

УДК 629.341

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.68

МОДЕЛЮВАННЯ ХОДОВОГО ОБЛАДНАННЯ МОБІЛЬНИХ ПІДЙОМНИКІВ

Кириченко І. Г., Черніков О. В., Корецький Я. Г.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті наведено результати розроблення цифрової тривимірної моделі самохідного телескопічного підйомника, а також проаналізовано віртуальні дослідження щодо керування рухом машини за різних положень ходового обладнання.

Ключові слова: мобільний підйомник, комп'ютерне моделювання, віртуальний експеримент, адекватність моделі, Autodesk Inventor.

Вступ

Мобільні підйомники з робочими платформами (МПП), або за міжнародними стандартами Mobile Elevating Work Platform (MEWP) ISO 16368:2010, застосовують в таких галузях, як зведення й обслуговування ліній електропередач та зв'язку, комунальне господарство та будівництво, обслуговування вітропарків аварійно-рятувальні роботи тощо. Ці машини повинні мати високу мобільність, тому вони агрегатуються з автомобільними шасі або мають власне колісне ходове обладнання. Однією з головних вимог, що висуваються до проектування таких машин, є забезпечення стійкості та безаварійності здійснення технологічних операцій. Більшість машин оснащені аутригерами, які забезпечують необхідні параметри стійкості. Але останнім часом з'являються конструкції МПП, в яких стійкість як у транспортному, так і в робочому процесі забезпечується безпосередньо конструкцією ходового обладнання. МПП мають тенденцію до стрімкого розвитку завдяки досягненням у царині гідравтоматики.

Аналіз публікацій

А сьогодні американська компанія JLG є всесвітньо відомим виробником таких машин та активно просуває їх на ринку. Її продукція налічує 28 моделей самохідних машин з дизельними двигунами та 30 моделей з електричним та гібридним приводом ходового обладнання. Підйомники JLG обладнані системами захисту від небезпечних ситуацій: Soft Touch (м'якого торкання) та Sky Guard (аварійного опускання робочої платформи). У номенклатурі продукції цієї компанії є декілька варіантів конструктивного ходового обладнання, що забезпечує високу маневреність пересування машин і гарантує необхідну стійкість під час підйому робочої платформи [1]. Саме тому моделювання таких ма-

шин є предметом віртуальних досліджень, зокрема з метою вдосконалення конструктивного в ходового та робочого обладнання.

Самохідні стрілові й пантографні підйомники JLG не мають аутригерів (рис. 1), але забезпечують можливість підйому на висоту до 50 метрів. Пневмоколісне ходове обладнання, крім поворотних коліс, має ще й поворотні балки, які можуть обертатися на кути до 30 градусів і змінювати колію цих машин, що так само збільшує контур опорної поверхні та гарантує необхідну стійкість машини від перекидання. Система автоматичного контролю стійкості дозволяє рухатися вздовж об'єкта з оператором на робочій платформі, а також здійснювати підйом на безпечну висоту.



Рис. 1. Стріловий і пантографний підйомники JLG

Отже, маємо дослідницькі завдання, які потрібно вирішувати конструкторам на стадіях проектування машин. Це насамперед розрахування стійкості як в робочому, так і в транспортному режимах; зменшення маси металоконструкцій робочого обладнання та приводів керування як запорука збільшення стійкості машин; впровадження пропорційного гідророзподільного керування, що зменшує навантаження в разі зупинення руху робочої платформи. Більшість з цих дослідницьких питань може бути вирішена за допомогою тривимірних моделей, розроблених у пакеті Autodesk Inventor [2] з використанням середовища Dynamic Simulation. У попе-

редніх дослідженнях викладачів, аспірантів і студентів механічного факультету вже отримані позитивні результати комп'ютерного моделювання таких машин, як автогрейдери, навантажувачі, скрепери і МПРП [3, 4]. Спочатку моделювання МПРП було спрямовано на відтворення траєкторій руху складових елементів робочого обладнання, визначалися швидкості та прискорення в шарнірних з'єднаннях підйомного устаткування, здійснювався кінематичний і силовий аналіз робочого обладнання МПРП різноманітних конструктивних типів [5–7]. У роботах проаналізовано моделювання та віртуальні дослідження реального технічного об'єкта, що знаходиться на полігоні механічного факультету. Була відтворена геометрія металоконструкції і привода керування. Результати комп'ютерного моделювання порівнювалися з даними, отриманими на реальній машині [8–10]. Аналіз цих досліджень демонструє, що адекватність моделювання за розробленою методикою дозволяє продовжувати віртуальні дослідження машин, що проєктуються.

