

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

АРАФФА ХАЛЬДУН ОСМАН



УДК 621.865.8

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАНУВАННЯ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ РУХУ
АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТУ (АКА)**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Ткач Михайло Мартинович, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри технічної кібернетики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Осадчий Сергій Іванович, Центральноукраїнський національний технічний університет, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів

доктор технічних наук, доцент
Кирилович Валерій Анатолійович, Державний університет «Житомирська політехніка», професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б. Б. Самотокіна

Захист дисертації відбудеться 24 березня 2021 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої ради Д 26.002.04 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 530.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий 22 лютого 2021 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04
кандидат технічних наук, доцент

Ковалюк Д. О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасним перспективним напрямом робототехніки є створення мобільних роботів, зокрема, антропоморфних крокуючих апаратів (АКА), які автономно переміщуються відносно тривалий час по відкритій пересіченій місцевості. Створення таких мобільних роботів дозволяє порівняно дешево і без шкоди для здоров'я людей вирішувати комплекс завдань, пов'язаних із захистом і охороною навколишнього середовища, розвідкою місцевості в інтересах різних організацій. Основні труднощі при цьому полягають у створенні алгоритмічного забезпечення, що дозволяє автоматично керувати рухом мобільних роботів, використовуючи інформацію про його положення щодо обраної системи координат і перешкод місцевості.

Зазначені фактори зумовлюють неослабний інтерес до вирішення проблем синтезу алгоритмів роботи систем автоматичного керування автономним рухом мобільних роботів. Різним аспектам цієї проблеми присвячені роботи вітчизняних та закордонних учених, серед яких слід відзначити, в першу чергу, таких як М. Белецький, В. Бербюк, М. Вукобратович, В. Б. Ларін, Д. Є. Охоцимський, Т. Стрижак, S. Aleshinsky, R. Alexander McN, Y. Aoustin, E. Muybridge, Maximo A. Roa, T. Mc Geer, Christian Ott, Y. F. Zheng, D. A. Winter, A. Channon, D. B. Dacic, M. Dietrich, J. J. Eng, A. M. Formal'sky, T. Zieli'nska.

Однак за наявності великої кількості публікацій, у яких використовуються як класичні, так і сучасні підходи до синтезу алгоритмів обробки інформації та керування, завдання залишається не вирішеним повною мірою. Особливо це стосується синтезу систем автоматичного керування АКА. Це пов'язано з надмірною спрощеністю його постановки, що зумовлено принциповою неможливістю знання точної математичної моделі АКА через відсутність необхідного обліку можливостей і характеристик реальних датчиків і бажання авторів вирішити проблему керування АКА за наявності великої кількості різномірної інформації на основі одного, іноді досить складного алгоритму.

Таким чином, актуальність завдання створення алгоритмів роботи системи керування АКА, з одного боку, визначається їх достатньо широким використанням, з іншого – відсутністю працездатних процедур, які дозволяють успішно керувати рухом мобільних роботів по пересіченій місцевості.

Особливо слід відзначити щодо використання в цьому сенсі АКА роботи таких учених як: Б. А. Бордюг, А. Г. Тимошенко, В. В. Величенко, Д. Є. Охоцимський, Н. А. Бернштейн, В. В. Белецький, D. Wollher, A. Frank, J. Hill, R. McGee, J. Furesho, M. Vucobratovic, Ch. Ott, M. A. Roa, G. Hirzinger та ін.

Незважаючи на значну кількість робіт у цьому напрямі, дана область досліджень залишається сферою інтенсивного розроблення дотепер.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в рамках планових науково-дослідних робіт кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», зокрема, держбюджетної НДР «Антропоморфний роботизований транспортний засіб для розвантаження людини в умовах підвищеного ризику та невизначеності рельєфу місцевості» (номер державної реєстрації НДР: 0117U001179).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу планування руху та збільшення запасу стійкості АКА шляхом урахування ефекту запізнювання на отримання та обробку даних про його позиціонування на довільній поверхні.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- на підставі аналізу сучасного стану проблеми автоматизації процесу керування АКА виконати теоретичні дослідження процесів планування опорних траєкторій та дотримання рівноваги за заданого руху АКА по довільній поверхні та визначити шляхи її вирішення;
- для моделювання кінематики і динаміки АКА встановити функціональну залежність положення центру мас АКА та його проєкції на довільну поверхню, що пов'язано зі зміною положення ланок АКА під час його руху;
- визначити область допустимих кутових відхилень кінематичних пар ланок і напрямки прикладання сили тяжіння до центру мас АКА;
- вдосконалити існуючі критерії стійкості АКА і виконати пошук оптимальних розв'язків задачі збереження рівноваги під час руху АКА в умовах довільної опорної поверхні;
- розробити нові ефективні стратегії планування траєкторій руху ТЦМ і стоп АКА, що забезпечують дотримання і відновлення стійкого руху АКА на довільній опорній поверхні;
- розробити систему стабілізації заданого руху АКА на довільній поверхні, яка забезпечить зміну кутових положень кінематичних пар апарата залежно від його положення і стратегії керування;
- провести імітаційне моделювання для підтвердження ефективності отриманих наукових результатів.

Об'єкт дослідження – процеси планування і стабілізації заданого руху АКА.

Предмет дослідження – моделі та методи побудови системи автоматизації процесів планування і стабілізації заданого руху АКА на довільній опорній поверхні.

Методи дослідження. У дисертаційному дослідженні використано методи теорії матриць, теорії диференціальних рівнянь, теорії системного аналізу, теорії

автоматичного керування, теорії класичного варіаційного числення, аналітичної механіки, аналітичного конструювання оптимальних LQR – регуляторів стабілізації, моделювання складних систем. Для розроблення програмного забезпечення і проведення імітаційного моделювання застосовувалася інтегрована система інженерних і наукових розрахунків MATLAB.

Наукова новизна одержаних результатів у дисертаційній роботі полягає у наступному:

– удосконалено структурно-функціональну схему автоматизації процесів планування та оптимальної стабілізації заданого руху АКА з поліноміальним згладжуванням опорної траєкторії та оптимальним LQR стабілізуючим регулятором, що забезпечує плавність і стійкість руху АКА уздовж опорної траєкторії;

– вперше розроблено методику синтезу опорних траєкторій на основі багатофазної структури покрокового переміщення АКА з урахуванням локомоторних синергій взаємодії стоп АКА з довільною опорною поверхнею, що дозволяє уникнути неоднозначності під час розв’язання оберненої задачі кінематики;

– вперше розроблено алгоритм стабілізації руху АКА в умовах невизначеності рельєфу місцевості на основі MPC-підходу, що дає можливість усунути негативні наслідки ефекту запізнювання в початковій стадії процесу руху АКА при використанні традиційних підходів.

Практичне значення одержаних результатів: отримані в дисертації теоретичні результати дають змогу надати мобільним роботам нові функціональні можливості, істотно підвищити складність подоланого рельєфу місцевості, обґрунтовано вибирати конфігурацію, комплектацію і основні технічні характеристики блоків АКА. Робота становить інтерес як для державних, так і приватних організацій, що займаються проєктуванням систем керування крокуючими роботами.

Результати теоретичних та практичних досліджень використовуються в практичній діяльності ТОВ «СВІТ САЙТІВ» під час проєктування систем керування крокуючими роботами, впроваджені в навчальний процес Національного авіаційного університету для використання в науково-дослідній роботі студентів наукових груп Інституту новітніх технологій та лідерства, а також впроваджені у навчальний процес кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» для підготовки лекційних матеріалів та методичних рекомендацій до виконання комп’ютерного практикуму з дисципліни «Оптимальні системи управління».

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертаційної роботи, винесені на захист, автор отримав самостійно. У разі використання відомих положень мають місце коректні посилання на авторів і відповідні джерела. Особистий внесок дисертанта в публікаціях, виконаних у співавторстві: запропоновано підхід до генерації траєкторії руху АКА з використанням тривимірного лінійного

перевернутого маятника, формування розрахункової (опорної) траєкторії руху АКА і руху уздовж неї, формування кінематичної моделі руху АКА на основі методу Денавіта-Хартенберга, синтез системи керування для стабілізації траєкторії центру мас і точки нульового моменту за допомогою МРС-підходу.

Апробація результатів дисертації. Основні підсумки досліджень доповідалися і обговорювалися на наступних конференціях:

- VIII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Наука – майбутнє України» (м. Вінниця, 24 березня 2017 р.);
- Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти» (м. Тернопіль, 11 червня 2019 р.);
- IV Всеукраїнська науково-технічна конференція «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій» (м. Тернопіль, 20–21 червня 2019 р.);
- Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (м. Тернопіль, 13 вересня 2019 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 12 наукових праць, у тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні іноземної держави ЄС, 7 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 4 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, шести додатків, містить три таблиці, 59 рисунків. Загальний обсяг роботи становить 175 сторінок. Список використаних джерел містить 164 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і завдання наукового дослідження, викладено наукову новизну, практичну цінність і реалізацію результатів роботи.

