

УДК 007.52

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/19>**Сазонов А.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Чередниченко В.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Черепанська І.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИКИ ТА СТАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
МОБІЛЬНОГО КРОКУЮЧОГО ЕВАКУАЦІЙНОГО РОБОТА**

У статті проаналізовано можливості і сфери використання крокуючих роботів, запропоновано прототип конструкції мобільного крокуючого евакуаційного робота для виконання складних завдань транспортування постраждалих людей в умовах надзвичайних ситуацій. Також, проведено аналіз запропонованої конструкції, надано розв'язання прямої задачі кінематики для вищезазначеного типу роботів і представлені результати моделювання для підтвердження працездатності запропонованого прототипу конструкції. У наступному пункті авторами буде проведено аналіз зазначеної проблеми, а саме евакуація постраждалих людей у результаті надзвичайних ситуацій, техногенних катастроф та інших випадків, що характеризуються складним ландшафтом, який підтверджує актуальність проведення досліджень у даній області. Далі у статті, авторами буде проведено аналіз існуючих варіанти мобільних крокуючих роботів та визначено їх переваги і недоліки. Опісля, для запропонованої конструкції мобільного крокуючого робота наведено розв'язок прямої задачі кінематики, в уніфікованому вигляді. Наступним, буде наведено розроблений авторами теоретичний прототип конструкції (тримірний модель) мобільного крокуючого робота, який повинен виконувати евакуаційні завдання у місцевості, яка має складний, нерівномірний рельєф. Окрім кінематики, у статті авторами проведено статичне дослідження прототипу розробленої моделі мобільного крокуючого робота, що ставило на меті утримати масу рівну 150 кг та більше. Такий вибір обумовлений тим, що середня вага середньостатистичної дорослої людини складає близько 90 кг. Окрім номінального навантаження, необхідна наявність так званого запасу міцності та стійкості, значення якого має складати дві треті від номінального навантаження. Для перевірки витривалості конструкції та проведення симуляційних досліджень було використано модуль Simulation у програмному забезпеченні Solidworks, який забезпечує детальне та якісне моделювання і тестування тривимірних об'єктів різних ступенів складності, надаючи можливість дослідження широкого спектру параметрів.

Ключові слова: твердотільне моделювання, пряма задача кінематики, крокуючий робот, градієнт навантажень, зміщення, евакуаційний.

Постановка проблеми. З кожним роком через зміни кліматичних умов, війни та експансію людства. Як наслідок ми все частіше зустрічаємось з надзвичайними ситуаціями, де головною перешкодою для порятунку людей стає рельєф [1–3]. Через це стандартні евакуаційні засоби, наприклад колісні носилки, неможливо, або дуже складно доставити до місця порятунку і, як наслідок, все більше і більше зростає потреба у механізмах, які здатні спростити або полегшити евакуаційні заходи при переміщенні вантажів або поранених по складному, нерівномірному рельєфу. Як один з можливих

варіантів реалізації такої проблеми, запропоновано використання мобільних крокуючих роботів, що на відміну від колісних мають можливість переміщуватись по пересічній місцевості за допомогою ніг.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Відомими прикладами крокуючих роботів є: Go 1 pro (рис. 1а) [4], Jueying (рис. 1б) [5], SPOT Mini [6] (рис. 1в), SDU SCalf-II (рис. 1г) [7]. За посиланнями, наведеними у літературі, можна переглянути більш детальні характеристики названих роботів. Слід відмітити, що вони непридатні для транспортування вантажу великої маси,

а висока швидкість їх переміщень призводить до втрати стійкості верхньої платформи, що є критичним для переміщення поранених при евакуації. Також, слід відзначити, всі вони мають досить високу вартість, що обмежує їх масове використання. Тому у статті запропонована і розглянута конструкція крокуючого чотириногого робота, метою розроблення якої є забезпечення достатньої вантажопід'ємності для умов евакуації та стабільності платформи. Також наведено розв'язання прямої задачі кінематики для даної конструкції.

