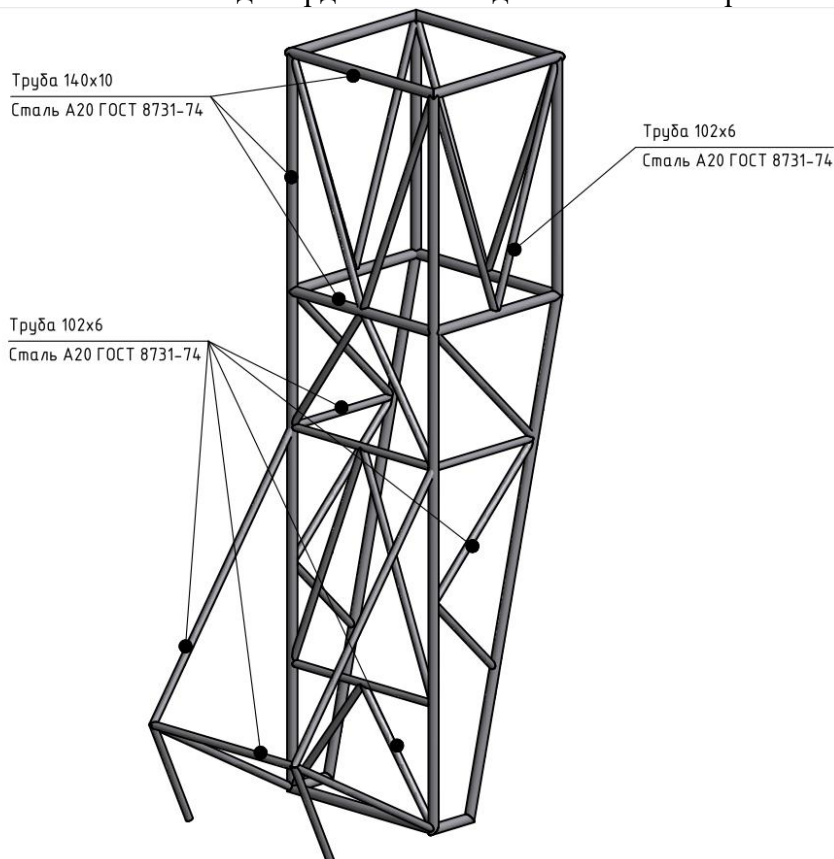


Рис. 2 – Загальний вигляд монтажної секції баштового крана

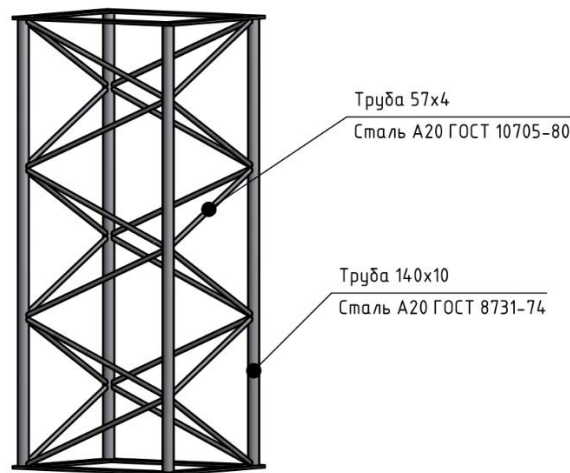


Рис. 3 – Зовнішній вигляд секції башти крана

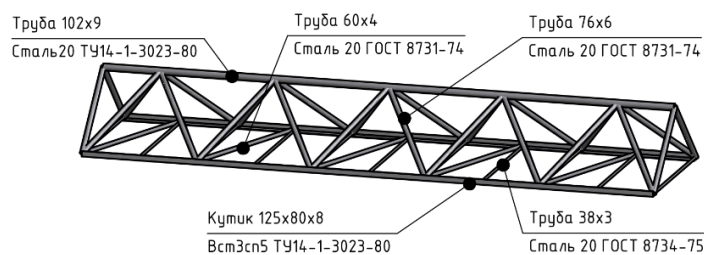


Рис. 4 – Загальний вигляд секції стрілової системи баштового крана

Для оголовка баштового крана використовуються труби, що виготовлені з матеріалу Сталь 20 ГОСТ 8731-74 із сортаментом 79x6, 102x6 та 140x10. Зовнішній вигляд конструкції оголовку баштового крана представлено на рис. 5. Важливою складовою частиною структури баштового крана є система тягових і розчалочних канатів. Схема запасовування канатів і будови канатно-блокової системи для досліджуваного баштового крана представлена на рис. 6.

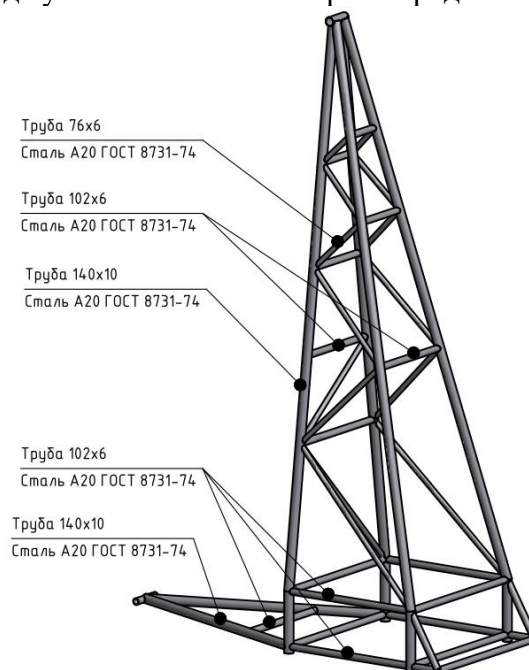


Рис. 5 – Зовнішній вигляд конструкції оголовка баштового крана

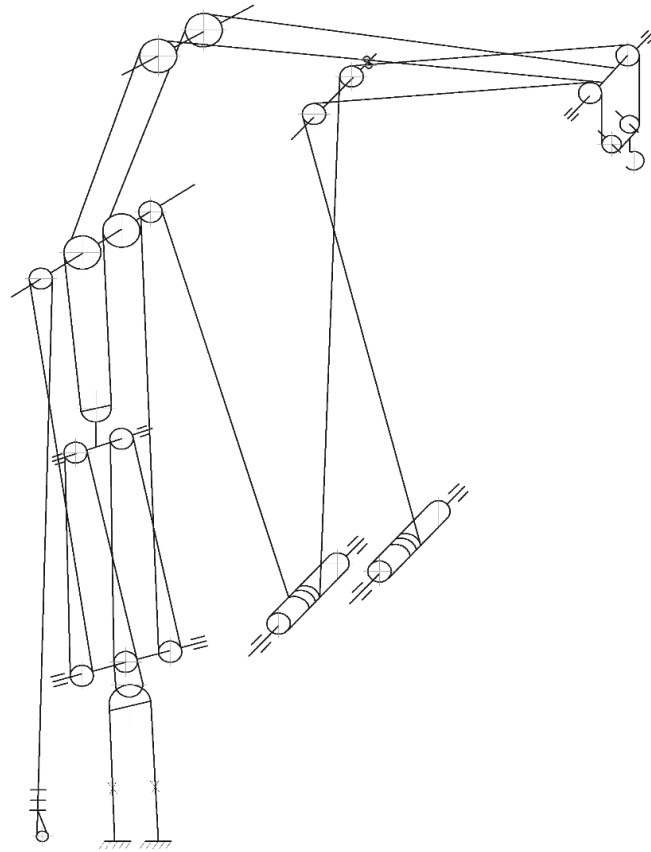


Рис. 6 – Схема запасування канатів баштового крана КБ-403 А

Дослідження динамічних навантажень у крановій металоконструкції здійснювалося за допомогою універсальної програми Ansys, яка працює із використанням методу скінченних елементів. Для проведення розрахунків динамічних навантажень у конструкції баштового крана, досліджувану твердотільну модель (рис. 1), було перероблено у відповідну до неї розрахункову модель, фрагмент, якої представлено на рис.7 (фрагмент епюри напружень після проведення розрахунків).