У **першому розділі** проаналізовано проблему автоматизації процесів планування та стабілізації заданого руху АКА. Показано, що загалом вирішення даної проблеми є досить складним. Зокрема, це пов'язано з неоднозначністю розв'язання оберненої задачі кінематики руху АКА. Крім того, велике значення мають негативні наслідки ефекту запізнювання в початковій стадії процесу руху АКА під час використання традиційних підходів, а також складність самої конструкції АКА і невизначеність рельєфу місцевості. Для вирішення цієї проблеми в роботі розроблено структурно-функціональну схему автоматизації процесів планування та оптимальної стабілізації заданого руху АКА (рис.1).

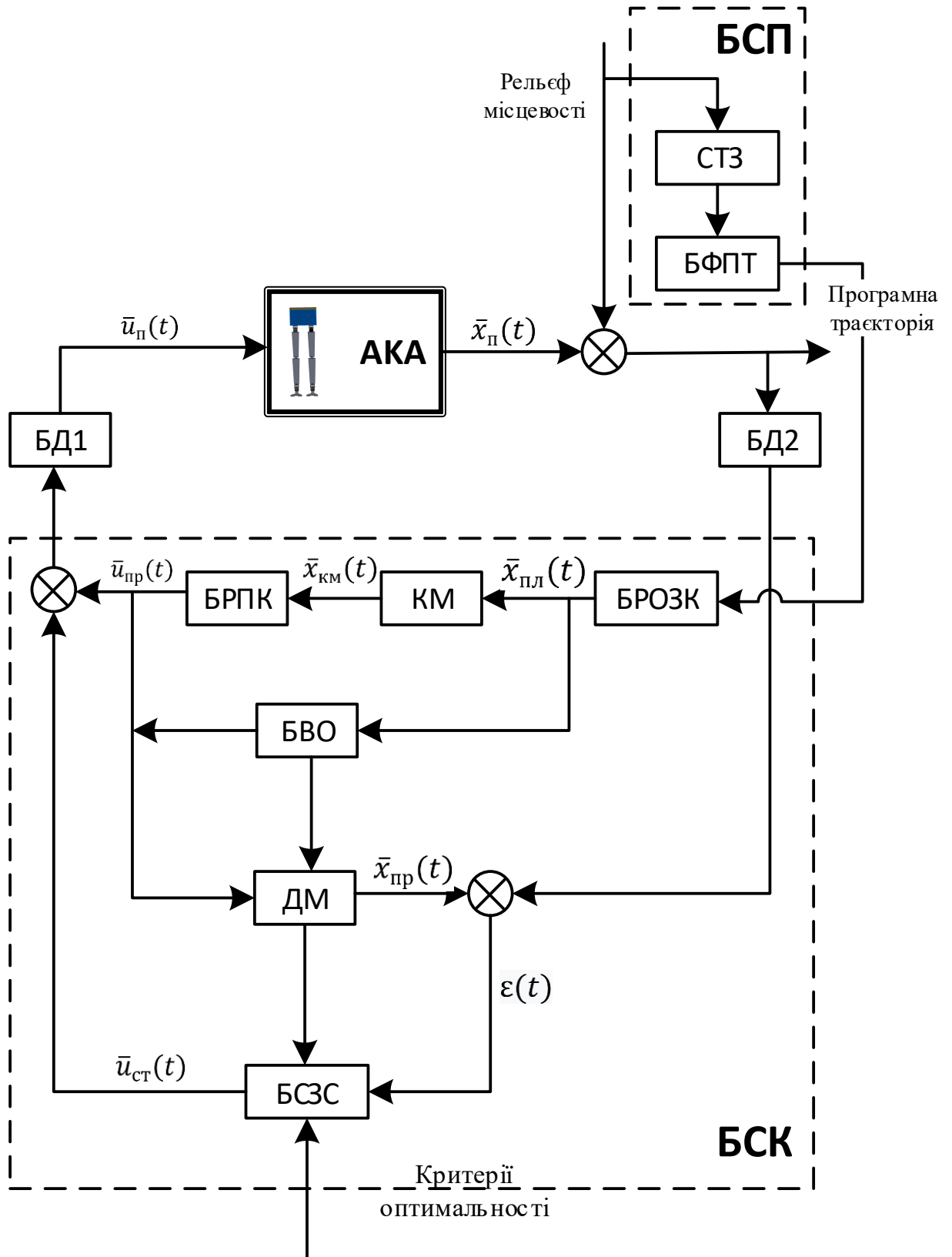


Рис.1. Структурно-функціональна схема автоматизації процесів планування та оптимальної стабілізації заданого руху АКА

Схема визначає послідовність і зміст вирішення завдань зі створення автоматичних систем планування опорної траєкторії та стабілізації руху АКА, які забезпечують плавність і стійкість руху АКА уздовж заданої траєкторії на основі поліноміального згладжування опорної траєкторії і оптимального стабілізуючого регулятора.

Розроблена структурно-функціональна схема автоматизації процесів планування та оптимальної стабілізації заданого руху визначає послідовність і зміст вирішення завдань зі створення автоматичних систем планування опорної траєкторії і стабілізації руху АКА уздовж неї. Згідно з цією схемою процес реалізації автоматичного планування і стабілізації стійкого руху АКА здійснюється так.

Задана програмна траєкторія формується в бортовій системі планування (БСП). Система технічного зору (СТЗ) видає формалізовану модель опису рельєфу місцевості, що складається з типових ділянок рельєфу в блок формування програмної траєкторії (БФПТ) або покроково в реальному часі (якщо рельєф місцевості заздалегідь невідомий), або усе зображення рельєфу місцевості одразу (якщо рельєф місцевості заздалегідь відомий). Для типових ділянок у БФПТ існують готові функції зміни положення стопи АКА. Ці функції надходять у блок розв'язання оберненої задачі кінематики (БРОЗК) АКА, який розраховує функції кутового положення шарнірів ніг і тулуба АКА. Через кінематичну модель (КМ) АКА блок реалізації програмного керування (БРПК) синтезує керуючі програмні впливи $u_i(t)$ на i -і серводвигуни АКА. Таким чином, у першому контурі бортової системи керування (БСК) автоматично формуються програмна траєкторія і програмне керування для її реалізації. Оптимальна стабілізація сталого руху АКА уздовж програмної траєкторії здійснюється в автоматичному режимі в реальному часі в другому контурі БСК.

Для цього від блока визначення орієнтації (БВО) АКА надходять програмні значення сталого положення точок ТНМ, ТЦМ і ТПЦМ. На виході динамічної моделі (ДМ) АКА визначаються програмні значення координат стану моделі АКА і порівнюється з поточним станом АКА. Їх різниця використовується в блоці синтезу законів стабілізації (БСЗС) згідно з обраними критеріями оптимізації для формування стабілізуючого впливу $u_{cti}(t)$ на відповідні виконавчі механізми АКА. Слід також зауважити, що при апріорі відомій інформації про рельєф місцевості в другому контурі БСК (контурі стабілізації) використовується LQR- регулятор, а якщо рельєф апріорі невідомий – MPC (model predictive control) – підхід.

Отже, наведені раніше основні завдання дисертаційного дослідження вирішуються в рамках даної схеми, яка, по суті, складається з бортової автоматичної системи планування програмної (опорної) траєкторії і бортової системи керування, яка являє собою двоконтурну автоматичну систему управління рухом АКА, тобто, контур програмного руху і контур оптимальної стабілізації програмного руху.

У **другому розділі** для опису обертальних і поступальних відносних рухів ланок маніпуляторів у роботі запропоновано матричний метод послідовної побудови систем координат, пов'язаних з кожною ланкою кінематичного ланцюга, так званий метод представлення Денавіта-Хартенберга (ДХ-представлення).

ДХ-представлення твердотілих ланок залежить від чотирьох геометричних параметрів, відповідних кожній ланці. Ці чотири параметри повністю описують довільний поступальний або обертальний рух і визначаються так:

θ_i – приєднаний кут – це кут, на який необхідно повернути вісь x_{i-1} навколо осі z_{i-1} , щоб вона стала співнапрявленою з віссю x_i (знак визначається згідно з правилом правої руки);

d_i – відстань між перетином осі z_{i-1} з віссю x_i і початком системи координат ($i-1$), що відраховується вздовж осі z_{i-1} ;

a_i – лінійне зміщення – це відстань між перетином осі z_{i-1} з віссю x_i і початком i -ї системи координат, що відраховується вздовж осі x_i , тобто найкоротша відстань між осями z_{i-1} і z_i ;

α_i – кутове зміщення – це кут, на який необхідно повернути вісь z_{i-1} навколо осі x_i , щоб вона стала співнапрявленою з віссю z_i (знак визначається відповідно до правила правої руки).

