УДК 378.245(035)
Проць В.В., Крупко В.Г., к.т.н.; Койнаш В.О.

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ НА МЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН

Вступ. В господарському комплексі України значна роль відводиться видобутку корисних копалин, будівництву шляхів, які неможливі без великих обсягів землерийних робіт. Так в Україні на цей час всі будівельні матеріали, 45% руди, 30% вугілля, видобувають відкритим способом, внаслідок чого з`являється необхідність в машинах, за допомогою яких здійснюється екскавація ґрунту, а саме екскаватори.

В ході роботи екскаватора інтенсивному зносу підлягають не тільки стінки та зуби ковша, а також і ходове обладнання, і опорно-поворотний механізм. При цьому встановлено, що в ході копання ґрунту, навантаження від робочого обладнання передається через опорно-поворотний пристрій на ходове обладнання. А зважаючи на той факт, що процес копання представляє собою чергування піків ударного навантаження з періодами статичного навантаження, то ходове обладнання, а саме траки гусеничного ходу, підлягають постійній вібрації та струсу при копанні, що призводить до їх зношування.

Отже при копанні зносу підлягаються всі деталі механічних систем екскаваторів, що знижує їх строк служби, та підвищує ймовірність раптової та своєчасної відмови механізму.

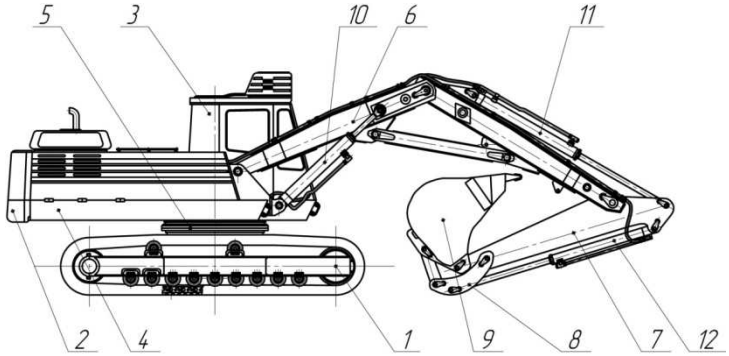
Тому актуальним є вивчення характеру навантаження на механічні системи землерийних машин, в процесі копання в залежності від силових факторів [1].

Метою статті є створення математичної моделі екскаватора, як засобу підтримки розробки на етапі ескізного проектування машини, дослідження та аналіз діючих силових факторів на елементи машини про виконанні робочого процесу методом кінцевих елементів.

Основною проблемою, яка вирішена в статі є представлення залежності зусиль в елементах ходового обладнання від діючої довжини гідроциліндрів без врахування навантажень на ходове обладнання від маси машини.

Обґрунтування розрахункової схеми

Побудова математичної моделі здійснюється за параметрами гідравлічного одноківшевого екскаватора ЕО – 4121, конструктивна схема якого представлена на рисунку 1.



1 – гусеничний хід; 2 – противага; 3 – кабіна керування; 4 – поворотна платформа; 5 – опорно-поворотний пристрій; 6 – двосекційна стріла; 7 – рукоять; 8 – упряж ковша; 9 – ківш; 10 – гідроциліндри підйому-опускання стріли; 11 – гідроциліндр тяги рукояті; 12 - гідроциліндр тяги ковша.

Рисунок 1 – Конструктивна схема ЕО – 4121

Зважаючи на той факт, що на елементи робочого обладнання в процесі роботи діють поздовжні та поперечні сили, а також згинаючі моменти, тому металоконструкцію екскаватора доцільно апроксимувати стрижньовими елементами.

Скориставшись конструктивною схемою екскаватора складено розрахункову схему для робочого обладнання, в якій знайшли своє відображення геометричні параметри машини. Розрахункова схема для робочого обладнання представлена на рисунку 2.