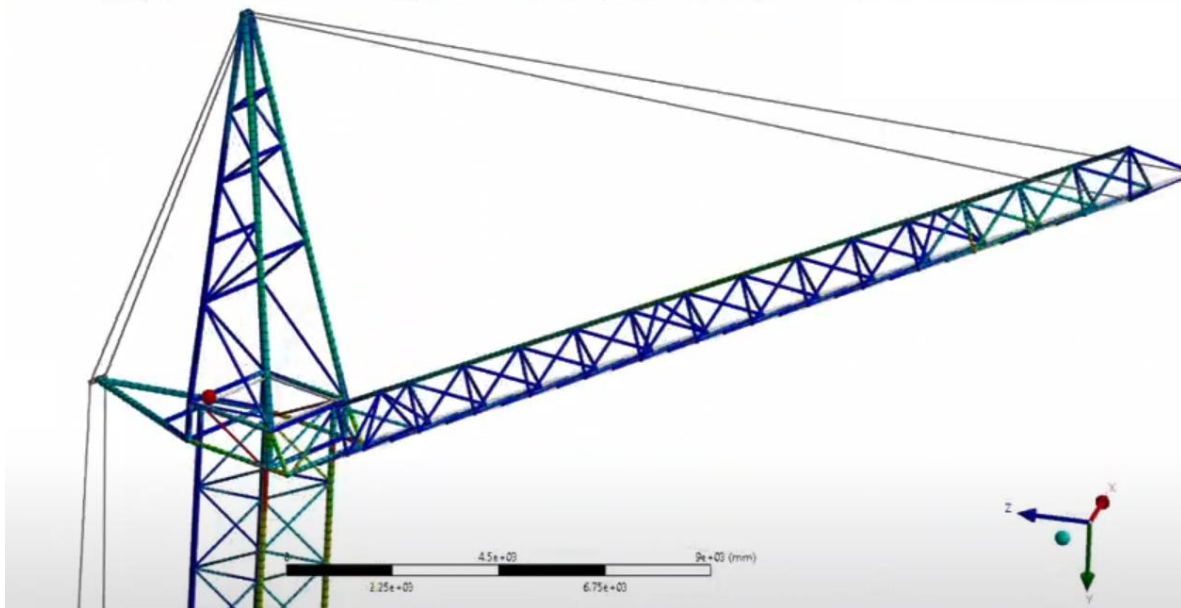


Рис. 7 – Фрагмент розрахункової моделі баштового крана КБ-403 А

Для спрощення розрахунку динамічних навантажень конструкцію системи баштового крана було поділено на відповідні сегменти (частини). Зображення конструкції у відповідному сегментному вигляді, представлено на рис. 8.

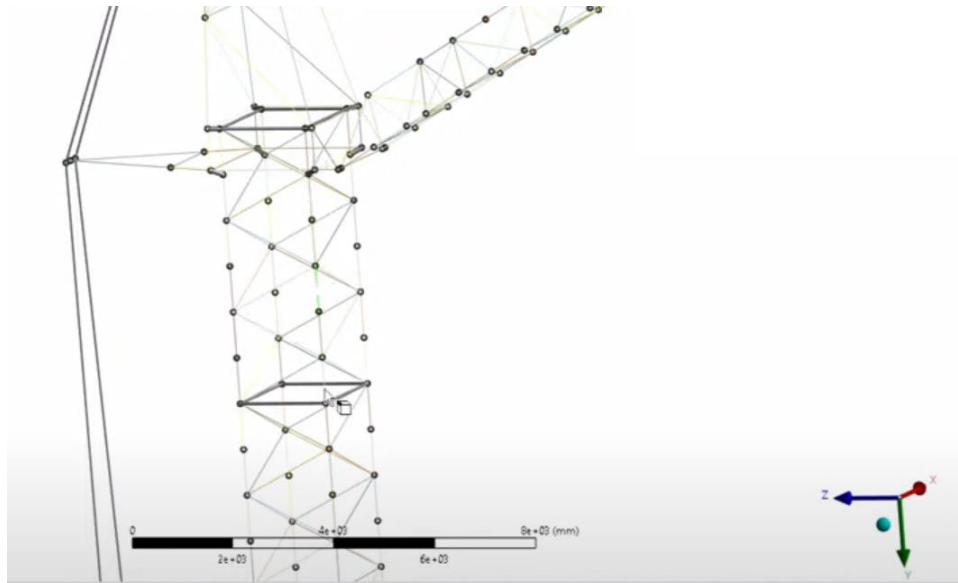


Рис. 8 – Зображення конструкції баштового крана у сегментному вигляді

3-D геометрія була перетворена на окремі балкові елементи, які в Ansys були зшиті у більш великі частини, відповідно до секцій металоконструкції реального крана, зображення яких наведено на рис. 2 – 5, тобто це стріла, башта, монтажні секції та оголовки.

Система канатів рис. 6, передавалася в Ansys як звичайна 3-D геометрія, яка потім не враховувалася. Це було зроблено для спрощення розрахунків.

Для кожного із наявних об'єктів, що представлені на рис. 2 –5) значення точності розрахунку задавалося окремо. Для моделювання повороту конструкції баштового крана, було створено віртуальний обертовий шарнір рис. 9, який додано до наявної конструкції та позначено синім кольором.

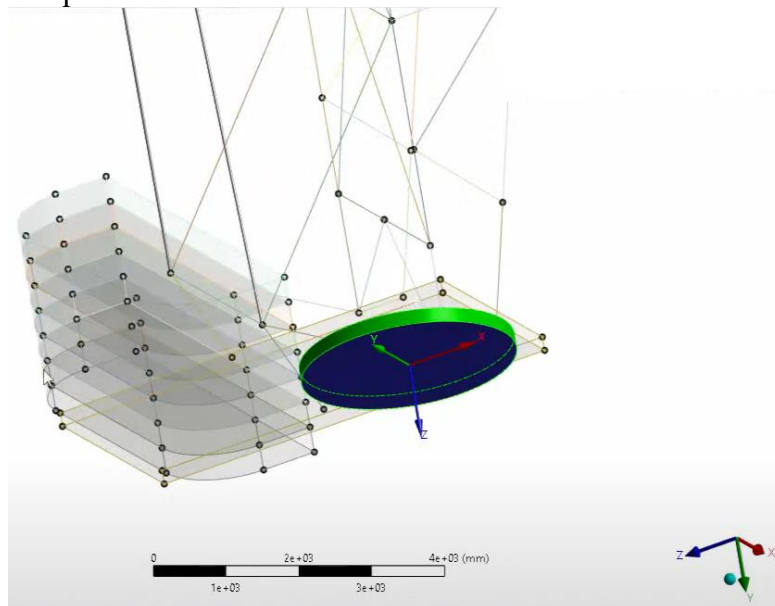


Рис. 9 – Загальний вигляд віртуального обертового шарніру

Щоб поєднати конструкції монтажної секції із конструкцією секції башти, а також конструкції секцій башт між собою та безпосередньо секцію башти із конструкцією оголовка, було спроектовано відповідні зв'язки (перемички), деякі з котрих зображено на рис. 10.