Для обертальних відносних рухів, характерних для кінематичної схеми АКА, параметри d_i , a_i , α_i є константами. Одночасно, параметр θ_i є змінної, що характеризує відносний рух у даному з'єднанні.

Вибір систем координат для лівої ноги АКА, відповідно до алгоритму ДХ, показано на кінематичній схемі (рис. 2). Метод ДХ-представлення полягає у формуванні однорідної матриці перетворення розмірністю 4×4 і описуванні стану системи координат кожної ланки щодо системи координат попередньої ланки. Це дає можливість послідовно перетворити координати вихідної ланки маніпулятора з системи відліку, пов'язаної з цією ланкою, в систему координат, пов'язану з початковою ланкою механізму.

Зокрема для обраного типу АКА, кінематичну схему якого показано на рис.2, повне перетворення від базової точки корпусу АКА до базової точки P однією зі стоп визначається матричним перетворенням (пряма задача кінематики):

$${}^B T_P = {}^B T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 \quad (1)$$

$${}^{(i-1)} T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

де

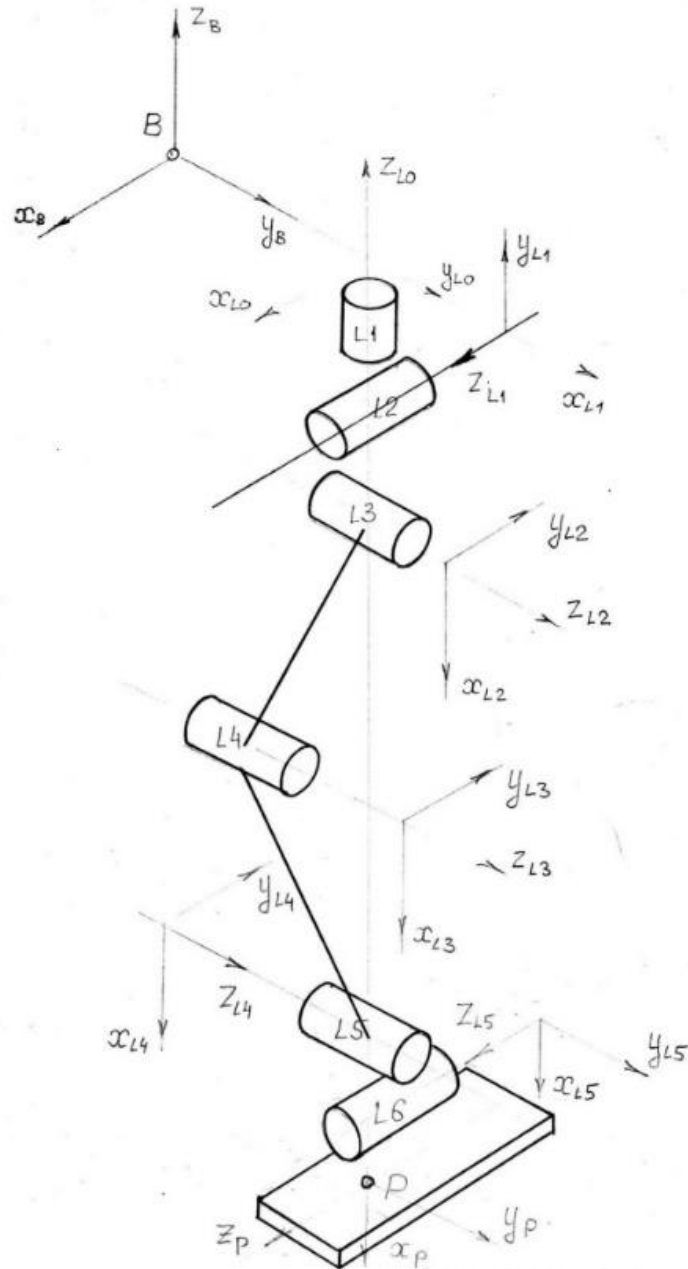


Рис. 2. Кінематична схема АКА і системи координат

При цьому положення точки S тазостегнового з'єднання відносно базової точки B корпусу визначається двома зміщеннями l_{L1} , l_{L2} , що приводить до формування такої матриці однорідного перетворення (знак «+» при l_{L1} використовується для лівої ноги, а «-» – для правої):

$${}^B T_0 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & \pm l_{L1} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_{L2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Як уже зазначалось вище, розв'язання оберненої задачі кінематики має певні труднощі. Тому для розв'язання цієї оберненої задачі кінематики введено допоміжну сферичну систему координат, на основі якої цей розв'язок отримано в замкненому вигляді для кінцівки АКА. Це дозволяє за заданими координатами стопи щодо корпусу АКА визначити значення узагальнених координат $\theta_1, \dots, \theta_6$. Неоднозначність визначення кутів, яка формально виникає під час розрахунку рівнянь, допустима, виходячи з умов антропоморфності ходи АКА.

На основі отриманої за допомогою матричного представлення Денавіта-Хартенберга кінематичної моделі і лагранжевого формалізму побудовано динамічну модель руху АКА у формі замкнутої системи рівнянь щодо мінімального набору узагальнених координат, яка має такий вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + Q_i; \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

де T – кінетична енергія системи; Π – потенціальна енергія системи; q_i – узагальнені координати; Q_i – непотенціальні узагальнені сили; n – число степенів вільності.

Така компактна векторно-матрична форма рівнянь руху (3) зручна для аналітичного дослідження і допускає пряме її використання в обчислювальних алгоритмах.

Узагальнені координати є набором змінних, що однозначно встановлюють поточну конфігурацію системи. Вибір змінних як узагальнених координат неоднозначний. Однак, оскільки кути повороту в кінематичних парах безпосередньо доступні вимірюванню, природно саме їх включити у вектор узагальнених координат. У цьому випадку узагальнені координати збігаються з приєднаними змінними АКА: $\theta_i = q_i$. Крім приєднаних змінних, у вектор узагальнених координат входять змінні, що характеризують поточний стан корпусу АКА в нерухомому просторі.

Як основний критерій збереження рівноваги АКА під час його руху обрано критерій точки нульового моменту (ТНМ). Ідея критерію полягає в тому, що якщо сума гравітаційних та інерційних моментів сил, прикладених до центру мас робота, знаходиться всередині полідрального опуклого конуса, утвореного моментами сил контакту між стопами робота і навколишнім середовищем, то рівновага руху зберігається.

У **третьому розділі** описано методи генерування траєкторії руху двоногих крокуючих роботів пересіченою місцевістю.

Для визначення формалізму ходи АКА на опорній поверхні запропоновано математичний метод оновлення вихідних значень нульового моменту. Для цього визначається послідовність m кроків $S = [S_0, S_1, \dots, S_i, \dots, S_m - 1, S_m]$, де S_0 – період ініціалізації; S_1 – перший крок, а S_m – останній крок; S_0 – подвійна опорна фаза, яка рухає масу тулуба до першої опорної ноги, якою обрали ліву, а $S_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$.

Вихідне значення нульового моменту генерується з урахуванням, що точка нульового моменту повинна бути всередині опорного багатокутника. Позначивши вихідне значення нульового моменту f^{foot_ref} , а вихідне значення ноги з маховим рухом f^{ref} , враховуючи вихідні значення в умовах ініціалізації і додаючи зміщення вихідного значення нульового моменту, дві задані траєкторії мають вигляд, поданий на рис. 3.