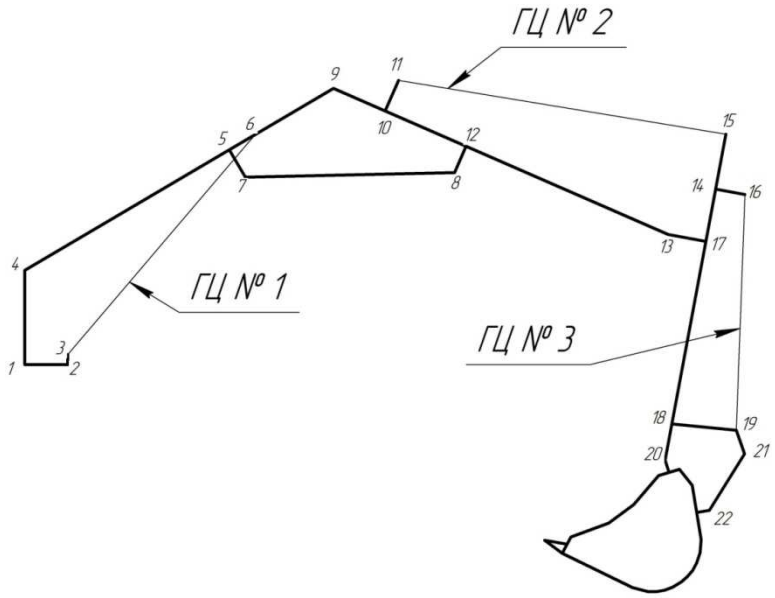


Рисунок 2 – Розрахункова схема для робочого обладнання ЕО – 4121

Аналогічно робочому обладнанню на інші механічні системи екскаватора діють поздовжні та поперечні сили, а також згинаючі моменти,тому можна представити поворотну платформу та ходове обладнання у вигляді стрижньових елементів. Розрахункова схема для поворотної платформи представлена на рисунку 3, для ходового обладнання на рисунку 4.