Мета та постановка завдання

Досвід комп'ютерного моделювання технологічних машин, зокрема МПРП, дозволяє дійти певних висновків щодо підвищення ефективності створення моделей і здійснення віртуальних досліджень. Тому було прийнято рішення розподілити увесь комплекс завдань, що вирішуються, на кластери, в яких можна отримувати достовірну інформацію за мінімальних термінів розроблення самих моделей, а також за умови найменшого навантаження програмних засобів. У цьому випадку актуальним є завдання розроблення комп'ютерної моделі ходового обладнання для дослідження маневреності МПРП. У процесі моделювання потрібно відтворити повну геометрію рамних металоконструкцій і гідроприводу керування, швидкості руху, а також забезпечити моделювання масових характеристик як для шасі, так і для всієї машини.

Геометричне моделювання шасі МПРП

Геометричне моделювання здійснювалося за обмежених вихідних даних. Так, наприклад, товщина металевих деталей рами визначалася на основі експертного обговорення з фахівцями відповідного профілю. Властивості матеріалу деталей не враховувалися, зварювання не моделювалося. Але водночас

геометрія рами і всіх складових відтворювалася майже в тих розмірах і конфігураціях, що має реальний об'єкт. Спочатку була розроблена модель головної рами (рис. 2).

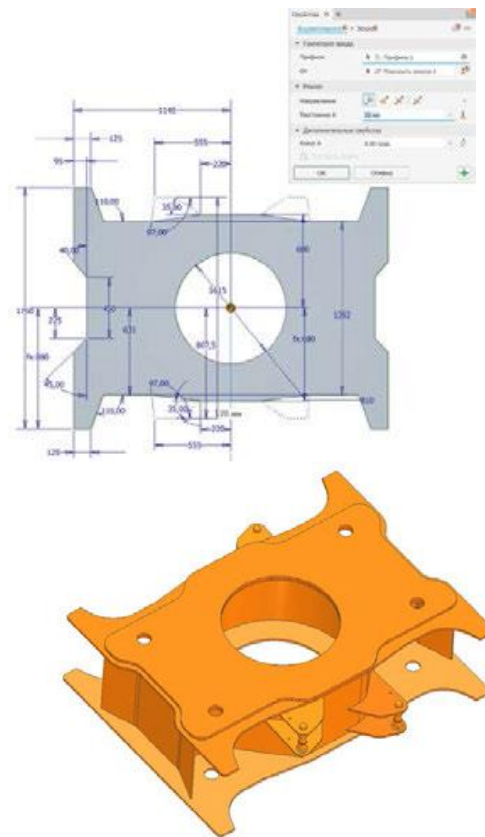


Рис. 2. Ескіз та комп'ютерна модель головної рами

Також були розроблені моделі поздовжніх балок, вузла кріплення коліс і самих коліс. Кожне колесо самохідного шасі має свій окремий привід від гідромотора. Гідромотор змодельований як геометричний об'єкт, що має масу. Процеси, що здійснюються в гідромашинах (гідромотори та гідроциліндри), не моделюються. Найбільш складним процесом є моделювання колеса, яке складається з двох частин – металевої і гумової (рис. 3). У попередніх спробах моделювання ходових пневматичних коліс були певні труднощі, тому паралельно з комп'ютерними, були проведені експерименти на фізичних моделях. Inventor дозволяє враховувати характеристики матеріалів, задавати навантаження, модифікувати параметри сітки кінцевих елементів, що дозволяє підвищити якість рішення, розглянути різні варіанти. Крім того, підтримується здійснення декількох типів динамічного та кінематичного аналізів з автоматичним або ручним способом завдання з'єднань та контактів. Візуалізація моделі допомагає визначити тип взаємодії елемен-

тів конструкції під час роботи досліджуваного компонента та його експлуатаційні характеристики. [11].



Рис. 3. Загальний вигляд колеса та його комп'ютерна модель

Моделювання шини здійснювалося з елементів, прикріплених один до одного, із використанням сферичного (або обертального) контакту з завданням коефіцієнта тертя, який відтворює властивості гумового каркаса, та пружинним з'єднанням, що моделювало пружність колеса. Збільшення кількості таких елементів дозволяє змодельовати реальний прогин шини, але за умови суттєвої потужності комп'ютера. Для з'єднання зазначених елементів також була змодельована маточина колеса зі спеціальними елементами для використання пружинного з'єднання.