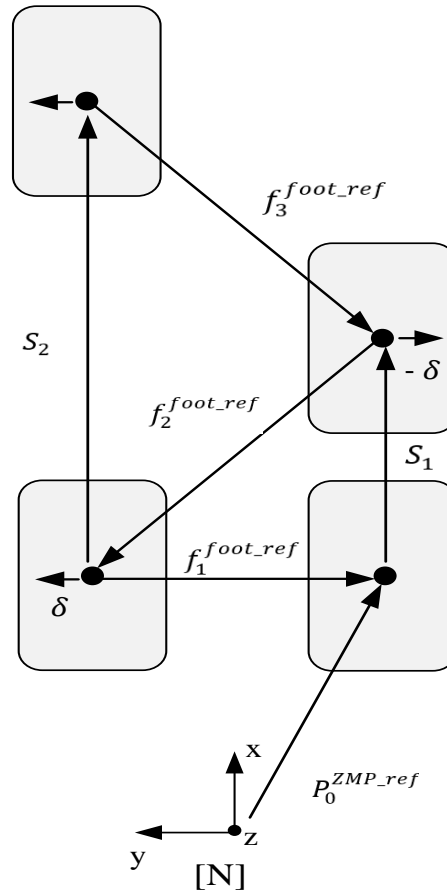


Рис. 3. Вектори визначення місця стопи та ТНМ на кожному кроці

$$f_i^{foot_ref} = \begin{cases} f_1^{foot_ref} & i = 0 \\ f_i^{foot_ref} & i > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$P^{ZMP_ref} = \begin{cases} 0 & i = 0 \\ P_i^{ZMP_ref} + (stance_{LEG}(S_i)\delta)\hat{J} & i > 0 \end{cases} \quad (5)$$

де

$$stance_{LEG}(S_i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } stance_{Leg} == \text{право} \\ 0, & \text{якщо } stance_{Leg} == \text{ліво} \end{cases} \quad (6)$$

Крім того, здійснено формалізацію руху перевернутого маятника в 3D-просторі з метою її використання для автоматичного генерування руху під час ходи АКА. Звідси, реалізовано планування в реальному часі траєкторії стійкого руху АКА на основі ТНМ і 3D-LIPM моделі.

Для руху АКА з урахуванням опорної поверхні розроблено методику синтезу опорних траєкторій на основі багатофазної структури покрокового переміщення АКА з урахуванням локомоторних синергій взаємодії стоп АКА з довільною опорною поверхнею, що дозволяє уникнути неоднозначності під час розв'язання оберненої задачі кінематики. Оскільки межа N спочатку визначається як середина між двома ногами, вихідне значення нульового моменту виникає протягом періоду ініціалізації. Маючи лише одну послідовність кроків і передбачений період ініціалізації, вихідні значення ноги і нульового моменту можна обчислити за формулами (4) і (5). Ці вихідні значення використовуються у формулах, щоб обчислити траєкторію ТЦМ і ноги з маховим рухом. За таких траєкторій можна розвинути зворотну кінематику у внутрішніх межах руху ноги F , щоб визначити кути.

Можна ділити рух АКА на 8 різних фаз, кожна з яких має свою власну функцію «і / або» рух.

Фаза 1: початкове положення. У цій фазі, АКА переходить в статично стійке положення з двома опорами (рис. 4).

Фаза 2: переміщення центру мас на визначену опорну (стійку) ногу. Якщо права нога обрана як опорна (стійка), наступна фаза переміщує центр мас у положення над правою ногою для того, щоб підготувати її до першого кроку.

Кінцеве положення махової ноги знову збігається з початковим положенням (рис. 5).

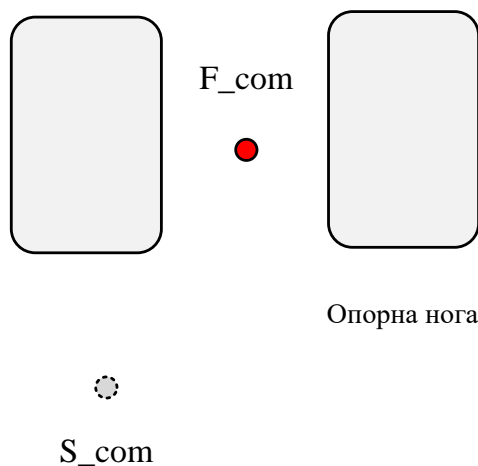


Рис. 4. Початкове і кінцеве положення центру мас

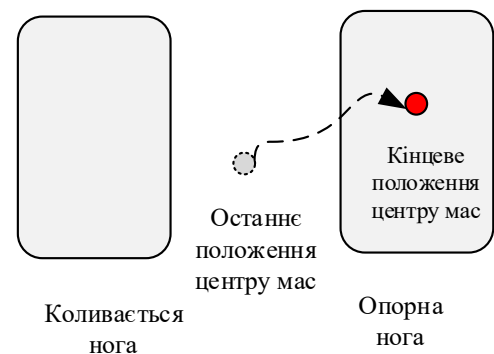


Рис. 5. Кінцеве положення центру мас під час фази 2

Фаза 3: перший маховий рух. Ця фаза планує стійкий рух ноги для того, щоб зробити перший крок з півкроковою довжиною (рис. 6). Рух починається з положення, у якому центр мас знаходиться над правою ногою, і закінчується за півкроку від лівої ноги. Кінцеве положення ноги з маховим рухом знаходиться на відстані півкроку в напрямку зростання по осі X , але залишається незмінним по осі Y .

Фаза 4: опора на дві точки. Після першого махового руху ноги, яка була статично врівноваженою. З цього положення маятниковий хід не може бути ініційований, оскільки центру мас необхідна початкова швидкість для того, щоб почати рух на базі динамічної моделі перевернутого маятника. Ця фаза переміщує центр мас у середню частину опорного багатогранника і задає йому початкову швидкість (рис. 7). На цій фазі нога з маховим рухом не рухається, тому що вона вже знаходиться на відстані півкроку від опорної ноги, що достатньо для маятникового ходу. Кінцеве положення даної фази знаходиться там, де центр мас розташовується за півкроку попереду по осі X у напрямку її зростання і позаду, між двома ногами, по осі Y . У іншому випадку рух ТЦМ направляється спочатку назад, а потім знову вперед, для того, щоб досягти необхідного положення і необхідної швидкості. Такий рух надзвичайно незручно, тому що робот АКА втрачає рівновагу.

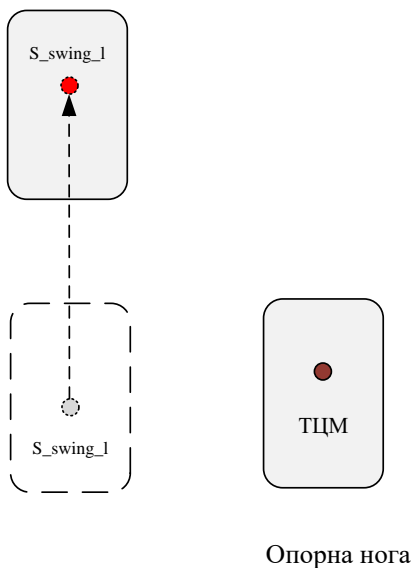


Рис. 6. Кінцеве положення ноги з маховим рухом під час фази 3

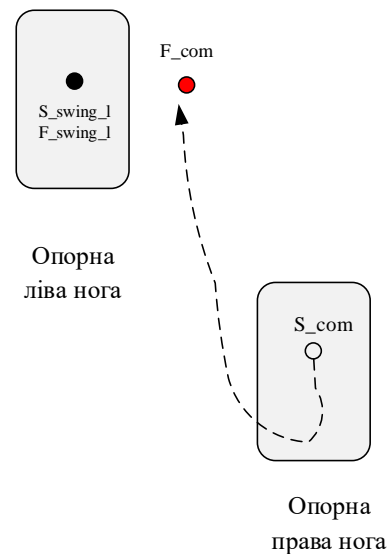


Рис. 7. Кінцеве положення центру мас

Фази 5 і 6: повний крок. Після завершення підготовчих фаз, які виводять робот АК у правильне положення і визначають потрібну швидкість, може починатися ходьба на базі тривимірної лінійної моделі перевернутого маятника (3D-LIPM). Необхідне кінцеве положення для центру мас знаходиться за півкроку попереду по осі X ; по осі Y центр мас переміщається з одного боку на інший під час ходьби. Переміщення центру мас в напрямку X і Y визначаються рівняннями тримірної лінійної моделі перевернутого маятника. Необхідне положення по осі X знаходиться за півкроку попереду; необхідне положення по осі Y не змінюється, а рух по осі Z –

Блок-схему алгоритму зміни фаз траєкторії руху АКА показано на рис. 10.