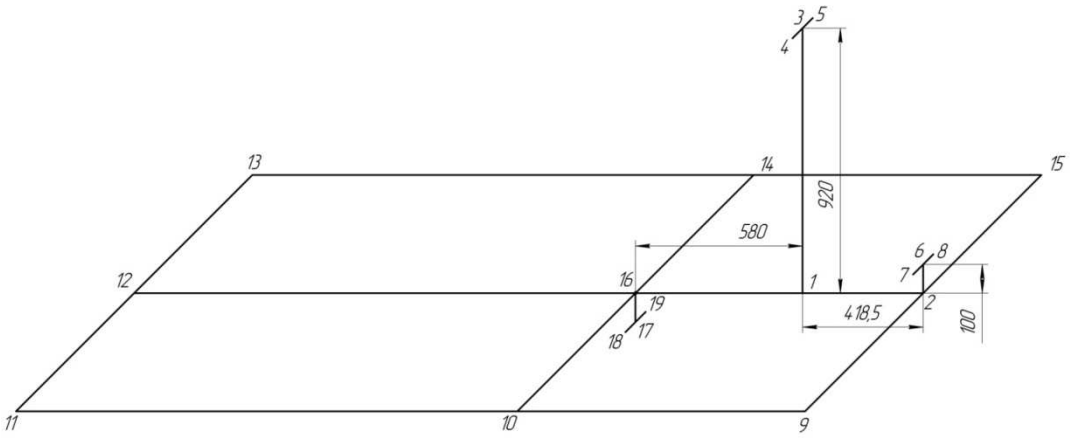


Рисунок 3 – Розрахункова схема поворотної платформи ЕО – 4121

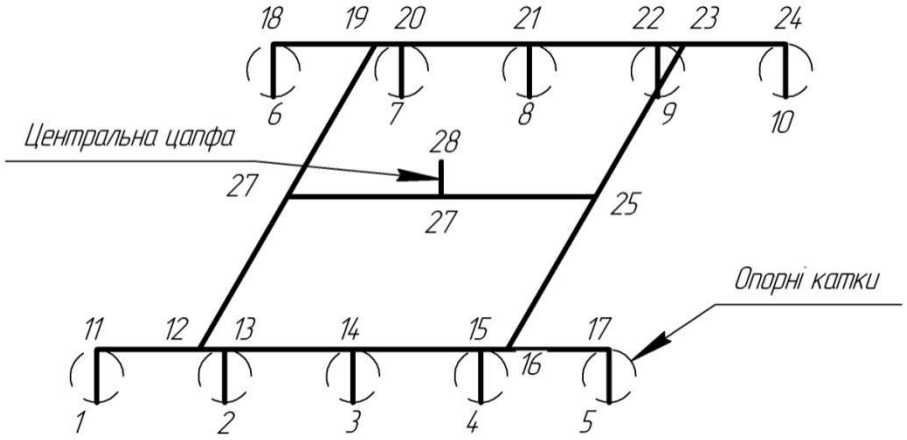


Рисунок 4 – Ходове обладнання ЕО – 4121

Розробка комплексної математичної моделі

Математична модель для екскаватора при виконанні основного робочого процесу представляє собою цілий комплекс взаємодіючих між собою об’єктів. На рисунку 5 представлена структурна схема взаємодії цих об’єктів.

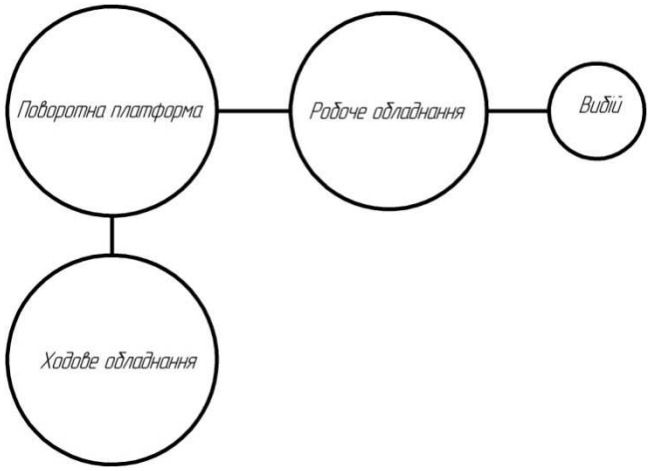


Рисунок 5 – Структурна схема комплексної взаємодії

Для комплексного і повного представлення зусиль, виникаючих в виконавчих механізмах, необхідно розробити окрім математичної моделі екскаватора ще математичну модель, яка описує взаємодію ковша з породою.

Обгрунтування математичної моделі взаємодії ковша з породою у вибої

Взаємодія ковша з породою представляє собою опір силі різання, а отже цю силу різання можна розрахувати по одній з існуючих методик.

Для розрахунку опору силі різання буде використана методика Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА)

$$S_{коп} = \sqrt{P_{коп}^2 + N_{коп}^2}, [\,кН],$$

де $P_{коп}$ - дотична складова сили копання;

$N_{коп}$ - нормальна складова сили копання.

Розрахувавши зусилля різання за даною методикою ми отримаємо чисельне значення зовнішнього силового фактора, який діє на робоче обладнання.

Розробка математичної моделі робочого обладнання

Створення математичної моделі буде відбуватися по розрахунковій схемі (рисунок 2), і буде включати в себе визначення координат всіх вузлів в просторі. Це необхідно для моделювання процесу копання, при якому гідроциліндри будуть змінювати свою довжину. А отже і вся схема буде змінюватись.

Координата кожної точки позначеної на розрахунковій схемі може бути знайдена геометричним методом. Для математичного опису скористуємося рівнянням $X^2 + Y^2 = R^2$ (рівняння кола). При цьому для знаходження координати точки знадобиться вирішення системи із двох таких нелінійних рівнянь другого порядку, [2]

Графічна інтерпретація представлена на рисунку 6.