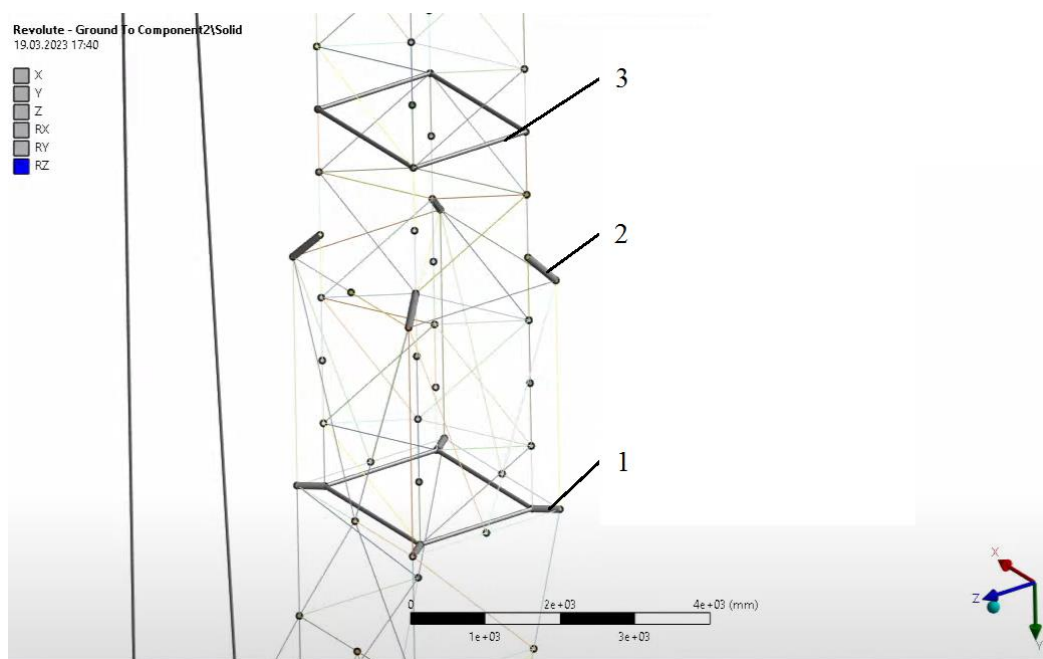


Рис. 10 – Зображення перемичок кріплення конструкції: монтажної секції та секції башти 1, 2; та секції башти між собою 3

Що стосується моделювання поведінки закріпленого на гнучкому підвісі вантажу, тут для спрощення розрахунків, вантаж розглядається як дистанційна точка із відповідними масою та довжиною гнучкого підвісу, що триточково закріплена на кінці стріли крана (рис. 11). При цьому для вантажу створена окрема локальна система координат.

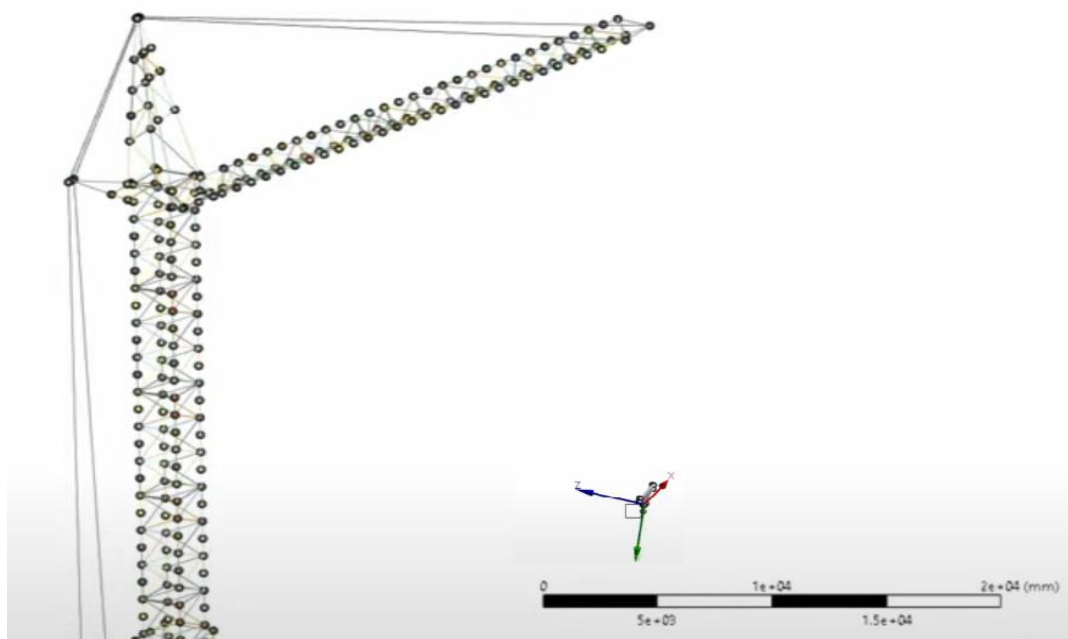


Рис. 11 – Точкове моделювання закріпленого вантажу

Оскільки задача є динамічною та не лінійною, у подальших розрахунках, запропоновано виконати припущення, що вантаж умовно розміщений на кінці стрілової системи баштового крана. Коливання вантажу відбувається за рахунок коливань стрілової системи. Такі припущення добре відображають фізичні процеси в роботі кранів при піднятті вантажу на висоту близьку до максимальної або навпаки при дуже великій довжині підвісу, коли вплив вантажу послаблюється.

Для того, щоб надати балковим елементам об'єму, була використана підпрограма пакету Ansys «Cross Sections». Функції даної підпрограми дозволяють моделювати ті чи інші варіанти перетинів конструкції досліджуваного баштового крана та за рахунок параметрів, що вказані у системі, розрахувати поведінку й властивості балок, які мають місце у конструкції. Конструкція досліджуваного баштового крана здебільшого складається із профілю з трубчастим перетином, а також є наявні декілька кутників із заокругленням, які розташовані в стрілі та які представлені на рис. 12 у віддаленому та в збільшеному б виглядах.