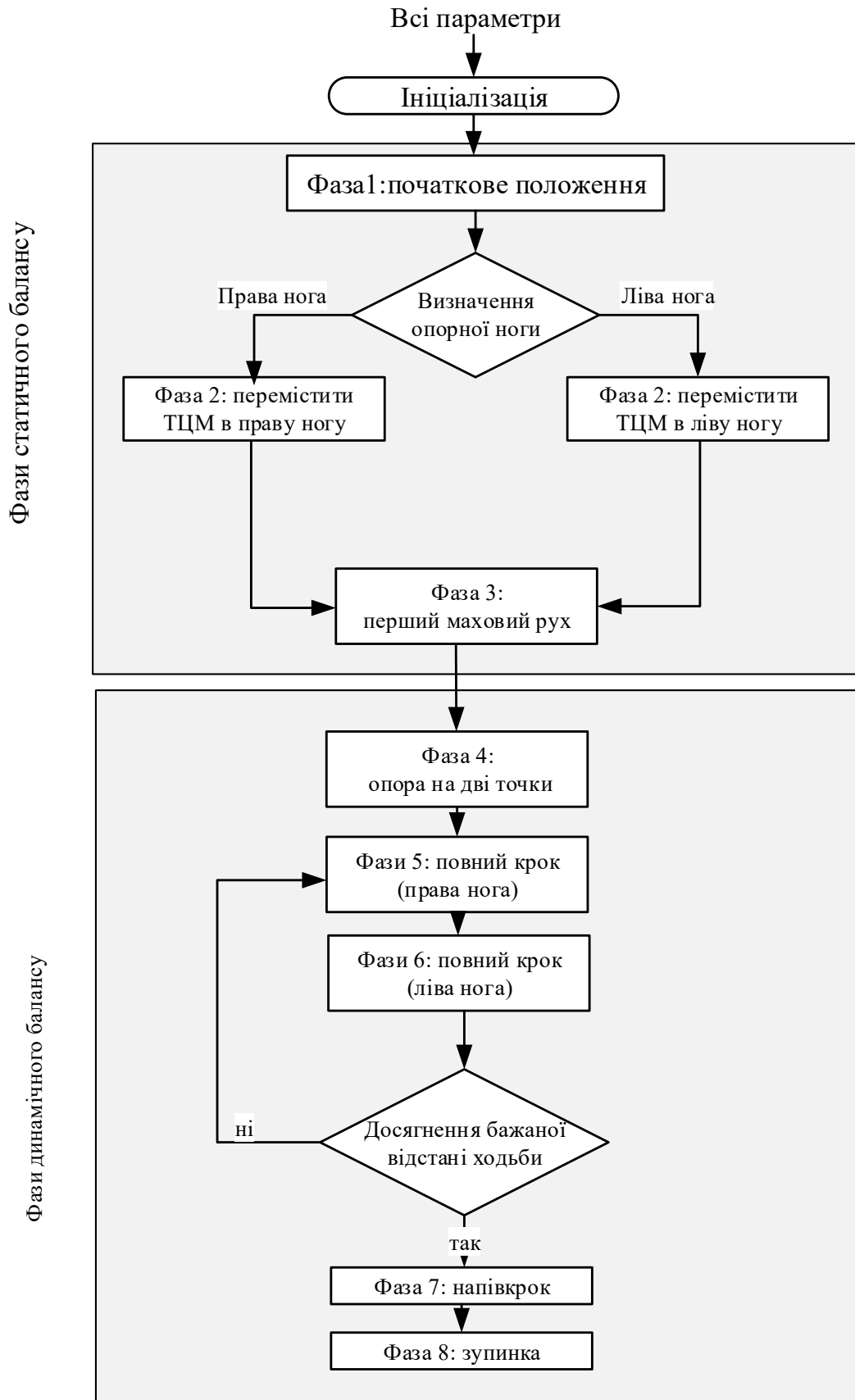


Рис. 10. Блок-схема алгоритму зміни фаз траєкторії руху АКА

Згідно із цією блок-схемою на основі рівняння тривимірної лінійної моделі перевернутого маятника (3D-LIPM) отримані бажані траєкторії точки центру мас (ТЦМ) (рис. 11) і ніг з маховим рухом (рис. 12), де R – права нога; L – ліва нога. Тривалість кожної фази становить одну секунду. Вона дає «гладкі» результати щодо траєкторії при імітаційному моделюванні. Однак тривалість фаз може бути довільною. Під час фаз 4 і 7 їх тривалості різняться, а саме, вони дорівнюють половині тривалості інших фаз. У нашому випадку ця величина становить 0,5 с. Різні фази цих траєкторій відокремлюються чорною вертикальною пунктирною лінією на обох рисунках.

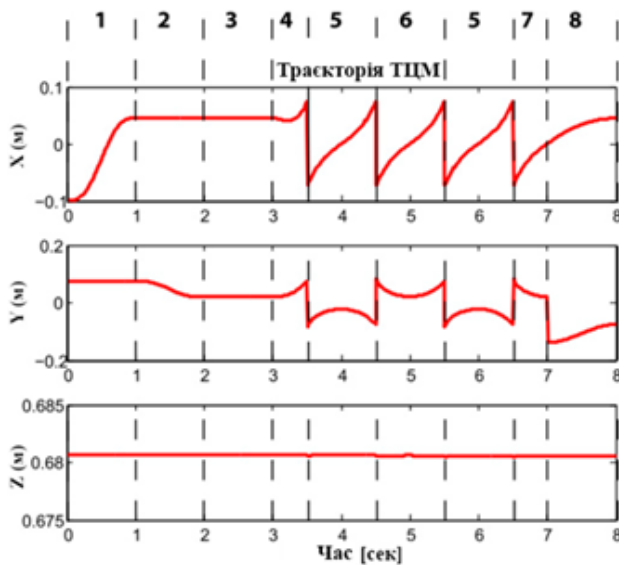


Рис. 11. Бажана траєкторія ТЦМ

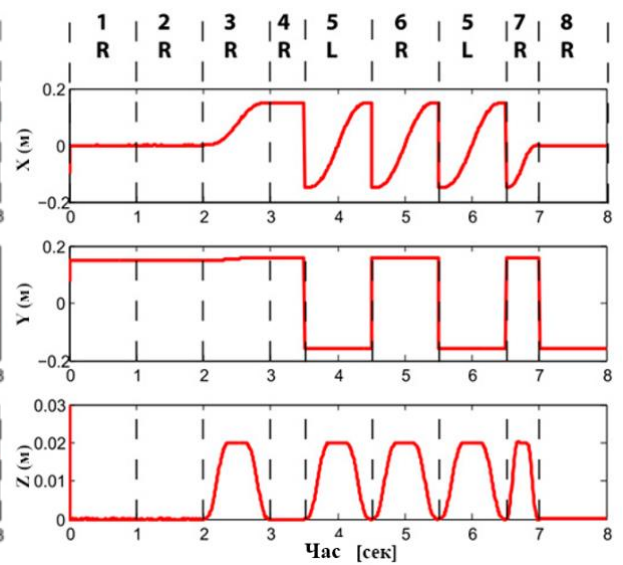


Рис. 12. Бажана траєкторія ніг

Ініціалізація не є фазою, показаною на рис. 11 і 12, вона відбувається раніше. Під час ініціалізації визначаються параметри, що використовуються в ході роботи генератора траєкторії руху, а робот АКА встановлюється у своє «нульове положення». Нульове положення – це положення, у якому всі координати обнулені, як показано на рис. 11. Параметри, що використовуються упродовж усієї роботи генератора траєкторії, збираються разом на цій фазі, чим полегшується регулювання траєкторії.

У **четвертому розділі** розглянуто систему керування заданим рухом АКА, яка здійснюється на основі блок-схеми планування траєкторії, керування рухом та стійкістю АКА на нерівній поверхні (рис. 13).

Метою системи керування є відстеження траєкторії, яка забезпечує статичну збалансовану ходу. Оскільки досить важливо, щоб робот зберігав стійке положення, задане траєкторією під час циклу ходи, кутове положення використовується як опорний сигнал для регулятора пози АКА. Траєкторія здебільшого включає в себе дві частини: одна частина є траєкторією кожної кінематичної пари, котра гарантує, що

робот іде вперед, друга – траєкторією точки нульового моменту, яка гарантує, що робот перебуває в рівновазі під час руху. Система керування має дві контрольні мети. Перша – контроль положення АКА стосовно заданої траєкторії, інша – гарантування постійної рівноваги АКА. Стратегією керування положенням є використання кутової траєкторії кожного шарніра, що означає відсутність контролю над абсолютним положенням робота. Такий підхід більш простий і не потребує спеціального вимірювального обладнання, що робить його придатним для впровадження АКА. Ця стратегія керування відповідає системі керування, наведеній на рис. 13, що має два контури регулювання, які контролюють положення і рівновагу робота відповідно.