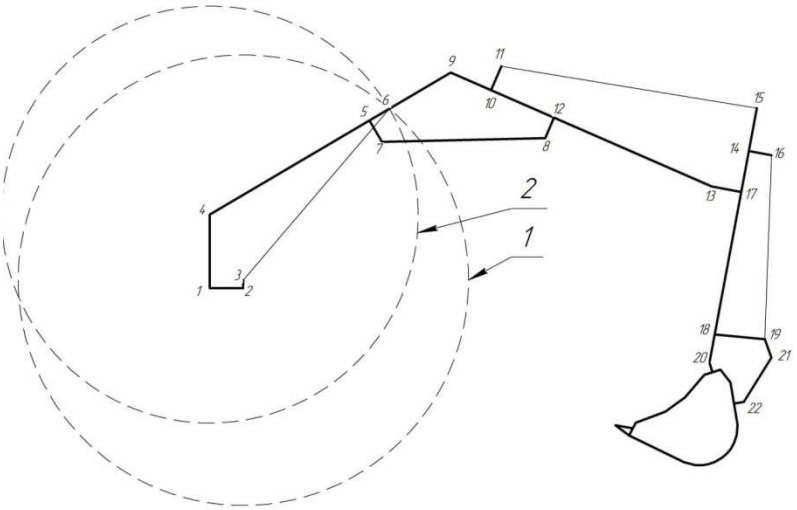


Рисунок 6 – Графічне відображення визначення координати точки 6

Для визначення координати точки з'єднання гідроциліндра № 1 з стрілою (точка 6 на рисунку 6) достатньо буде вирішення системи нелінійних рівняння кола № 1 центром якого є вузол 2, та рівняння кола № 2 центром якого є вузол № 4.

При цьому система рівнянь буде мати вигляд:

$$\begin{cases}(X_6 - X_4)^2 + (Y_6 - Y_4)^2 = {L_{4-6}}^2; \\ (X_6 - X_2)^2 + (Y_6 - Y_2)^2 = {L_{2-6}}^2. \end{cases}$$

Система рівнянь вирішується методом Ньютона. Для використання методу Ньютона необхідно, щоб рівняння були приведені до вигляду f(x)=0, а отже система рівнянь буде записуватися в наступному вигляді:

$$\begin{cases}(X_6 - X_4)^2 + (Y_6 - Y_4)^2 - {L_{4-6}}^2 = 0; \\ (X_6 - X_2)^2 + (Y_6 - Y_2)^2 - {L_{2-6}}^2 = 0. \end{cases}$$

Так само може бути знайдена координат будь якої точки розрахункової схеми.

Розробка математичної моделі поворотної платформи та ходового обладнання

Розробка математичної моделі для поворотної платформи та ходового обладнання представляє собою ні що інше, як описання в локальній системі координат місце знаходження у просторі всіх вузлів.

Наприклад, для поворотної платформи.

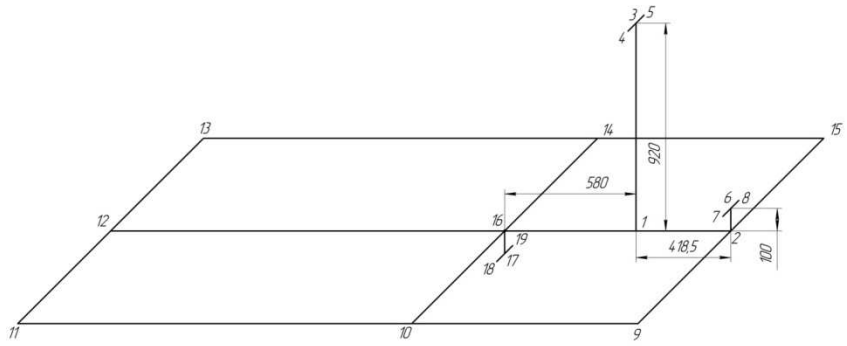


Рисунок 7 – Математична модель поворотної платформи ЕО – 4121

Початком відліку є точка 1, а нижче приведена таблиця значення координат всіх точок в просторі (відносно точки 1).