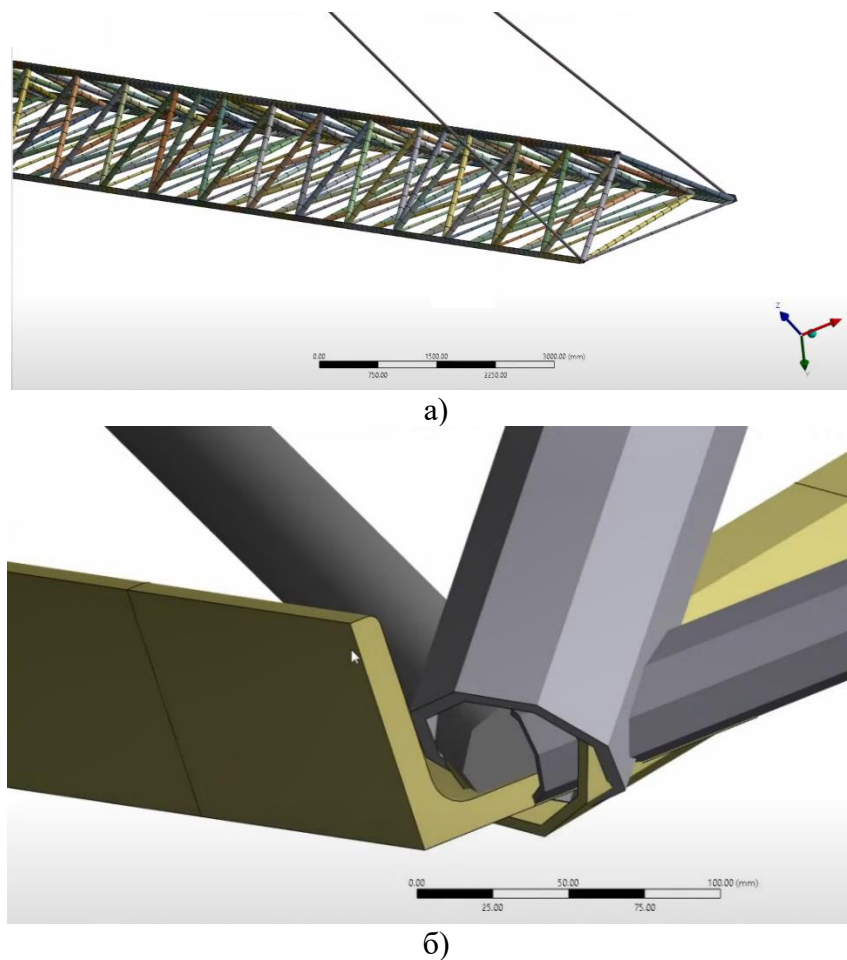


Рис. 12 – Балкові елементи металоконструкції із призначеними перерізами (стріла баштового крана):
а) в загальному вигляді; б) в збільшеному вигляді

Для кутникових профілів застосовано спрощення – усіма заокругленнями знехтувано. Оскільки стріла баштового крана з'єднана із баштою крана через оберտальне шарнірне з'єднання, для моделювання повороту стрілової системи крана було створено два поворотні шарніри із відповідними системами координат для кожного з них. При цьому осі даних систем координат розміщено у відповідному положенні (рис. 13).

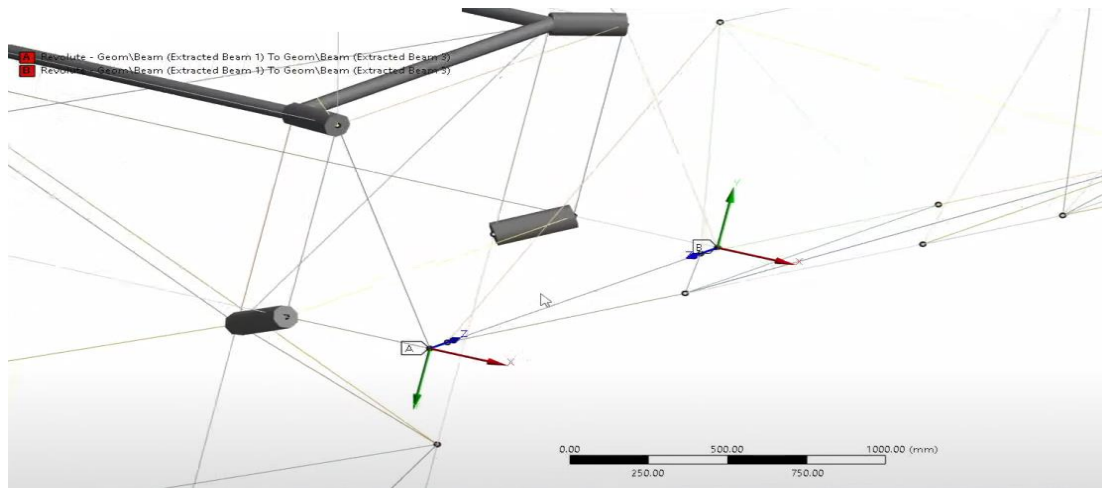


Рис. 13 – Вісі систем координат поворотних шарнірів стріли

Для досліджуваної конструкції баштового крана у програмі Ansys, за допомогою команди «Structural Steel» було введено декілька найменувань матеріалів. Це матеріали самої конструкції, матеріали протизваги (бетонних плит) та матеріал опорної-поворотної платформи (рис. 14), для якої була задана дещо інша густина. Пов'язано це із тим, щоб вага даного компоненту відповідним чином впливала на достовірність отриманих результатів.

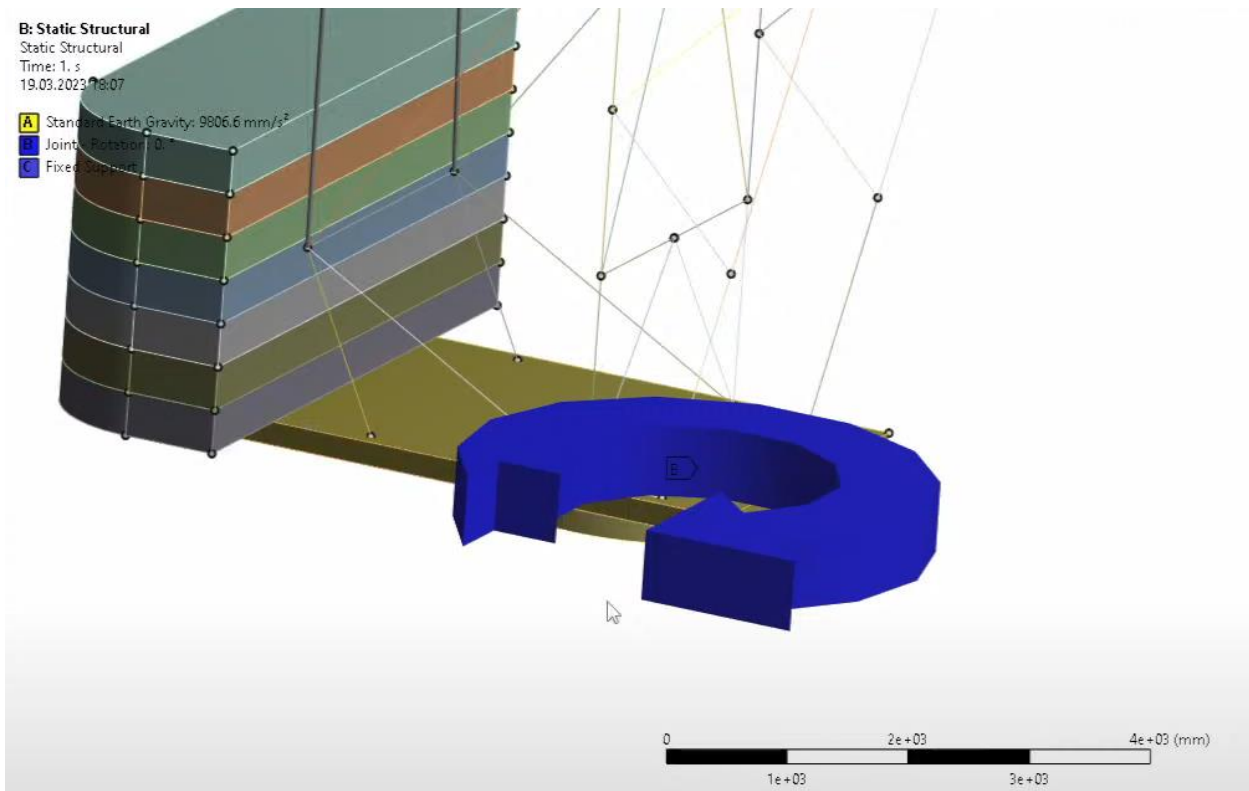


Рис. 14 – Модель опорно-поворотної платформи баштового крана

Застосувавши описані способи моделювання вдалось створити модель з 5000 елементів та близько 13000 вузлів, більшість з яких знаходяться у нижній частині крана (рис. 15). При цьому одна статична задача розраховується, близько 13 секунд. Через кількість об'єктів у конструкції (близько 800 балок), процес розбиття елементів на скінченну елементну сітку у Ansys Mechanical, відбувається дещо довше (приблизно 90 секунд).