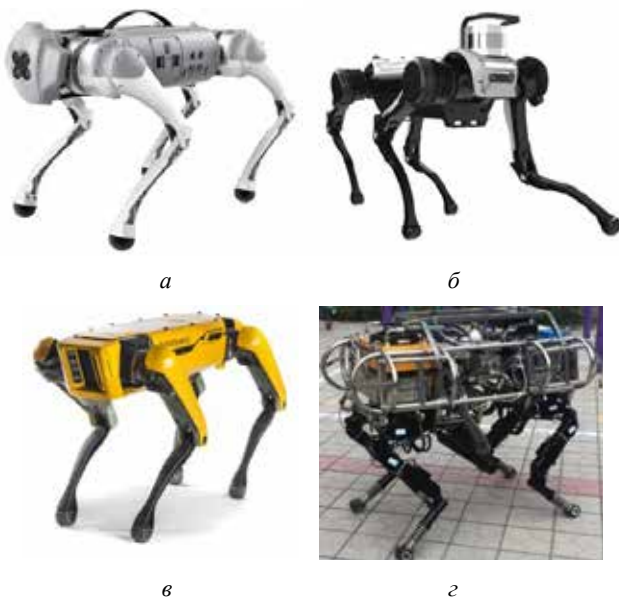


Рис. 1. Площини прикладання навантажень та місце фіксації моделі:

а – Go 1 Pro, б – Jueying, в – SPOT Mini, г – SDU SCalf-II [4-7; 8 с. 5, 6]

Постановка завдання. Дослідити пряму задачу кінематики для чотириногого крокуючого робота. Розробити конструкцію чотириногого крокуючого евакуаційного робота, який був би здатен витримати навантаження на верхню площину корпусу у 150 кг [9].

Пряма задача кінематики. Пряма задача кінематики необхідна для обчислення координат кінцевого положення останньої ланки робота. У нашому випадку, вона буде вирішуватись для ноги крокуючого робота. Як точку відліку виберемо центр мас нашої конструкції, її початкові координати $O(x_m, y_m, z_m)$. Шуканими будуть координати положення стопи робота, які відповідають точці $E(x_3, y_3, z_3)$. Створимо кінематичну модель ноги нашого робота (рис. 2) [10, с. 9].

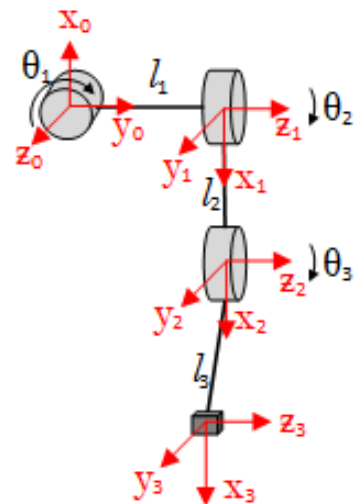


Рис. 2. Кінематична модель ноги

Запишемо матриці обертання для створеної схеми (рис. 2):
для з'єднання 0-1:

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

для з'єднання 1-2:

$$R_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

для з'єднання 2-3:

$$R_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Для наступних дій нам потрібні вектори зміщень, складемо їх:
для з'єднання 0–1:

$$d_1^0 = \begin{bmatrix} -s\theta_1 \cdot l_1 \\ -c\theta_1 \cdot l_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

для з'єднання 1–2:

$$d_2^1 = \begin{bmatrix} c\theta_2 \cdot l_2 \\ s\theta_2 \cdot l_2 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

для з'єднання 2–3:

$$d_3^2 = \begin{bmatrix} c\theta_3 \cdot l_3 \\ s\theta_3 \cdot l_3 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Отримавши матриці поворотів (1), (2), (3) і вектори зміщень (4), (5), (6), об'єднаємо їх у матриці гомогенних перетворень, скориставшись формулою (7).

$$H_m^n = \begin{bmatrix} R_{n+1}^n & d_{n+1}^n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де n – порядковий номер координатної системи виконавчого механізму.

Результуючу матрицю гомогенних перетворень знайдемо за формулою (8).

$$H_3^0 = H_1^0 \times H_2^1 \times H_3^2. \quad (8)$$

Остаточний результат наведено у (9).

$$H_3^0 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де h_{nm} – елементи матриці H_3^0 (n – номер рядку, m – номер стовпця), що вказані у таблиці 1.