Таблиця 1 – Координати вузлів поворотної платформи

Номер вузла	Координати вузлів по осям		
	x, мм	y, мм	z, мм
1	0	0	0
2	418,5	0	0
3	0	920	0
4	0	920	20
5	0	920	-20
6	418,5	100	0
7	418,5	100	20
8	418,5	100	-20
9	418,5	0	580
10	-580	0	580
11	-2320	0	580
12	-2320	0	0
13	-2320	0	-580
14	-580	0	-580
15	418,5	0	-580
16	-580	0	0
17	-580	-100	0

Приведення до єдиної системи координат

Так як кожен елемент математичної моделі описується у власній локальній системі координат, то необхідно об’єднати всі елементи в глобальній системі координат.

Для того, щоб звести все до єдиної системи координат використовується матриця повороту.

Матриця повороту – матриця переходу, яка зв'язує між собою координати векторів векторного простору при зміні координатної системи, [2]

Вибір методу розрахунку

Так як вся конструкція екскаватора ЕО – 4121 була апроксимована до стрижньових елементів то для визначення внутрішніх силових факторів доцільно буде використати метод кінцевих елементів.

Розробка програмного забезпечення та робота програми

Комп’ютерна модель розробляється на язиці програмування Lua з використанням внутрішніх модулів програмного язика

Lua не містить поняття класу і об'єкту в явному вигляді, механізми об'єктно-орієнтованого програмування легко реалізуються з використанням мета таблиць.

Комп’ютерна модель буде реалізовуватися в програмі розробленій на кафедрі ПТМ ДДМА. Вікно програми представлено на рисунку 8.