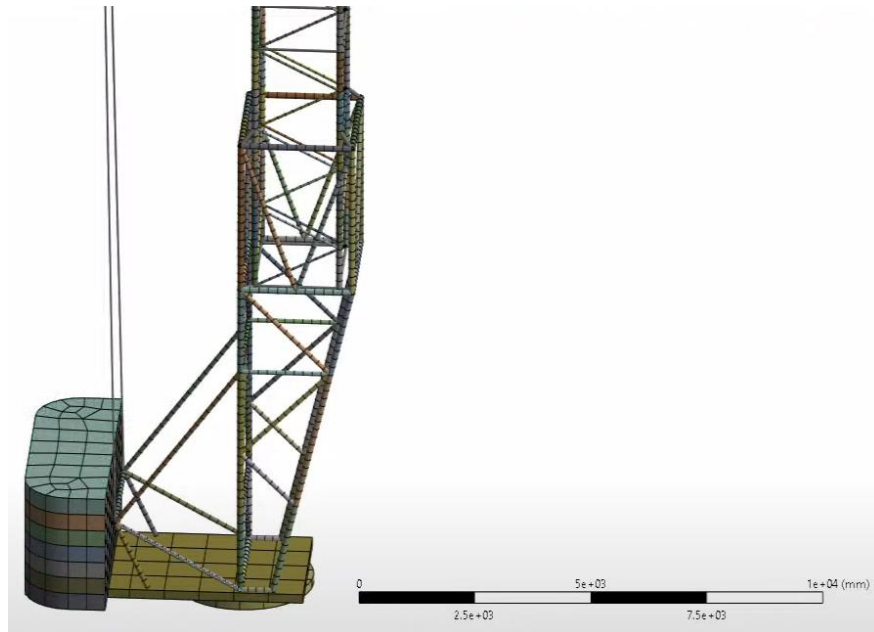


Рис. 15 – Елементи та вузлів конструкції нижньої частини баштового крана

Для розв'язку задачі у динамічній постановці, тривалість обчислення у порівнянні із статичним збільшується не суттєво. Тобто задача майже миттєва.

Для апробації створеної моделі і підготовки її для подальших досліджень, виконано динамічний розрахунок, що імітує роботу механізму повороту баштового крана. Швидкість руху (повороту) досліджуваної моделі (рис. 7) задано спрощеним лінійним законом, графік якого представлено на рис. 16.



Рис. 16 – Графічна залежність зміни швидкості баштового крана у програмному середовищі Ansys Mechanical

Із графіку (рис. 16) видно, що відбувається розгін крана за відповідний проміжок часу, потім відбувається рух на усталений швидкості і далі відбувається гальмування після чого швидкість дорівнює нулю. В реальному кранів поворот відбувається шляхом прикладання крутного моменту (зусилля) до вихідного валу його приводу. В нашій моделі прикладаємо зусилля одразу до опорної платформи, як це показано на рис. 17. Оскільки дана система не стабільна це на деяких етапах ускладнює розрахунок задачі, що призводить до можливих, помилкових кінцевих результатів та унеможливує прикладання сили, тобто, щоб керування поворотом системи відбувалося за рахунок крутного моменту. Тому було вирішено моделювати поворот досліджуваної системи шляхом прикладання та контролю її швидкості.

Тобто дана система була дещо обмежена, що дозволило спростити розрахунки. Загалом для досліджуваної системи було виконано два пробних розрахунки роботи механізму повороту баштового крана, які є із однаковими даними на вході. Для розрахунку задачі №1 було витрачено 370 кроків. При цьому час, який був витрачений становить 369 с (рис. 18).