Конструкція коліс МПРП такого типу, що розглядається в цій статті, суттєво відрізняється від пневматичної шини. Пневматична складова в цьому колесі повністю відсутня, а деформація гумового елемента значно менша, як порівняти з колесом традиційного типу. Її можна назвати «абсолютно жорсткою», тому контакт з опорною поверхнею моделюється лінією, а не площиною. Це припущення дозволяє спростити технологію моделювання та прискорити процес комп'ютерних розрахунків під час проведення цифрових досліджень.

Металоконструкція шасі МПРП збирається з таких елементів: головна рама, чотири поворотні балки, які шарнірно з'єднуються з рамою, а також гідроциліндри повороту ба-

лок. Кожна з балок має можливість повороту незалежно від інших. Застосування процедури моделювання рамних конструкцій (генератора рам) дозволяє за розробленою каркасною конструкцією (яка може складатися з відрізків, дуг та кіл) створювати металоконструкції, оперативно редагувати форму та розміри використовуваного профілю, створювати правильні стики елементів. Моделювану конструкцію можна розрахувати на міцність за допомогою модуля «Аналіз рам». Якщо буде потреба, розміри та профіль елементів можна швидко скоректувати. Під час моделювання металоконструкції шасі здійснюють накопичування банку даних складових частин (модулів), щоб у разі необхідності змінювати конструктивний процес технічного об'єкта з метою його вдосконалення. Таким чином, попередні випробування декількох моделей шасі МПРП дозволить вибрати найкращий з варіантів щодо маневреності, стійкості, або інших показників машин цього класу (рис. 4).

Після створення всіх моделей для перевірки правильності складання та можливостей керування основними елементами шасі було створено форму iLogic, яка дозволила змінювати як кути повороту окремих поздовжніх балок машини, так і окремо її коліс (рис. 5).



Рис. 4. Екранне вікно та модель шасі

Для подальших досліджень модель стала об'єктом середовища динамічного моделювання, де були задані основні рушійні залежності відповідно до особливостей, що розглянуті в [11].

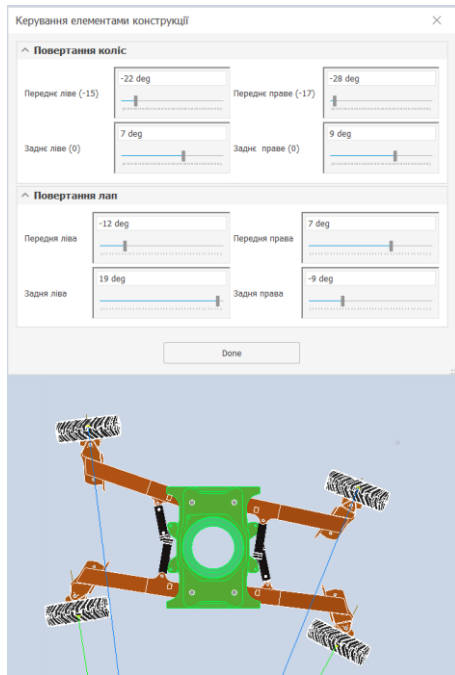


Рис. 5. Керування кутами повороту

На останньому етапі було встановлено 3D-контакти між дорогою і кожним із зовнішніх елементів колеса за допомогою функції «3D-контакт» і задано 3 основні параметри цього з'єднання: величини жорсткості, демпфірування та коефіцієнт тертя.

Результати віртуальних досліджень та їхній аналіз

Реальний технічний об'єкт має можливість здійснення транспортних операцій з персоналом, який розміщено на робочій платформі. Швидкість пересування регламентується положенням стрілового обладнання. Маневреність самохідного шасі МПРП визначалася для декількох положень поздовжніх шарнірних балок, а також для трьох кутів положень керованих коліс. Крім того, машина та її комп'ютерна модель мають змогу маневрувати за трьома незалежними схемами: це класичний механізм повороту колісних машин типу 4x2, поворот всіма чотирма колесами (на передньому і задньому мостах в протилежні боки), а також поворот всіх коліс в один бік, так званий, «крабовий хід». За допомогою комп'ютерної моделі можна моделювати швидкість руху й пересування за заданим профілем дороги. На реальній машині ведучими колесами є задні, які починають рухатися завдяки двом гідромоторам. Функції диференціала здійснює система автоматичного гідроприводу. Моделювання цих функцій здійснюють частково в Autodesk Inventor.