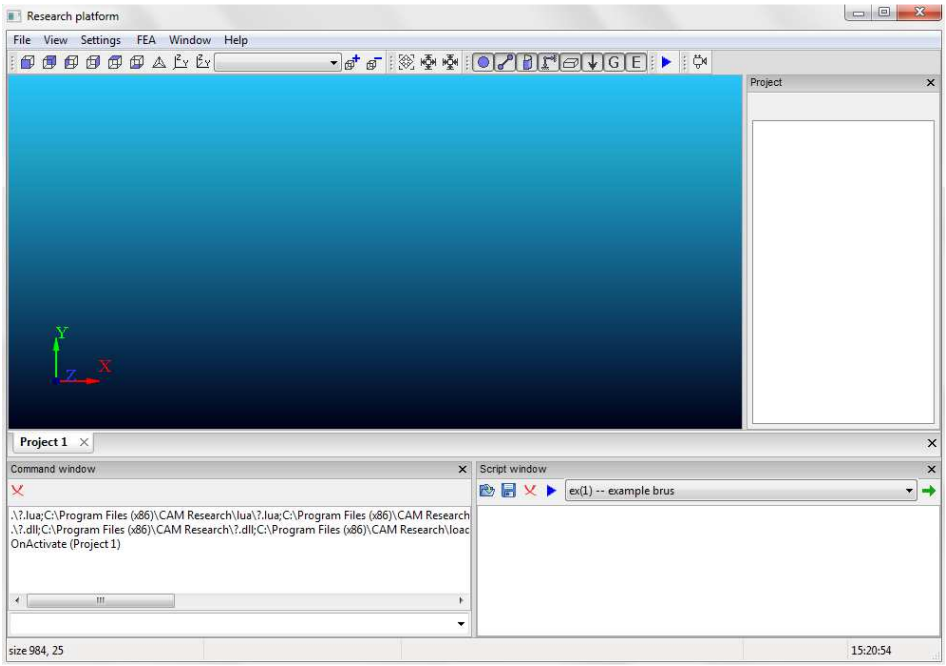


Рисунок 8 – Вікно програми

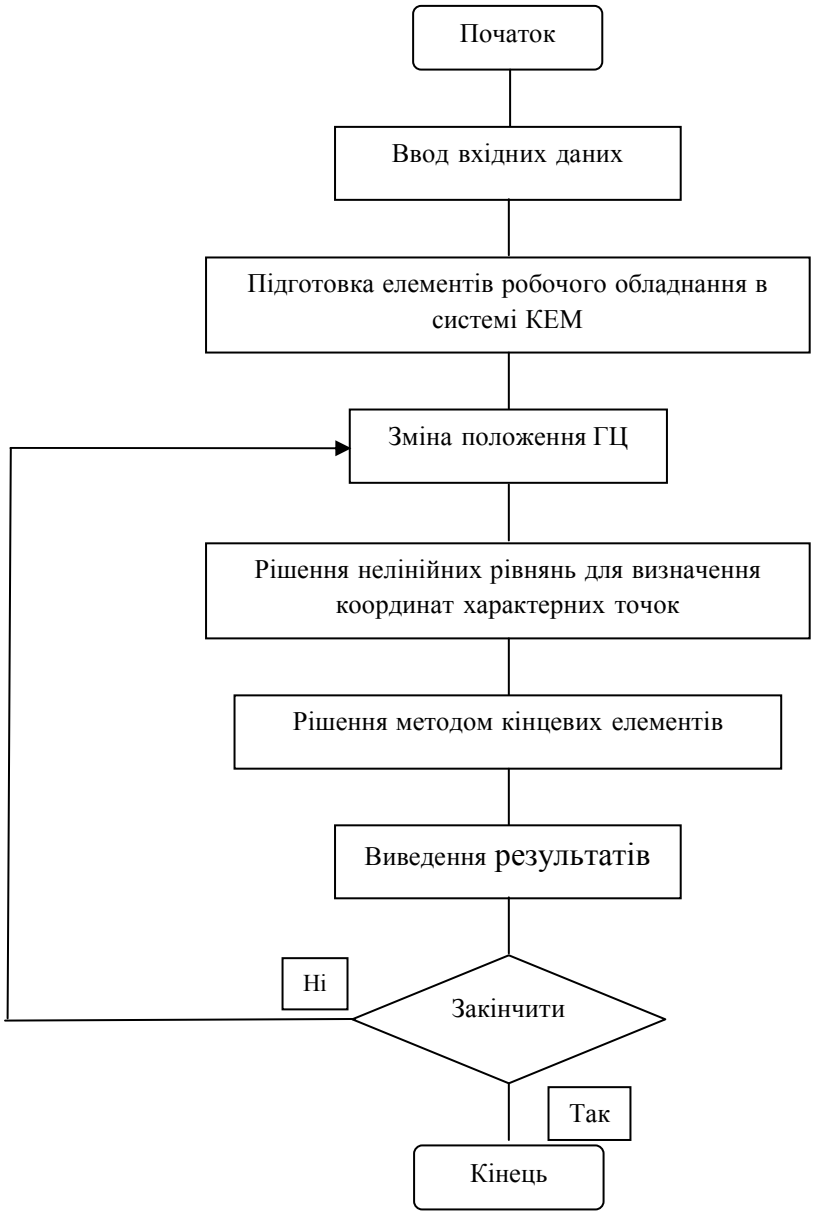


Рисунок 9 – Блок схема роботи програми

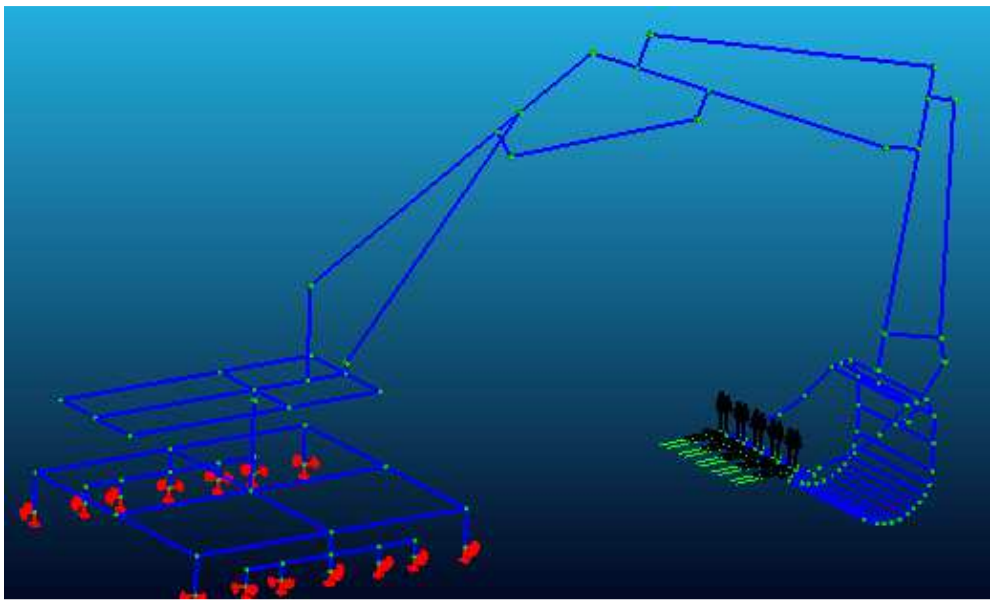


Рисунок 10 – Модель екскаватора у программі.

Дослідження та аналіз зусиль діючих на ходове обладнання

Використовуючи створену комп'ютерну модель проведено теоретичне дослідження зусиль діючих на ходове обладнання.