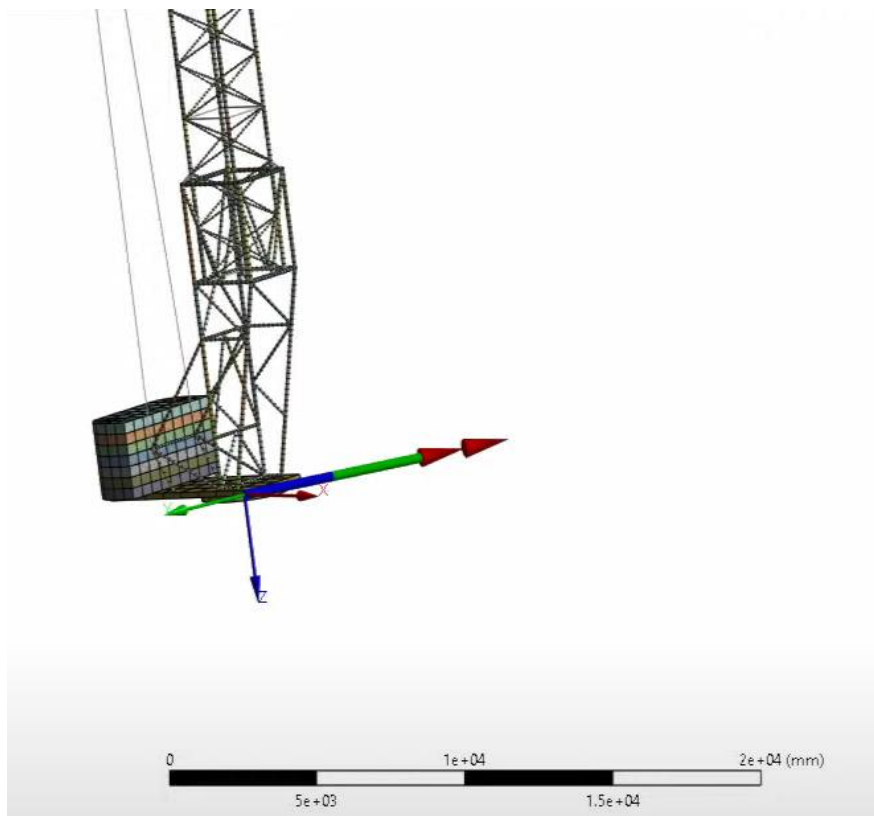


Рис. 17 – Зображення моменту прикладання зусилля повороту

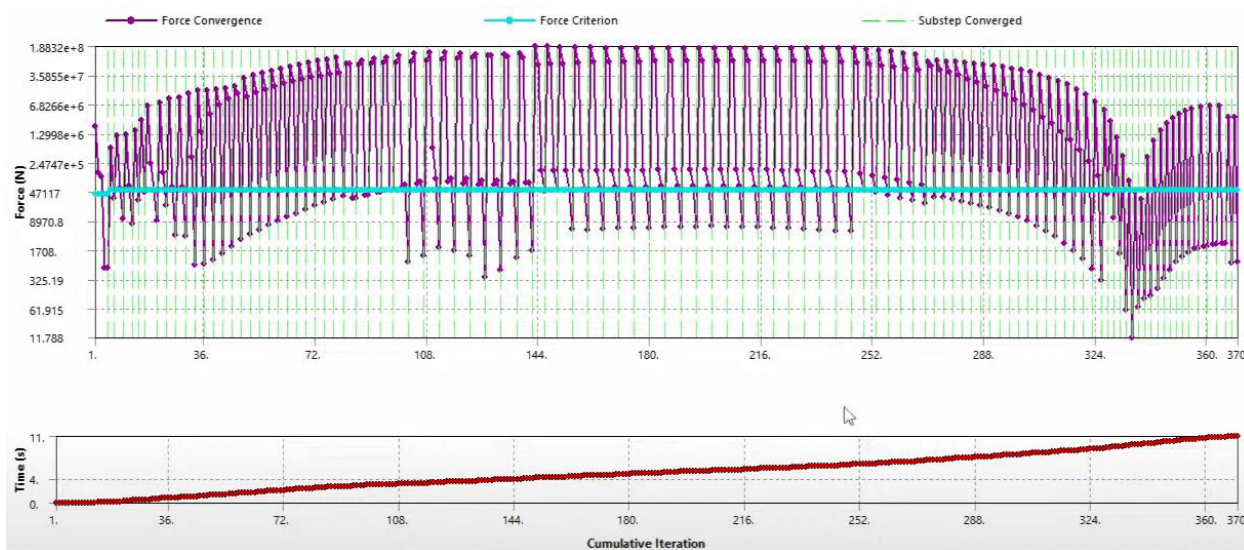


Рис. 18 – Графічні залежності основних результатів розрахунку задачі №1.

При розрахунку задачі №1, процес був розпаралелений на декілька процесів. Це дозволило прискорити розрахунок. Для розрахунку задачі №2, було витрачено 3400 кроків (рис. 20). Час, який був витрачений на розрахунок становить 4008 с (у 10,8 разів більше).

За результатами розв'язку задач №1 та №2, було побудовано відповідні графічні залежності крутного моменту рис. 20, (а і б), прискорення рис. 21, (а і б) та переміщення рис. 22, (а і б).

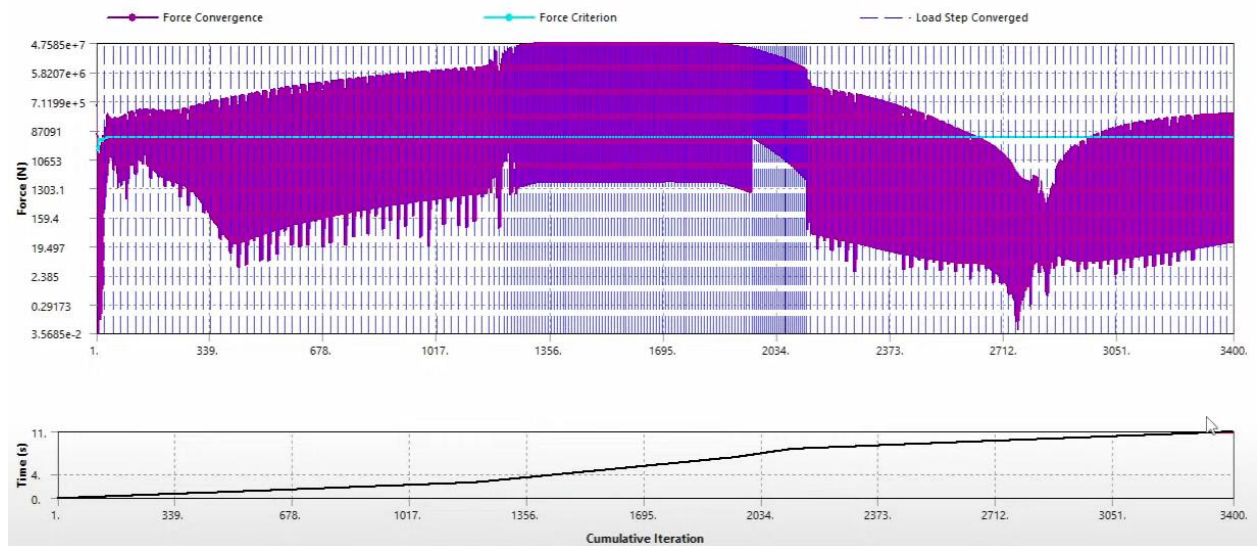
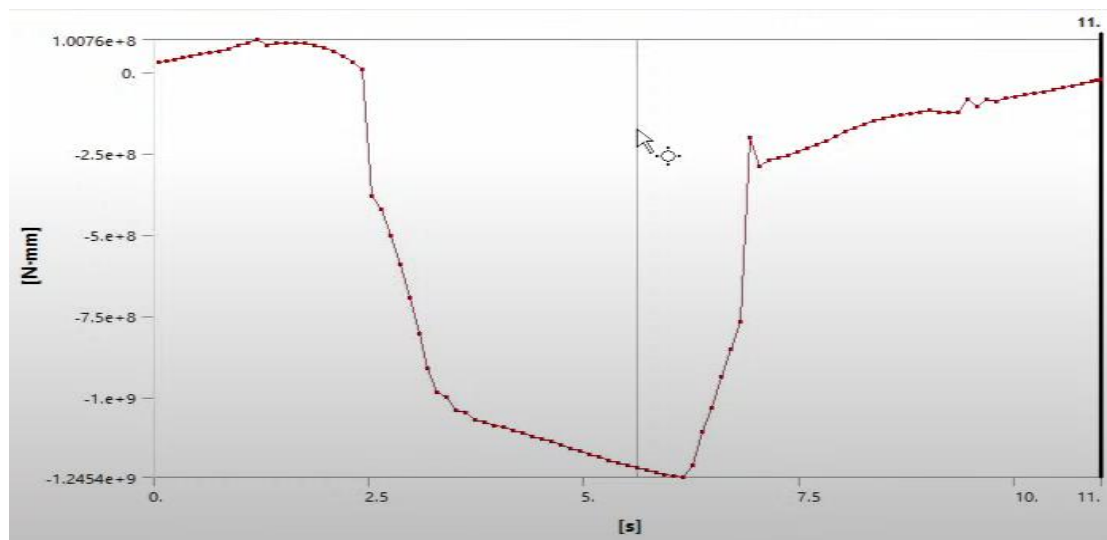
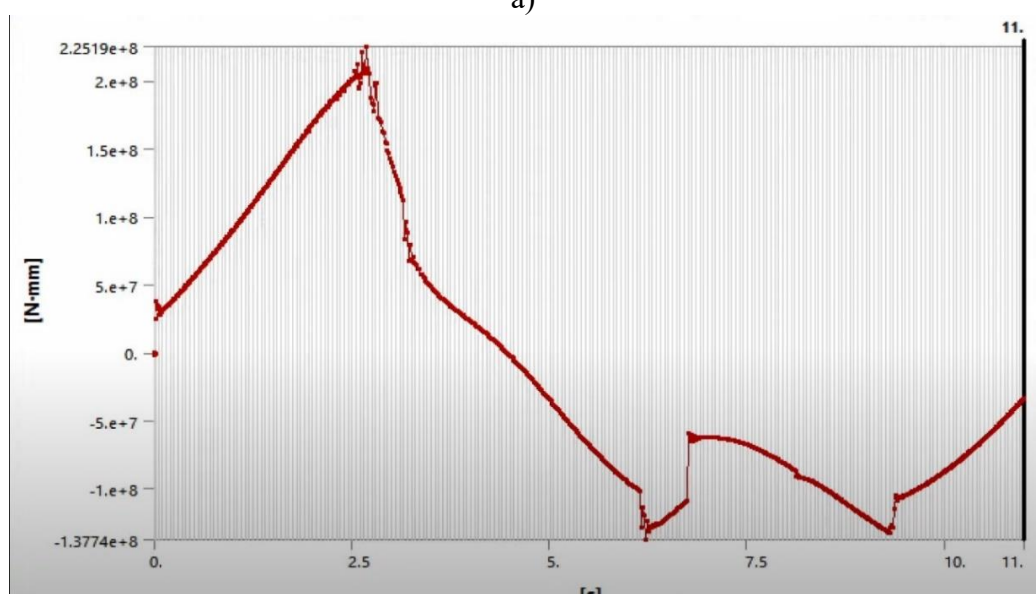