Таблиця 1

Елемент матриці	Формула
1	2
h_{11}	$-\cos\theta_1 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_3)$
h_{12}	$\cos\theta_1 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3)$
h_{13}	$-\sin\theta_1$
h_{14}	$-\cos\theta_1 \cdot (\cos(\theta_2 - \theta_3) \cdot l_3 + \cos\theta_2 \cdot l_2) - \sin\theta_1 \cdot l_1$

Закінчення таблиці 1

h_{21}	$-\sin\theta_1 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_3)$
h_{22}	$\sin\theta_1 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3)$
h_{23}	$\cos\theta_1$
h_{24}	$-\sin\theta_1 \cdot (\cos(\theta_2 - \theta_3) \cdot l_3 + \cos\theta_2 \cdot l_2) - \cos\theta_1 \cdot l_1$
h_{31}	$\sin(\theta_2 + \theta_3)$
h_{32}	$\cos(\theta_2 - \theta_3)$
h_{33}	0
h_{11}	$\sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot l_3 + \sin\theta_2 \cdot l_2$
h_{41}	0
h_{42}	0
h_{43}	0
h_{44}	1

Крім матриць гомогенних перетворень, на основі (рис. 2) складемо таблицю параметрів Денавіта-Хатенберга (таблиця 2).

Таблиця 2

	θ	α	r	d
1	$\theta_1 - 180^\circ$	90°	l_1	0
2	θ_2	0	l_2	0
3	θ_3	0	l_3	0

Опис запропонованої конструкції.

Для рішення поставленої задачі, а саме транспортування вантажів великої маси (враховуючи відносність поняття «велика» зауважимо, в нашому випадку під цим поняттям розглядаються маса m від 150 кг до 200 кг включно) по складному рельєфу нами було розроблено прототип конструкції крокохода (рис. 3).

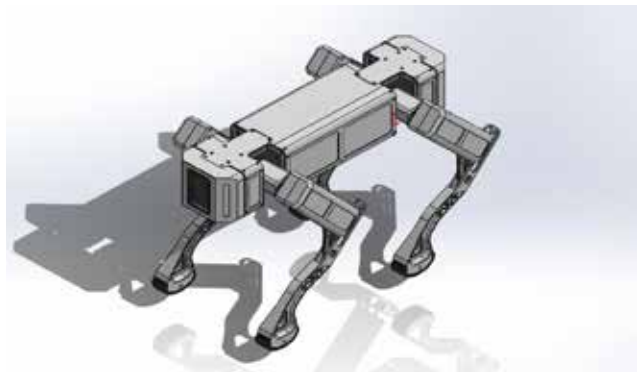


Рис. 3. Модель прототипу конструкції, ізометрія

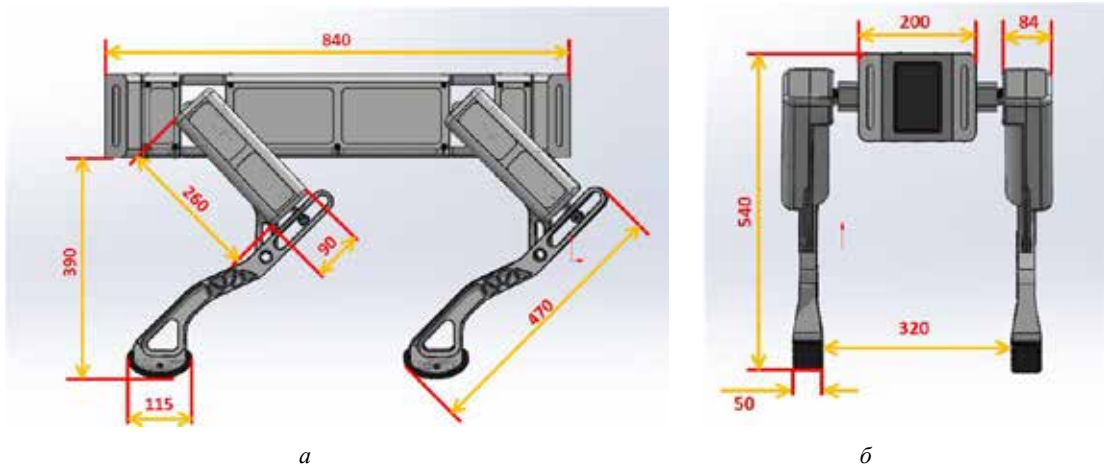


Рис. 4. Модель прототипу конструкції: а – вид збоку, б – вид спереду

Основні параметри конструкції наведено на (рис. 4 а, б). У якості основного матеріалу, з якого виготовлено деталі робота, використовується ABS пластик, що має високу міцність. Основи нижніх кінцівок робота виготовлені з гуми, для забезпечення стійкості і зменшення ймовірності проковзування на слизьких поверхнях.