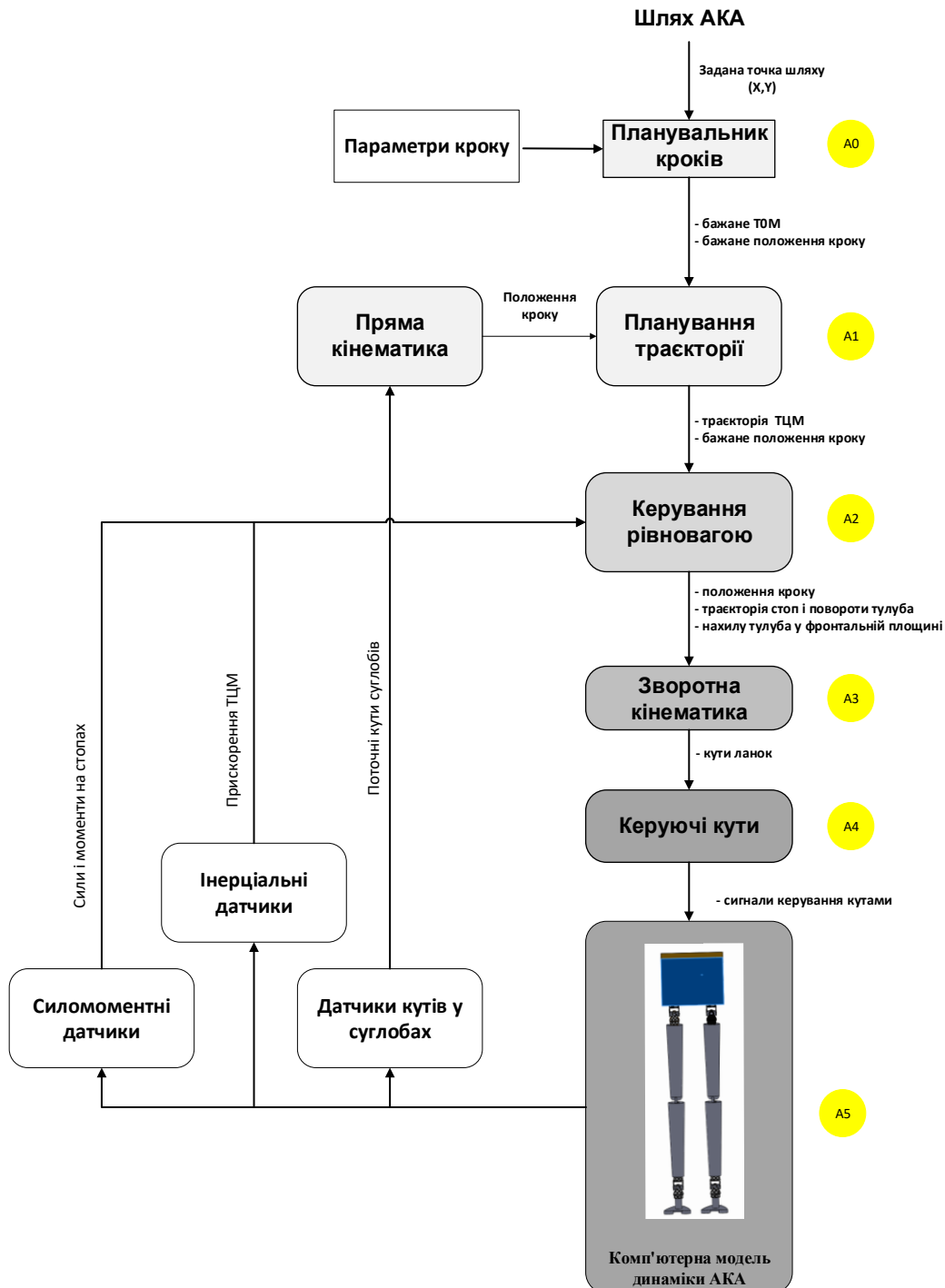


Рис. 13. Блок-схема процесу стійкого управління рухом АКА

У багатьох системах керування рухом АКА використовуються як регулятори звичайні ПД-регулятори і LQR-регулятори. Однак вони мають істотний недолік. Під час крокування, при стрибкоподібній зміні бажаного положення точки нульового моменту з центру однієї стопи в центр іншої, ці регулятори будуть спрацьовувати із запізненням, оскільки центр мас робота почне рухатися лише після стрибка. Відповідно, необхідно впровадити такий регулятор, який би передбачав майбутні значення і розпочинав би рух центру мас раніше. Як такий регулятор запропоновано використовувати LQR-регулятор, побудований на основі MPC (model predictive control)-підходу. У даній роботі MPC був адаптований для вирішення в аналітичному вигляді центру моменту, яке могло б запобігти розбіжності LIPM. Ривок (перша похідна прискорення) ТЦМ був використаний як вхід.

Основне завдання ТНМ регулятора ходи – завершити поточний крок. Основними даними, пов'язаними з кроком, є його довжина та ширина, траєкторія центру моменту, траєкторія повороту ступні та період кроку (період спирання на дві чи на одну точку). Ці кроки реалізуються у структурі даних, що виконується як черга. ТНМ регулятора ходи виконує поточний крок, обчислюючи кути за допомогою зворотної кінематики, аж поки крок не завершиться. Коли крок завершений, регулятор ходи ТНМ посилає запит на наступний крок до контролера кроків.

Дві основні частини регулятора наведені на рис. 14 складаються з:

- відстеження траєкторії ТЦМ за допомогою опорної ноги;
- слідування траєкторії розкачування за допомогою поворотної ноги.

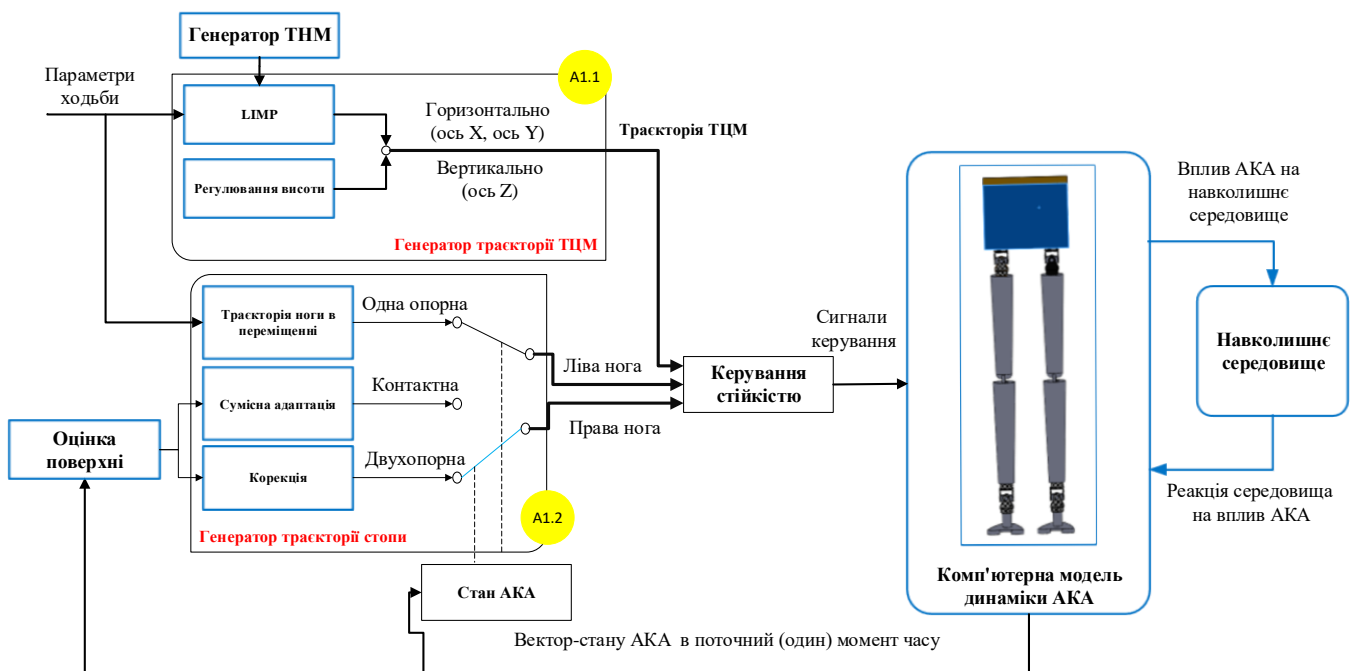


Рис. 14. (A1) Схема генерації траєкторії ТЦМ (A1.1) та траєкторії поворотної ноги (A1.2) для регулятора динамічної стабільності

Завдяки цим двом траєкторіям та додатковим обмеженням, зворотна кінематика може бути використана для обчислення бажаних кутів. Такими обмеженнями є:

1. Опорна нога і тулуб поводять себе як перевернутий маятник різної довжини.
2. Сполучення тулуба збігається з нормаллю N , або паралельно землі.
3. Поворотна нога також збігається з нормаллю N , або паралельно землі.