Рис. 19 – Графічні залежності основних результатів розрахунку задачі №2.



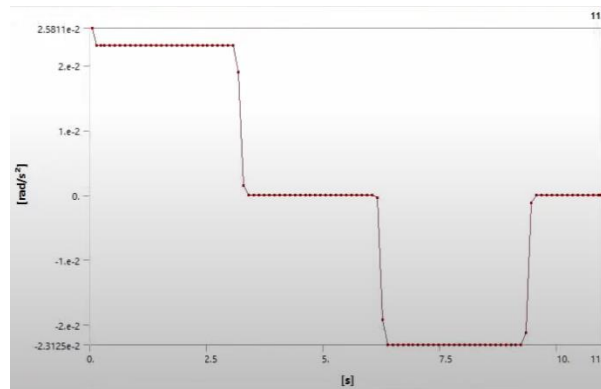
а)



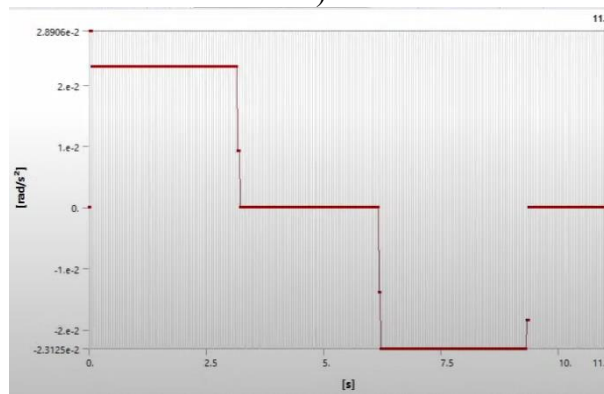
б)

Рис. 20 – Графічні залежності крутного моменту системи для досліджуваних задач:
а - №1; б - №2

Аналізуючи наведені вище графічні залежності (рис. 3.20, а та б), можливо зробити висновок, що суттєво кращими результатами будуть при розв'язку задачі №1.

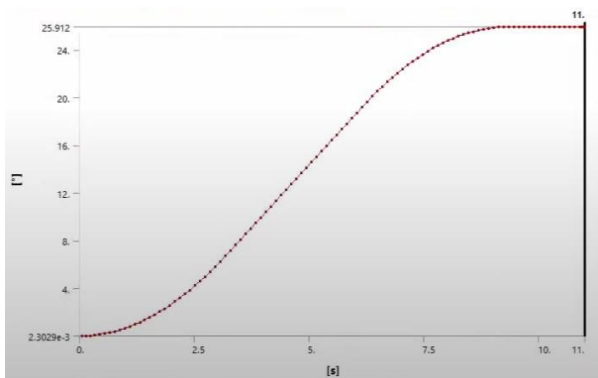


а)

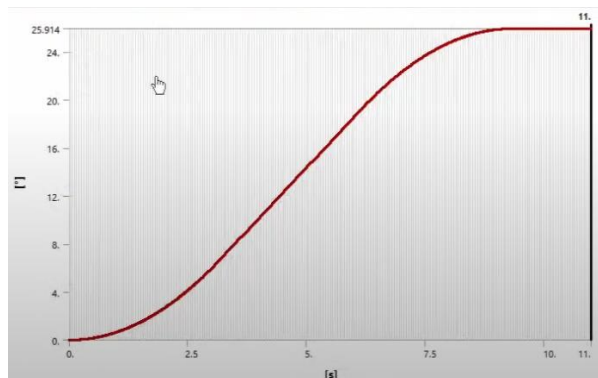


б)

Рис. 21 – Графічні залежності пришвидження системи для досліджуваних задач:
а - №1; б - №2



а)



б)

Рис. 22 – Графічні залежності переміщення системи для досліджуваних задач:
а - №1; б - №2 відповідно

Графічні залежності, що представлено на рис. 21 та рис. 22, для обох досліджуваних задач є однаковими, різниця полягає тільки в кутному моменті. Тобто коли у розрахунках задається момент, результат отримати значно складніше ніж коли значення моменту отримується із результатів розрахунку.

Окрім того, для задачі №1, було побудовано графічні залежності, що характеризують зміни та еволюції крутного моменту при повороті досліджуваної системи (рис. 23), енергетичної характеристики (рис. 24). При опрацюванні отриманих даних відбувалося їх збереження, для всіх об'єктів, що нас цікавлять. Окрім того отримані дані у подальшому конвертувалися для опрацювання в Excel.

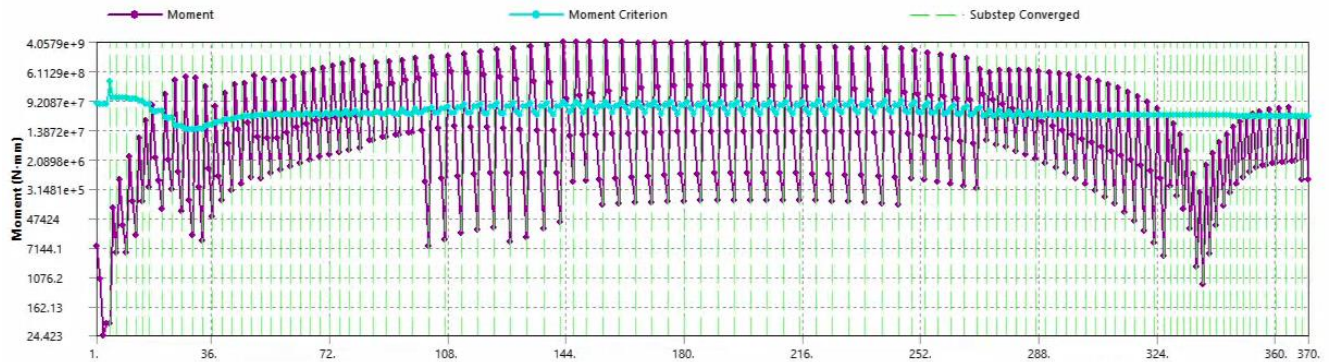


Рис. 23 – Графічна залежність зміни крутного моменту при повороті досліджуваної системи