Корпус можна умовно поділити на три частини: передню, центральну і задню. Центральна частина містить електронні компоненти системи керування роботом. Завдяки симетричності корпусу та наявності декількох кріплень передня та задня частини уніфіковані, що є однією із основних вимог гнучкого автоматизованого виробництва при їх масовому виготовленні. Передня частина використовується для монтажу сенсорних систем, що використовуються для навігації у просторі на основі візуальних даних, а задня для закріплення кнопки вмикання/вимикання живлення, портів введення/виведення даних та живлення. Запропонована форма ноги (рис. 5) дозволяє підвищити вантажопід'ємність робота, розподіляючи навантаження між ребрами жорсткості. Ближче до стопи, ширина ноги збільшується, що збільшує загальну стійкість конструкції як у статичному положенні, так і в динамічному.



Рис. 5. Модель прототипу ноги робота, вид збоку

Верхні кришки корпусу змінні, що забезпечує модульність конструкції, яка також є однією

із вимог сучасного гнучкого автоматизованого виробництва і дозволяє встановити додаткове обладнання (наприклад, додаткові камери, вантажні платформи тощо). Дана можливість, в свою чергу, підвищує універсальність та варіативність застосування робота.

Дослідження конструкції

Середовище моделювання: Дослідження статичного навантаження були проведені у модулі SolidWorks Simulation. Вибір обумовлений наявністю широкого спектру можливостей моделювання об'єктів та фізичних процесів і явищ.

Опис дослідження: Завданням моделювання є перевірка вантажопід'ємності робота, враховуючи що середня m тіла людини сягає 150 кг і більше, перевірка здатності конструкції витримувати прикладені навантаження P , які не передбачено стандартними умовами експлуатації. Як точку відліку, назвемо її O , візьмемо центр верхньої площини середньої кришки (верхньої). Всі результати будуть розглядатись відносно неї. Місця прикладання навантажень, позначені у вигляді площин, наведено на (рис. 6)

Результати досліджень

Дослід № 1 імітує стандартне навантаження робота, що транспортує вантаж, у такому випадку верхня платформа робота навантажена рівномірно $m=25\dots250$ кг (рис. 6, а). За таких умов спостерігається дефект центральної частини, проте він легко усувається, наприклад, створенням додаткових ребер жорсткості. Під максимальним навантаженням P_{max} (250 кг, ідентичне для всіх дослідів) тіло робота зазнало зміщення u приблизно на $-32,00$ мм, але інших суттєвих деформацій не виявлено, окрім вище зазначеної, що підтверджується (рис. 7 а) та (рис. 8 а, б). В умовах навантаження мінімальною масою P_{min} (25 кг, ідентичне