Зусилля визначаються для центральної частини ходового обладнання без врахування маси машини. Моделюється процес копання при копанні поворотом рукояті при копанні нижче рівня стояння.

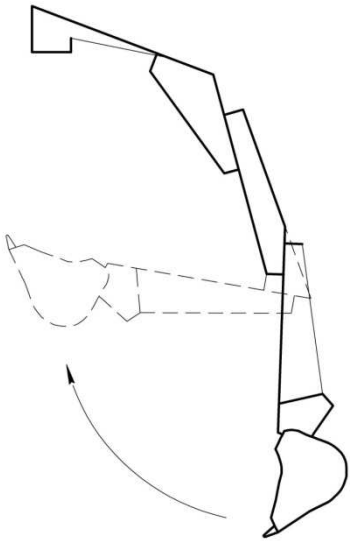


Рисунок 11 – Схема моделювання процесу копання при копанні поворотом рукояті

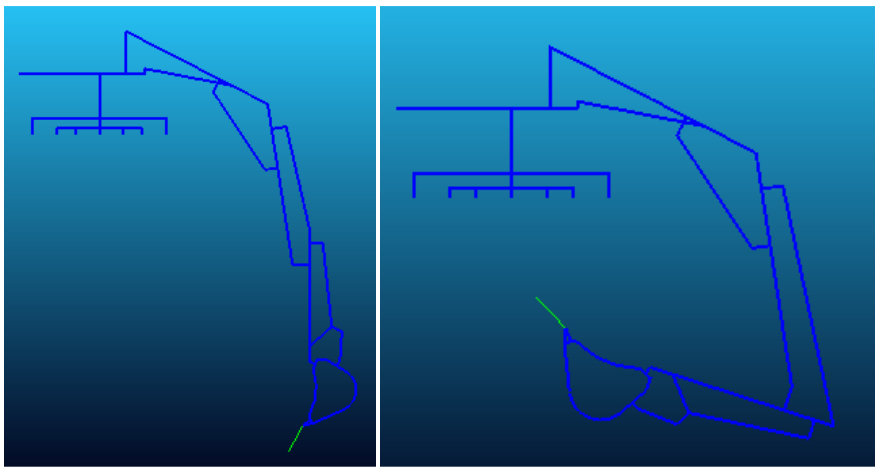


Рисунок 12 – Моделювання процесу копання поворотом рукояті при зміні довжини гідроциліндра тяги рукояті від мінімальної до максимальної довжини