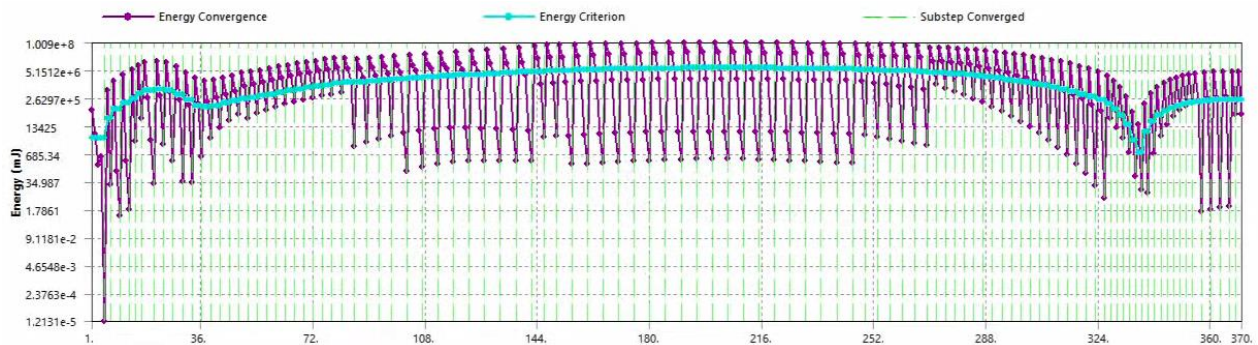


Рис. 24 – Графічна залежність зміни енергетичної характеристики при повороті досліджуваної системи

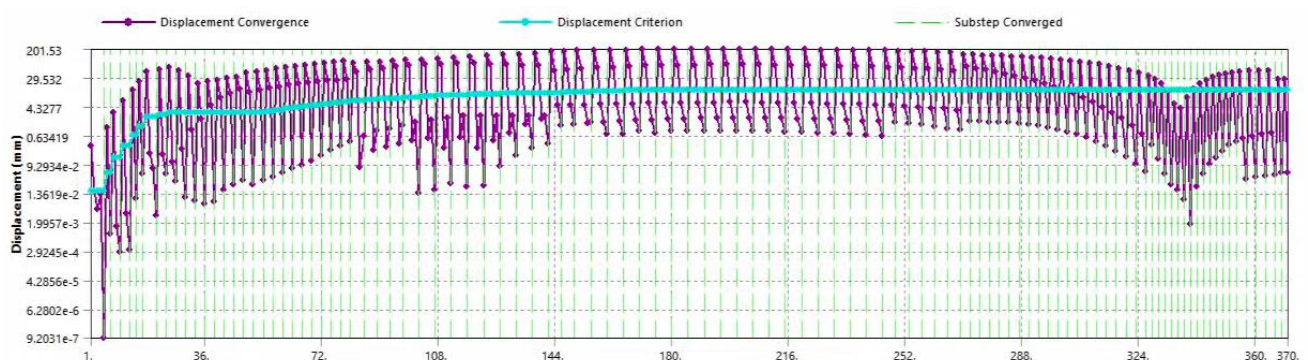


Рис. 25 – Графічна залежність зміни переміщення при повороті досліджуваної системи

Висновки. В статті розв'язана задача створення спрощеної моделі баштового крану для проведення за допомогою неї динамічних розрахунків. Представлений метод дозволяє моделювати металоконструкції кранів великих розмірів (10 м і більше) гратчастої конструкції. При цьому можна отримати розрахункову модель з відносно малою кількістю балкових елементів і вузлів, що забезпечує відносно швидкий розрахунок при достатньо точному відображенні фізичних процесів, що відбуваються в реальному крані. Проведено пробні

розрахунки із завданням в якості вихідних даних зусилля і швидкості. Показано, що завдання швидкості є кращим шляхом досягнення результату, що відповідає динамічним процесам в реальному крані.

Список літератури:

1. Yoshitaka Ushio, Tomoharu Saruwatar, Yasuyuki Nagano. 2019. Elastoplastic FEM Analysis of Earthquake Response for the Field-Bolt Joints of a Tower-Crane Mast. The 2019 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM19) Jeju Island, Korea, September 17 – 21.
2. Mircea ALĂMOREANU, Andrei VASILESCU. Dynamic Response of Anchored Tower Cranes under Sinusoidal Damped Seismic Action. Case Study 2014. RJAV. Vol. XI. Issue 1. Pp. 3-10.
3. Weihua Yang, Yourong Li, Zifan Fang, Kongde He. Study on Dynamic Optimum Design of Tower Crane Structure. 2011. Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. 15-17 July. Pp. 1660-1663.
4. Mircea ALĂMOREANU, Andrei VASILESCU. Behavior Of Tower Cranes Under Seismic Actions. 2010. U.P.B. Sci. Bull. Series D. Vol. 72. Iss. 2. Pp 55 – 64.

References (transliterated)

1. Yoshitaka Ushio, Tomoharu Saruwatar, Yasuyuki Nagano. 2019. Elastoplastic FEM Analysis of Earthquake Response for the Field-Bolt Joints of a Tower-Crane Mast. The 2019 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM19) Jeju Island, Korea, September 17 – 21.
2. Mircea ALĂMOREANU, Andrei VASILESCU. Dynamic Response of Anchored Tower Cranes under Sinusoidal Damped Seismic Action. Case Study 2014. RJAV. Vol. XI. Issue 1. Pp. 3-10.
3. Weihua Yang, Yourong Li, Zifan Fang, Kongde He. Study on Dynamic Optimum Design of Tower Crane Structure. 2011. Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. 15-17 July. Pp. 1660-1663.
4. Mircea ALĂMOREANU, Andrei VASILESCU. Behavior Of Tower Cranes Under Seismic Actions. 2010. U.P.B. Sci. Bull. Series D. Vol. 72. Iss. 2. Pp 55 – 64.

Надійшла (received) 11.05.2023 р

Відомості про авторів / About the Authors

Коваленко Валентин Олександрович (Valentyn Kovalenko) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Підйомно-транспортні машини і обладнання», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9161-198X>; e-mail: valentyn.kovalenko@khpi.edu.ua

Коваленко Олег Олександрович (Oleh Kovalenko) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Підйомно-транспортні машини і обладнання», м. Харків, Україна; e-mail: oleh.kovalenko@mit.khpi.edu.ua.

Стрижак Всеволод Вікторович (Vsevolod Stryzhak) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини і обладнання», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3032-6004>; e-mail: vsevolod.stryzhak@khpi.edu.ua

Вудвуд Олександр Миколайович (Oleksandr Vudvud) кандидат техн. наук., доцент, Національний університет "Одеська політехніка", завідувач кафедри підйомно-транспортного та робототехнічного обладнання. м. Одеса, Україна. ORCID: 0000-0002-4807-3634; e-mail: o.m.vudvud@op.edu.ua

Васильєв Антон Юрійович (Anton Vasiliev) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорії та системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-8106-0950> e-mail: anton.vasiliev@khpi.edu.ua

Стрижак Мар'яна Георгіївна (Mariana Stryzhak) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Деталі машин і гідропневмосистеми», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3335-4086>; e-mail: mariana.stryzhak@khpi.edu.ua