На рис. 6 наведено траєкторії руху геометричного центру платформи та центрів коліс.

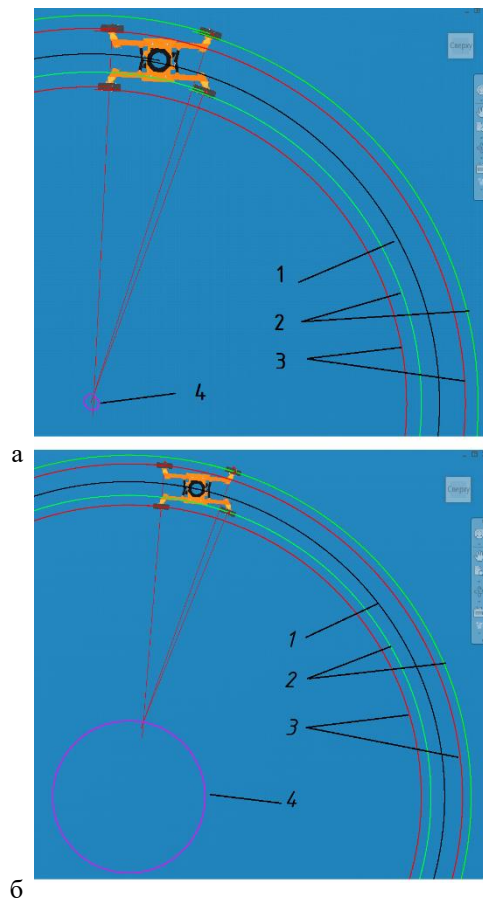


Рис. 6. Керування кутами повороту: а – задано обертання тільки задніх коліс, б – задано обертання передніх і задніх коліс; 1 – траєкторія руху центра платформи, 2 – траєкторії передніх коліс, 3 – траєкторії задніх коліс, 4 – траєкторія миттєвого центра повороту

Балки розташовано вздовж осі машини, кут повороту лівого переднього колеса – 15° , кут правого колеса визначено з використанням миттєвого центра повороту – він становить 17.15° . Також було задано однакову швидкість обертання коліс. Експерименти дозволили визначити радіуси повороту машини, а також продемонстрували, що необхідно розрахувати швидкості обертання коліс відповідно до довжини шляху, який вони мають проїхати під час руху. Мінімальний радіус повороту можна отримати в процесі розташування поздовжніх балок, що забезпечують найменшу колію, він становить 6,8 м, якщо кількість керованих коліс дорівнює 2 м, та 2,2 м, якщо кількість керованих коліс дорівнює 4-м. Збільшення колії до максимального значення призводить до зростання радіуса повороту в 1,5 раза. В експерименті,

схема якого наведена на рис. 7, змінено положення балок.

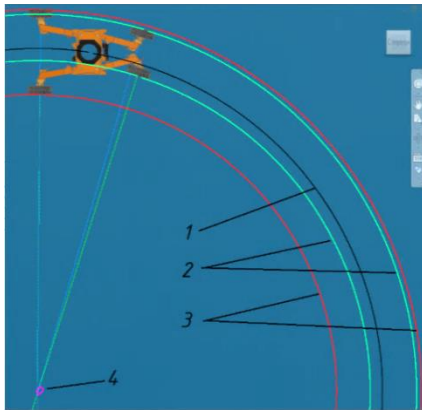


Рис. 7. Керування кутами повороту (змінено положення балок): 1 – траєкторія руху центра платформи, 2 – траєкторії передніх коліс, 3 – траєкторії задніх коліс, 4 – траєкторія миттєвого центра повороту

Висновки

Комп'ютерна модель дозволила визначити залежності радіусів повороту МПРП від геометричних конструктивних параметрів шасі, а також від схем повороту та положення поздовжніх балок.

Віртуальні дослідження варто проводити на спеціалізованих комп'ютерних моделях у відповідних кластерах, що призначені саме для вирішення конкретних науково-технічних і проектно-конструкторських задач.