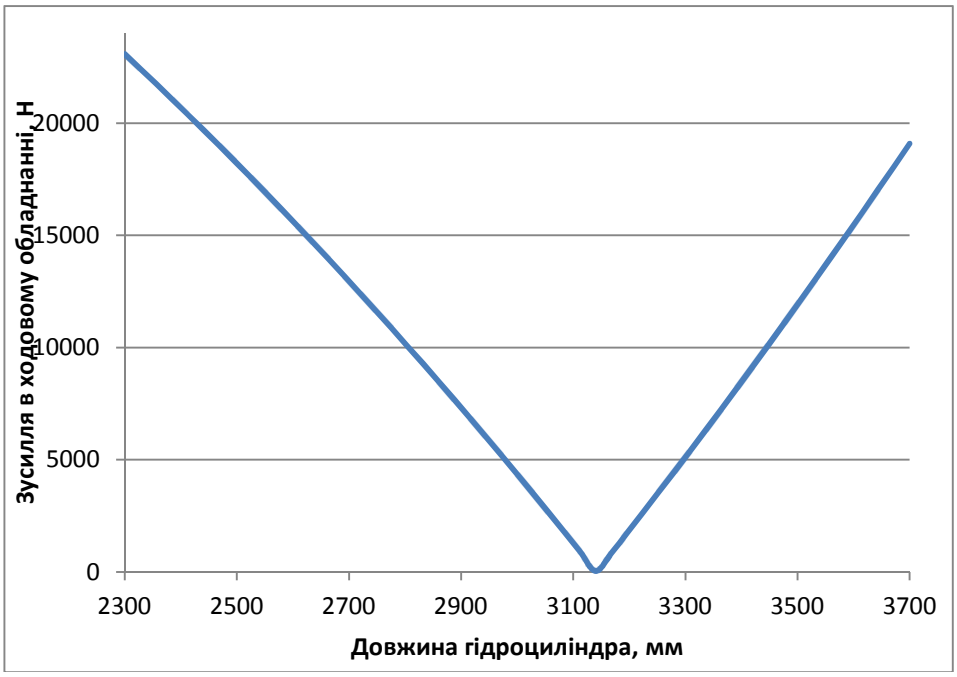


Рисунок 13 – Графік залежності зусиль при копанні поворотом рукояті

Аналізуючи графік можна зробити висновок, що зусилля які виникають в опорних катках та гусеничних ланках в центральній частині ходового обладнання мають майже лінійний характер, і при деякому положенні рукояті під час копання зусилля, які передаються від робочого обладнання дорівнюють нулю. (при розрахунку маса

машини не враховується). У відповідності з даною методикою можна провести дослідження навантажень на робоче и ходове обладнання гідравлічних та механічних екскаваторів в процесі їх взаємодії з зовнішнім середовищем.

Висновок: Створена математична модель екскаватора дозволяє проводити теоретичні дослідження силових параметрів механічних систем використовуючи в якості методу розрахунку метод кінцевих елементів. Використаний даний метод моделювання дозволяє швидко створити модель будь-якої машини та провести теоретичні дослідження впливу геометричних параметрів на силові фактори, що може бути дуже корисним на етапі ескізного проектування нової машини.

В статті було проведено дослідження з визначенням характеру навантаження на ходове обладнання екскаватора в залежності від положення робочого обладнання в процесі копання. При розрахунку зусиль маса машини, яка також створює навантаження на ходове обладнання не врахована, а розраховується тільки зусилля які передаються від робочого обладнання на ходове обладнання.

Перевагою даного типу моделювання є те, що можна отримати зусилля в будь якому вузлі при різних положеннях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Домбровский, Н.Г. Строительные машины (в 2-х ч.) Ч. II Учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Строит. и дор. Машины и оборуд. » – М.: Высш шк., 1985. – 224 с.

2. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. М.: Наука, 1981. - 718 с. *ISBN* 5-02-015115-7.

3. Агапов, В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкции / В.П. Агапов. М.: Мир, АСВ, 2004. *ISBN* 5-93093-303-0