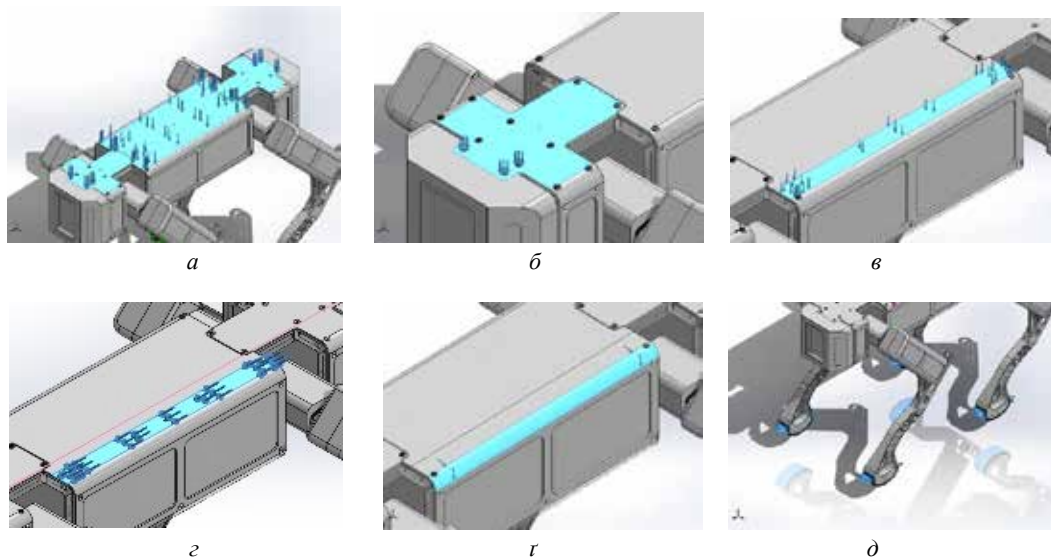


Рис. 6. Площини прикладання навантажень та місце фіксації моделі:
а – дослід 1, б – дослід 2, в – дослід 3, г – дослід 4, д – місце фіксації

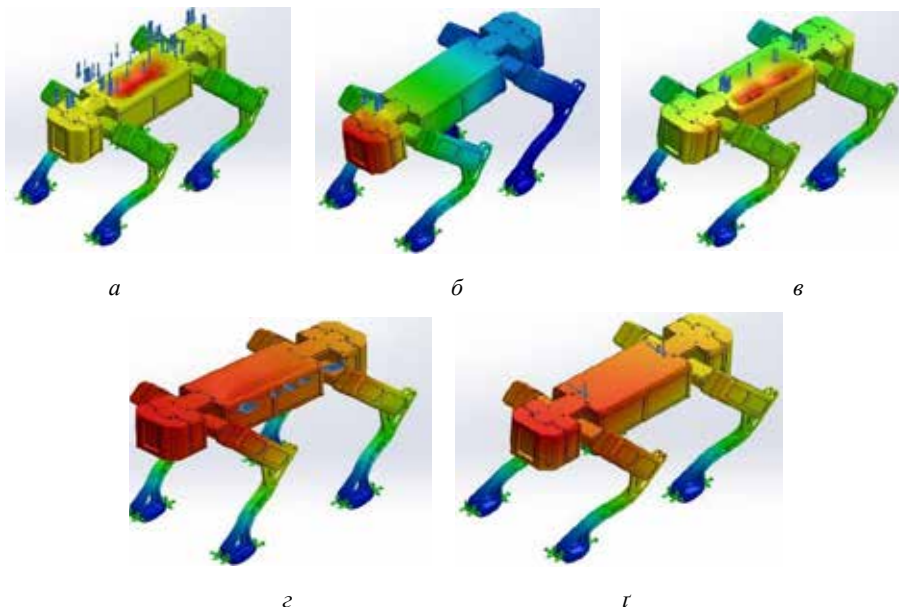


Рис. 7. Градієнти зміщень:
а – дослід 1, б – дослід 2, в – дослід 3, г – дослід 4, д – дослід 5

для всіх дослідів) $u = -3,20$ мм. Отже, дослід № 1 підтверджує придатність конструкції для утримання $P = 150$ кг за стандартних умов експлуатації робота.

Дослід № 2 відтворює ситуацію зміщення вантажу по довжині лівіше центральної точки, або нерівномірного навантаження верхньої площини робота (рис. 6 б), . Такий випадок є стандартним для вантажних платформ, а тому обов'язковий для перевірки. Під час проведення дослідів суттєвих дефектів чи деформацій не виявлено (рис. 7 б). максимальне зміщення $u_{max} = -27,42$ мм і відповідає нахилу тіла конструкції під навантаженням,

яке можна вважати стандартною реакцією під час статичного дослідження. Мінімальне зміщення $u_{min} = -2,55$ мм, його можна вважати несуттєвим. Дослід № 2 підтверджує можливість конструкції витримувати нерівномірне навантаження верхньої площини робота масою, що вказана вище.