На рис.14 показано схему керування траєкторією ТЦМ і стопами АКА окремих компонентів регулятора. Є також регулятори згинання коліна та нахилу тулуба для безпосереднього керування згинанням опорного коліна та нахилом тіла відповідно. Ці регулятори мають вирішальне значення при переході між кроками для забезпечення циклічного режиму.

На підставі отриманих результатів проведено імітаційне моделювання із застосуванням інтегрованої системи інженерних і наукових розрахунків MATLAB. Блок-схему моделювання показано на рис. 15.

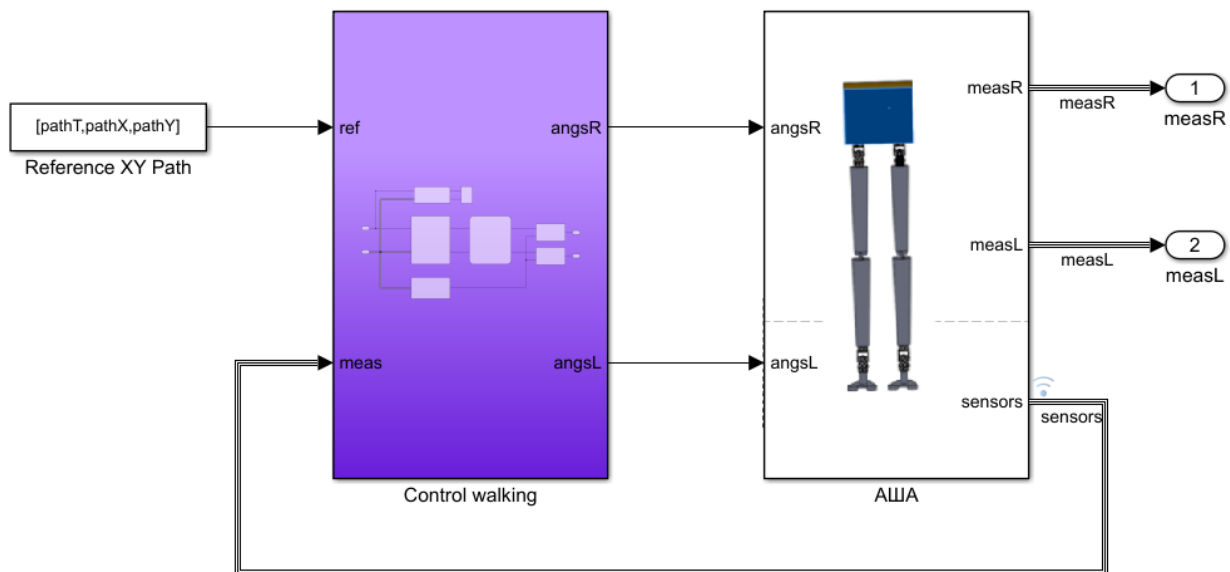


Рис. 15. Блок-схема моделювання ходи АКА

Проведене імітаційне моделювання підтверджує ефективність отриманих у роботі результатів. Моделювання показало, що АКА здатний ходити по рівній поверхні, оскільки регулятор забезпечує досить точне дотримання потрібної траєкторії з максимальною похибкою 0,3 % у траєкторіях шарнірних з'єднань. Базову точку нульового моменту було вибрано в центрі багатокутника стопи. При цьому, коли фактична точка нульового моменту знаходилась у межах багатокутника, опорна нога не оберталась і мала змогу повністю контактувати із землею. Таким чином, стабільна хода АКА забезпечувалась збереженням точки нульового моменту АКА в зоні багатокутника його стопи. Крім того, імітувалась нерівна поверхня для ходи АКА шляхом зміни висоти поверхні землі. Це може статися, наприклад, якщо людина йде

по нерівній поверхні або якщо нога наступає на кабель або дверний поріг. Опорна траєкторія, однак, не призначена для ходьби по таких поверхнях, але, здійснюючи моделювання, яке імітує нерівномірну поверхню, перевірялась міцність і рівновага АКА. При цьому задана хода залишалася незмінною, мала рівномірний рух, а контактна модель була відрегульована, щоб імітувати відповідний крок.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання – розроблення спеціалізованого математичного апарату і алгоритмічного забезпечення розв'язання задачі автоматизації процесів планування та стабілізації руху АКА.

Основні результати і висновки полягають у такому:

1. На основі аналізу сучасного стану розвитку мобільної робототехніки обрано типовий АКА, для якого проведено аналіз існуючих методів планування і керування в різних умовах функціонування. Показано, що найбільш вразливими під час розроблення антропоморфних крокуючих роботів є питання планування опорних траєкторій і забезпечення сталого руху АКА уздовж неї.

2. Розроблено структурно-функціональну схему автоматизації процесів планування та оптимальної стабілізації заданого руху, яка визначає послідовність і зміст вирішення завдань зі створення автоматичних систем планування опорної траєкторії і стабілізації руху АКА, які забезпечують плавність і стійкість руху АКА уздовж заданої траєкторії.

3. Для отримання рівнянь кінематичної моделі АКА запропоновано підхід з єдиних системних позицій з використанням представлення Денавіта-Хартенберга. За такого підходу розв'язання прямої задачі кінематики може розглядатися як послідовність однорідних перетворень координат. Розв'язання оберненої задачі для кінцівки АКА отримано в замкненому вигляді за заданими просторовими координатами кінцевих точок кожної з двох кінцівок.

4. Здійснено формалізацію руху перевернутого маятника в 3D-просторі з метою її використання для автоматичного генерування руху під час ходи АКА. Звідси, реалізовано планування в реальному часі траєкторії стійкого руху АКА на основі ТНМ і 3D-LIPM моделі.

5. Розроблено методику синтезу опорних траєкторій на основі багатофазної структури покрокового переміщення АКА з урахуванням локомоторних синергій взаємодії стоп АКА з довільною опорною поверхнею, що дозволяє уникнути неоднозначності під час розв'язання оберненої задачі кінематики.

6. Синтезовано систему керування АКА, яка має ієрархічну розподілену архітектуру з використанням складових, побудованих на основі PID-регуляторів.

7. Розроблено алгоритм стабілізації руху АКА в умовах невизначеності рельєфу місцевості на основі МРС-підходу, що дозволяє усунути негативні наслідки ефекту запізнювання в початковій стадії процесу руху АКА під час використання традиційних підходів.

8. Розроблено програмне забезпечення і проведено імітаційне моделювання із застосуванням інтегрованої системи інженерних і наукових розрахунків MATLAB. Проведене імітаційне моделювання підтверджує ефективність отриманих у роботі результатів.

9. Результати теоретичних та практичних досліджень використовуються ТОВ «СВІТ САЙТІВ» під час проєктування систем керування крокуючими роботами, використовуються в науково-дослідній роботі студентів наукових груп Інституту новітніх технологій та лідерства НАУ, а також впроваджені в навчальний процес кафедри технічної кібернетики факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» для підготовки лекційних матеріалів та методичних рекомендацій.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Tkach M., Araffa Kh., Humennyi D. Review the methods and approaches for planning trajectory biped walking biped robot and introduce a new concept for maintaining the highest safety factor on uneven terrain during dynamic walking. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2016. Vol. 2, No. 29. P. 3–12. (Здобувачем вирішена задача знаходження абсолютного положення стопи двоногого робота з найбільшим запасом стійкості). **WorldCat, Google scholar, PИЦ**.

2. Araffa Kh. Planning trajectory of anthropomorphic walking robot (biped robot). *Microsystems, Electronics and Acoustics*. 2019. Vol. 24, No. 2. P. 51–55. (Здобувачем запропоновано підхід генерації траєкторії руху АКА з використанням тривимірного лінійного перевернутого маятника, яка утримує точку нульового моменту). **Google scholar, DOAJ, ESJI, SIS, JOURNAL FACTOR, Citefactor, Cosmos Impact Factor**.

3. Araffa Kh.; Tkach M. Analytical method of formation of a trajectory of motion of anthropomorphic walking apparatus. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2019. Vol. 69, No. 2. P. 134–138. (Автору належить формування розрахункової (опорної) траєкторії руху АКА і рух уздовж неї). **Google scholar, CrossRef**.

4. Araffa Kh., Tkach M., Khlaponin Yu. Applying the forward kinematic of the biped robot with 12 DOF based denavit and hartenberg method. *Сучасний захист інформації*. 2019. Vol. 37, No. 1. P. 36–47. (Автору належить формування кінематичної моделі руху АКА на основі методу Денавіта-Хартенберга). **Google Scholar**.

5. Selyukov A., Araffa Kh., Khlaponin Y., Lialina N. Compensator of trajectory instabilities of aviation radar with aperture synthesis. *Problems of Infocommunications. Science and Technology*. 2019. P. 727–731. (Здобувачем запропоновано спосіб компенсації траєкторії руху з апертурним синтезом). **Scopus**.