Література

- 1850SJ Ultra Series Telescopic Boom Lift. URL: <https://www.jlg.com/en-gb/equipment/engine-powered-boom-lifts/telescopic/ultra-series/1850sj>
- Shawna Lockhart, Daniel T. Banach & Travis Jones Autodesk Inventor 2021 Essentials Plus. SDC Publications. 2020. 534 p.
- Об'ємний гідропривід в мобільних підйомниках з робочими платформами: монографія / Кириченко І. Г., Аврунін Г. А., Самородов В. Б., Ярижко О. В. Харків: ХНАДУ, 2018. 295 с.
- Аналіз рівня технічного розвитку мобільних підйомників із робочими платформами / Кириченко І. Г., Резніков О. О., Рукавишніков Ю. В., Книщенко А. О. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*: зб. наук. пр. Харків. 2021. Вип. 92. Т. 1. С. 149–153.
- Черніков О. В., Москаленко А. І. Розробка параметричних моделей з урахуванням динамічних та міцнісних характеристик. *Прикл. геометрія та інж. графіка*. Київ: КНУБА, 2011. Вип. 87. С. 431–434.
- Черніков О. В. Впровадження сучасних технологій комп'ютерного моделювання в навчаль-

ний процес ХНАДУ. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*: зб. наук. пр. 2016. Вип. 73. С. 239–244.

- Ловейкін В. С., Міщук Д. О. Оптимізація режиму пуску висувної рукояті кранаманіпулятора під час горизонтального переміщення вантажу з урахуванням його коливань *Гірничі та піднімально-транспортні машини*. 2010. № 76. С. 3–8.
- Метод визначення стійкості мобільних підйомників з робочими платформами в транспортному положенні / Кириченко І. Г. та ін. *Підйомно-транспортна техніка*. 2021. №2(66) С. 20–29.
- Дослідження коефіцієнта збільшення площі опорної поверхні після розгортання мобільного підйомника / Кириченко І. Г., Резніков О. О., Рукавишніков Ю. В., Книщенко А. О. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*: зб. наук. пр. 2021. Вип. 95. С. 26–31.
- Gurko A., Sergiyenko O. Trajectory Tracking Control of an Excavator Arm Using Guaranteed Cost Control. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2016. Vol. P. 177–196.
- About Dynamic Simulation Kinematics: Autodesk Inventor Tutorials help.autodesk.com/view/INVENTOR/2023/ENU/?guid=GUID-2D2E9683-DD26-43AE-89A3-70014361EDD6.

References

- 1850SJ Ultra Series Telescopic Boom Lift. URL: <https://www.jlg.com/en-gb/equipment/engine-powered-boom-lifts/telescopic/ultra-series/1850sj>
- Shawna Lockhart, Daniel T. Banach & Travis Jones Autodesk Inventor 2021 Essentials Plus. SDC Publications. 2020. 534 p.
- Об'ємний гідропривід в мобільних підйомниках з робочими платформами: монографія [Volumetric hydraulic drive in mobile lifts with working platforms: monograph.] / Kyrychenko I. G., Avrunin G. A., Samorodov V. B., Jaryzhko O. V. Harkiv: HNADU, 2018. 295 p. [in Ukrainian].
- Analiz rivnja tehničnogo rozvytku mobil'nyh pidjomnykiv iz robochymy platformamy [Analysis of the level of technical development of mobile lifts with working platforms] / Kyrychenko I. G., Rjeznikov O. O., Rukavyshnikov Ju. V., Knyschenko A. O. *Visnyk Harkiv'skogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhn'ogo universytetu: zb. nauk. pr. – Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2021. Vyp. 92. T. 1. Pp. 149–153 [in Ukrainian].
- Chernikov O. V., Moskalenko A. I. Rozrobka parametrychnykh modelej z urahuvannjam dynamichnyh ta micnisnyh harakterystyk [Development of parametric models with considering dynamic and strength characteristics]. *Prykl. geometrija ta inzh. grafika – Applied geometry and Eng. graphics*. Kyiv: KNUBA, 2011. Vyp. 87. Pp. 431–434 [in Ukrainian].