У досліді № 3 перевірялась реакція конструкції на навантаження, яке не передбачено стандартними умовами експлуатації, проте є імовірним за певних екстремальних умов на (рис. 6, в). Тут навантаження є нерівномірним і сконцентроване на невеликій площі передньої частини платформи. Із (рис. 7 в) видно, що конструкції

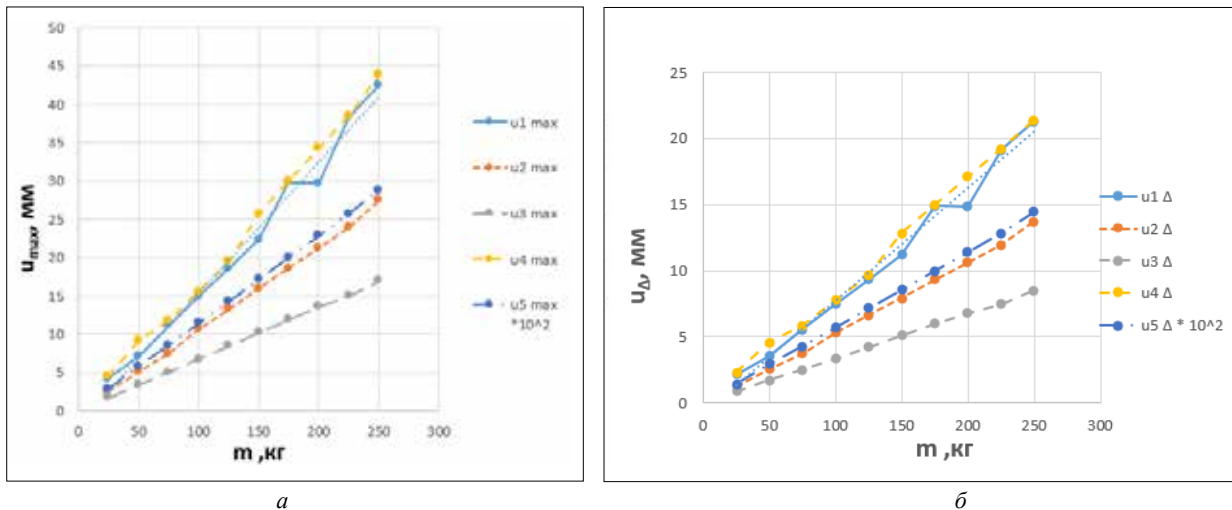


Рис. 8. Графіки зміщень:
а – максимальних, б – середніх

нахилилась вбік прикладання навантаження і весь корпус в середньому $u = -8,50$ мм під P_{min} (250 кг) та $u = -0,84$ мм під P_{min} (25 кг). Під P_{max} нахил склав близько -15 мм, у той час під P_{min} він становив приблизно $-1,51$ мм. Слід відзначити, на (рис. 7 в) можна спостерігати помірну деформацію однієї сторони корпусу і знайомий з дослідом № 1 дефект (рис. 5, а). Висновок, хоч конструкція і витримала збурення, все ж, такий тип прикладання навантаження є небажаним під час використання робота.

Дослід № 4 є частковим випадком досліду № 3, P прикладаються під кутом 45° (рис. 6, г). Такий

випадок також не відповідає стандартним умовам експлуатації робота, але все ж імовірний. Як показують результати (рис. 7 г), у такому випадку верхня кришка може зазнати деформації, а сам робот, враховуючи, що: $u_{min} = 4,50$ мм та $u_{max} = 42,8$ мм відносно початкової позиції буде виведено зі стану рівноваги. Даний випадок потребує подальших додаткових досліджень щодо стабілізації конструкції.

Дослід № 5 відтворює прикладання моменту сили до верхньої частини корпусу під кутом 45° (рис. 6, г). Такий випадок можливий при спробі силового впливу на конструкцію робота (штов-