6. Рудніцька О., Араффа Х. Централізована система управління розподіленими кіберфізичними системами. *Вісник Інженерної академії України*. 2019. Vol. 1. P. 83–88. (Здобувачем розглянуто принципи декомпозиції динамічних компонентів руху кіберфізичних систем). **IIJIF, Google Scholar**.

7. Araffa Kh., Tkach M. Implementation and simulation a model predictive control for motion generation of biped robot. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2019. Vol. 2, No. 35. P. 3–12. (Автору належить синтез системи управління для стабілізації траєкторії центру мас і точки нульового моменту за допомогою MPC-підходу). **WorldCat, Google scholar, PИHЦ**.

8. Stenin A., Lisovichenko O., Drozdovich I., Soldatova M., Araffa Kh. Methods of reducing the dimension of technical dynamic systems. *Bulgarian Journal for Engineering Design*. 2020. No. 42. P. 176–179. (Здобувачем запропоновано метод агрегування змінних стану та управління, запропоновано спрощення структури, замкнutoї на змінних стану оптимального регулятора). **Держава, що входить до ЄС. Google scholar, Index Copernicus**.

9. Araffa Kh. Planning trajectory for the lower limbs of bipedal robot using inverted pendulum: матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій» (м. Тернопіль, 20–21 червня 2019 року). Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. С. 163–164. (Здобувачем запропоновано метод планування траєкторії руху АКА за допомогою 3D-LIPM моделі).

10. Araffa Kh. Controlling Stability Walking of Biped Robot on Uneven Terrain Based On CMP. *Наука – майбутнє України: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції* (м. Вінниця, 24 березня 2017 року). Вінниця, 2017. С. 4–5. (Здобувачем сформовано опорну траєкторію стійкого руху АКА).

11. Araffa Kh. Overview strategy of position controlling of bipedal robot (АКА). *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: Міжнародна наукова інтернет-конференція* (м. Тернопіль, 13 вересня 2019 року). Випуск 41, 2019. С. 94–96. (Здобувачем запропоновано алгоритм управління рухом АКА на нерівній місцевості).

12. Араффа Х. Задача планирования траектории движения антропоморфного шагающего аппарата. *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: Міжнародна наукова інтернет-конференція* (м. Тернопіль, 11 червня 2019 року). Випуск 39, 2019. С. 117–118. (Здобувачем визначено основні фази руху АКА).

АНОТАЦІЯ

Араффа Х. О. Автоматизація процесів планування та стабілізації руху антропоморфного крокуючого апарату (АКА). – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.

Метою роботи є підвищення ефективності процесу планування руху та збільшення запасу стійкості АКА шляхом урахування ефекту запізнювання на отримання та обробку даних про його позиціонування на довільній поверхні.

У дисертаційній роботі виконано такі завдання: теоретичне дослідження процесів планування опорних траєкторій та дотримання рівноваги за заданого руху АКА по довільній поверхні та визначення шляхів її вирішення; для моделювання кінематики і динаміки АКА встановлення функціональної залежності положення центру мас АКА та його проєкції на довільну поверхню, що пов'язано зі зміною положення ланок АКА під час його руху; визначення області допустимих кутових відхилень кінематичних пар ланок і напрямків прикладання сили тяжіння до центру мас АКА; вдосконалення існуючих критеріїв стійкості АКА і пошук оптимальних розв'язків задачі збереження рівноваги під час руху АКА в умовах довільної опорної поверхні; розроблення нових ефективних стратегій планування траєкторій руху ТЦМ і стоп АКА, що забезпечують дотримання і відновлення стійкого руху АКА на довільній опорній поверхні; розроблення системи стабілізації заданого руху АКА на довільній поверхні, яка забезпечить зміну кутових положень кінематичних пар апарата залежно від його положення і стратегії керування; проведення імітаційного моделювання для підтвердження ефективності отриманих наукових результатів.

Ключові слова: автоматизація процесів керування, антропоморфний крокуючий апарат (АКА), планування опорних траєкторій руху, моделювання механічних складових АКА, оптимальна стабілізація руху.

АННОТАЦИЯ

Араффа Х. О. Автоматизация процессов планирования и стабилизации движения антропоморфного шагающего аппарата (АКА). – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2021.

Целью работы является повышение эффективности процесса планирования движения и увеличения запаса устойчивости АКА путем учета эффекта запаздывания

на получение и обработку данных о его позиционировании на произвольной поверхности.

В диссертационной работе выполнены следующие задачи: теоретическое исследование процессов планирования опорных траекторий и соблюдения равновесия при заданном движении АКА по произвольной поверхности и определение путей ее решения; для моделирования кинематики и динамики АКА установление функциональной зависимости положения центра масс АКА и его проекции на произвольную поверхность, что связано с изменением положения звеньев АКА во время его движения; определение области допустимых угловых отклонений кинематических пар звеньев и направлений приложения силы притяжения к центру масс АКА; совершенствование существующих критериев устойчивости АКА и поиск оптимальных решений задачи сохранения равновесия во время движения АКА в условиях произвольной опорной поверхности; разработка новых эффективных стратегий планирования траекторий движения ТЦМ и стоп АКА, обеспечивающих соблюдение и восстановление устойчивого движения АКА на произвольной опорной поверхности; разработка системы стабилизации заданного движения АКА на произвольной поверхности, которая обеспечит смену угловых положений кинематических пар аппарата в зависимости от его положения и стратегии управления; проведение имитационного моделирования для подтверждения эффективности полученных научных результатов.

Ключевые слова: антропоморфный шагающий аппарат (АКА), планирование опорных траекторий движения, моделирование механических составляющих АКА, оптимальная стабилизация движения.

ABSTRACT

Araffa Kh. O. Automation and controlling the process of motion planning and stabilization of bipedal robot (АКА). – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical Sciences in the specialty 05.13.07 – automation of control processes. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2021.

The aim of this work is to develop an automated controlling system for motion planning and optimal stabilization of bipedal walking (АКА), which significantly expands the possibilities of autonomous walking АКА over unknown terrain.

Based on the analysis of the current state of development of mobile robotics, a typical АСА selected, for which the analysis of existing planning and control methods in various operating conditions was carried out. It is shown that the most vulnerable in the development of anthropomorphic walking robots are the planning trajectories and stable motion and ensuring the stable walking of the АКА along it.

For solve these problems, was developed a structural and functional scheme for automating planning processes and optimal stabilization of a given motion. It determines the sequence and content of solving problems for creating automatic systems for planning the reference trajectory and stabilizing the motion of the AKA, which ensure smoothness and stability of the AKA movement along a given trajectory.

To obtain the equations of the AKA kinematic model, an approach proposed from unified system positions using the Denavit-Hartenberg representation. In this approach, the solution of a direct kinematics problem can consider as a sequence of homogeneous coordinate transformations. The solution of the inverse problem for the AKA limb can obtained in a closed form using the specified spatial coordinates of the endpoints of each of the two limbs.

For the developed kinematic model, the functional dependence of the position of the center of mass of the AKA and its projection on an arbitrary surface established, which caused by the change in the position of AKA links during its movement. The area of permissible angular deviations of kinematic pairs of links and the direction of gravity application to the center of mass of the AKA determined.

The formalization of the movement of an inverted pendulum in 3D space carried out in order to use it for automatic generation of movement AKA. From here, real-time planning of the AKA steady motion trajectory based on the PZM and 3D-LIPM model implemented. The method of synthesis of reference trajectories based on the multiphase structure of step-by-step movement of AKA is developed, considering the locomotor synergies of interaction of aka stops with an arbitrary reference surface, which allows avoiding ambiguity in solving the inverse kinematics problem.

A synthesized AKA control system that has a hierarchical distributed architecture using components built on PID controllers. An algorithm for stabilization of AKA movement in conditions of terrain uncertainty developed based on the MPC approach, which eliminate the negative consequences of the lag effect in the initial stage of the AKA movement process using traditional approaches.

Keywords: anthropomorphic walking apparatus (AWA), planning of reference trajectories of movement, modeling of mechanical components of AWA, optimal stabilization of movement.

Підписано до друку 17 лютого 2021 р.

Формат 60x90 1/16. Папір офсетний. Друк цифровий.

Кількість друкованих аркушів 0,9, тираж 100 екз. Замовлення №112/1

Суб'єкт видавничої діяльності занесено до державного реєстру № 3843 22.07.2010

ТОВ «Видавничий Будинок «Аванпост-Прим»

м.Київ, вул. Сурікова 3, корпус 3.