6. Chernikov O.V. Vprovadzhennja suchasnyh tehnologij komp'juternogo modeljuvannja v navchal'nyj proces HNADU [Implementation of modern computer modeling technologies in the educational process of KHNADU]. *Visnyk Harkivs'kogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhn'ogo universytetu: zb. nauk. pr. – Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2016. Vyp. 73. Pp. 239–244 [in Ukrainian].
7. Lovejkin V. S., Mishhuk D. O. Optyimizacija rezhymu pusku vysuvnoi' rukojati kranamanipuljatora pid chas goryzontal'nogo peremishhennja vantazhu z urahuvannjam jogo kolyvan' [Optimization of the start-up mode of the retractable handle of the manipulator crane during horizontal movement of the load, taking into account its fluctuations]. *Girnychi ta pidnimal'no-transportni mashyny – Mining and lifting and transport machines*. 2010. № 76. Pp. 3–8 [in Ukrainian].
8. Metod vyznachennja stijkosti mobil'nyh pidjomnykiv z robochymy platformamy v transportnomu polozhenni [The method of determining the stability of mobile lifts with working platforms in the transport position] / Kyrychenko I. G. Ta in/ *Pidjomno-transportna tehnika – Lifting and transport equipment*. 2021. №2(66). Pp. 20–29 [in Ukrainian].
9. Doslidzhennja koeficijenta zbil'shennja ploshhi opornoj' poverhni pislja rozgortannja mobil'nogo pidjomnyka [Study of the coefficient of increase in the area of the supporting surface after deployment of the mobile lift] / *Visnyk Harkivs'kogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhn'ogo universytetu: zb. nauk. pr. – Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2021. Vyp. 95. Pp. 26–31 [in Ukrainian].
10. Gurko A., Sergiyenko O. Trajectory Tracking Control of an Excavator Arm Using Guaranteed Cost Control. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2016. Vol. P. 177–196.
11. About Dynamic Simulation Kinematics: Autodesk Inventor Tutorials help.autodesk.com/view/INVENTOR/2023/ENU/?guid=GUID-2D2E9683-DD26-43AE-89A3-70014361EDD6.

Кириченко Ігор Георгійович, д-р техн. наук, професор каф. будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002, Україна, тел. +380(67) 705-54-74, igk160450@gmail.com,

Черніков Олександр Вікторович, д-р техн. наук, професор, зав. каф. інженерної та комп'ютерної графіки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002, Україна, тел. +380(67) 578-23-12, cherni@khadi.kharkov.ua,

Корецький Ярослав Сергійович, бакалавр каф. будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002,

Україна, тел. +380(96) 193-03-25, yarta9538@gmail.com.

Modeling of Running Equipment of Mobile Lifts

Abstract. Problem. Mobile lifts with working platforms have found wide application in various fields of industry. One of the main requirements when designing such machines is to ensure the stability and trouble-free performance of technological operations. The article presents the results of the development of a digital three-dimensional model of such a machine, and also describes virtual studies on controlling the machine's movement at different positions of the running gear. **Goal.** It was decided to divide the entire set of tasks to be solved into clusters in which it is possible to obtain reliable information with minimal time for the development of the models, as well as with the least load of the software. The main task was to develop a computer model of the running gear to study the maneuverability of the machine. **Methodology.** Geometric modeling was performed with limited initial data, the properties of the materials used for parts were not taken into account, and welding was not modeled. However, the geometry of the frame and all components was reproduced almost completely in the dimensions and configurations of the real object. **Results.** The computer model enabled establishing of the dependence of the machine's turning radii from the geometric design parameters of the chassis, as well as from the turning patterns and position of the longitudinal beams. **Originality.** The computer model made it possible to maneuver in three independent schemes: the classic 4x2 wheeled vehicle turning mechanism, turning with all four wheels (on the front and rear axles in opposite directions), and when all wheels turn in one direction, the so-called "crab stroke". **Practical value.** The proposed models and algorithms will significantly speed up the design process for this class of vehicles.

Key words: mobile elevating, computer modeling, virtual experiment, model adequacy, Autodesk Inventor.

Kyrychenko Igor, professor, Doct. of Science, Department of construction and road machines, Kharkiv National Automobile and Highway University, str. 25 Yaroslav Mudryho Street, Kharkiv, Ukraine, tel. +380(67) 705-54-74, igk160450@gmail.com,

Chernikov Oleksandr, professor, Doct. of Science, Head of engineering and computer graphics department, Kharkiv National Automobile and Highway University, str. 25 Yaroslav Mudryho Street, Kharkiv, Ukraine, tel.: +380(67) 578-23-12, cherni@khadi.kharkov.ua,

Koretskyi Yaroslav, bachelor of Department of construction and road machines, Kharkiv National Automobile and Highway University, str. 25 Yaroslav Mudryho Street, Kharkiv, Ukraine, tel. +380(96) 193-03-25, yarta9538@gmail.com.