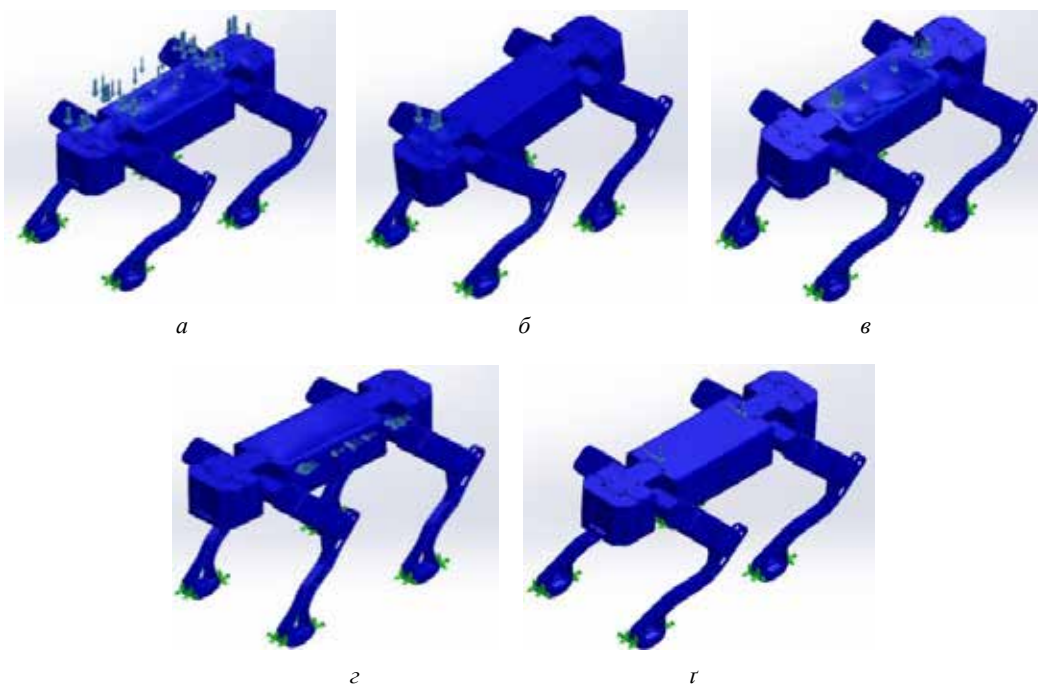


Рис. 9. Градієнти напружень:
а – дослід 1, б – дослід 2, в – дослід 3, г – дослід 4, г – дослід 5

хання). Навіть під час першої ітерації досліду ($P_{min}=25$ кг) спостерігається значне $u=-28$ мм та його десятикратне збільшення під P_{max} (рис. 7, г), що свідчить про гарантоване виведення конструкції зі стану рівноваги та неприпустимість таких дій. Аналогічно четвертому досліду, методи компенсації такого навантаження потребують подальших досліджень.

Проаналізуємо напруження (рис. 9). Беручи до уваги, що градієнт розподілу навантажень рівномірний та відповідає лише мінімальним значенням, нас будуть цікавити лише мінімальні значення σ_{min} . Ті, що відповідають (σ_{max}) мають точковий характер та несуттєвий вплив на запропоновану конструкцію робота.

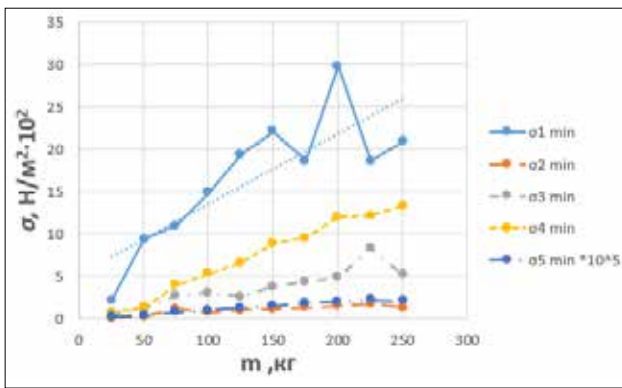


Рис. 10. Графіки мінімальних напружень

Значення σ_{min} (рис. 10) можна вважати достовірними, бо лише графік першого дослідів потребував кореляцію, всі інші мають стабільний та, в цілому, пропорційний приріст.

Як було зазначено раніше, градієнт розподілу напружень рівномірний та однотонний, наявність відхилень від цієї парадигми виключно точковий і, у той же час, мінімальний. Можна стверджувати, що відносно показників напружень конструкцію можна вважати надійною.

Висновки. Як показують дослідів № 1 і № 2, найбільша деформація ($u_{max}=-32,00$ мм і $u_{max}=-27,42$ мм відповідно) спостерігається в околі точки О, отже у наступних моделях конструкції ця зона потребує додаткового підсилення, наприклад, шляхом встановлення опор або додаткових ребер жорсткості. Проте вказаний прояв не є критичним і конструкція все ж витримує $P_{max}=250$ кг, що також підтверджується дослідів № 3, 4 і 5. При проведенні вказаних дослідів чітко видно, що робот здатен витримувати більш екстремальні навантаження. Наприклад, результати дослідів № 2, 3, 4 та 5 доводять, що конструкція робота стійка до нерівномірно прикладених зусиль відносно центральної точки корпусу.

Водночас аналіз конструкції відносно напружень вказує на те, що градієнт розподілу вищезазначеної величини є рівномірним та однотонним, екстремуми відсутні, а наявність відхилень точкова і, у той же час, мінімальна. На підставі цього можна стверджувати, що відносно показників напружень конструкція вважається надійною.

Остаточо, враховуючи завдання моделювання, а саме стійкість до прикладених навантажень, можна вважати, що конструкція витримує $P=150$ кг, що відповідають середній вазі дорослої людини [9], та має відповідний запас на рівні більше 20%.

Список літератури:

- КОМЕНТАРИИ.UA. Приклад руйнувань у Бородянці. URL: <https://kyiv.comments.ua/news/society/developments/9080-v-borodyanke-nachali-razbirat-zavaly-strashno-dazhe-spatatelyam-foto-video.html> (дата звернення 25.06.2022).
- LB.ua. Руйнування школи після ракетного удару по Житомирській області. URL: https://lb.ua/society/2022/03/04/507940_zhitomiri_vorog_vdariv_shkoli.html (дата звернення 25.06.2022).
- LancsLive URL «Mountain rescuers scrambled to Scafell Pike in dramatic 22-person Lake District operation». URL: https://www.lancs.live/news/local-news/mountain-rescuers-scrambled-scafell-pike-23836020?utm_source=linkCopy&utm_medium=social&utm_campaign=sharebar (дата звернення 25.06.2022).
- Офіційний сайт unitree. Інформаційна сторінка робота Go1. URL: <https://shop.unitree.com/products/unitreeyushutechnologydog-artificial-intelligence-companion-bionic-companion-intelligent-robot-go1-quadruped-robot-dog>
- Офіційний сайт deeprobotics. Інформаційна сторінка робота Jueying. URL: https://www.deeprobotics.cn/en/products_jy_302.html
- Офіційний сайт bostondynamics. Інформаційна сторінка робота Spot. URL: <https://www.bostondynamics.com/products/spot>
- Hui Chai. Research and implementation on compliance and force control of hydraulically actuated quadruped robot. Jinan: Shandong University, 2016: 15–18. (in Chinese) DOI:10.1177/1729881418813235
- He and Gao Chin. J. Mech. Eng. (2020) 33:79 <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00485-9>

9. Medically reviewed by Alana Biggers, M.D., MPH – Written by James Roland – Updated on March 7, 2019. URL: <https://www.healthline.com/health/mens-health/average-weight-for-men>

10. A Sprowitz, A Tuleu, M Vespignani, et al. Towards dynamic trot gait locomotion: Design, control, and experiments with Cheetah-cub, a compliant quadruped robot. The International Journal of Robotics Research, 2013.

Sazonov A.Yu., Cherednychenko V.I., Cherepanska I.Yu. SIMULATION OF KINEMATIC AND STATIC PARAMETERS OF MOBILE WALKING RESCUE ROBOT

The article will consider the potential and application spheres for the walking robot, and present an analysis of the prototype construction of a mobile walking robot capable of transporting injured people in emergencies. Also, we will introduce forward kinematics for the above-mentioned type of robots and the simulation results to confirm the operability of the proposed prototype design. Further, the authors will conduct an analysis of the specified problem, namely the evacuation of injured people as a result of emergencies, and man-made disasters, characterized by a complex landscape, which confirms the relevance of conducting research in this area. After all, the authors will analyze the existing variants of mobile walking robots and determine their advantages and disadvantages. Then, for the proposed design of the mobile walking robot forward kinematics will be introduced in a unified form. Next, the theoretical prototype design (three-dimensional model) of the developed mobile walking robot will be presented. In addition to that, the article conducted a static study of the prototype of the developed model of a mobile walking robot, which aimed to maintain a mass equal to 150 kg or more. This choice was made since the average weight humane is about 90 kg. In addition to the nominal load, it is necessary to have a so-called margin of strength and stability, a value that should be two-thirds of the nominal load. Structure durability test will be performed in the Solidworks Simulation module, which provides qualitative modelling and testing of three-dimensional objects and the ability to study a wide range of parameters.

Key words: *solid modeling, forward kinematics, walker, load gradient, displacement, evacuation.*