

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

На правах рукопису

ГУМЕННИЙ ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.865.8

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ УСТАЛЕНИМ РУХОМ
АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТА**

Спеціальність: 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Дисертація на здобуття наукового степеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
кандидат технічних наук, доцент
ТКАЧ МИХАЙЛО МАРТИНОВИЧ

Київ - 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ДОТРИМАННЯ РІВНОВАГИ АНТРОПОМОРФНИХ КРОКУЮЧИХ АПАРАТІВ.....	20
1. 1. Історичні та соціальні аспекти формування антропоморфної робототехніки.....	20
1. 2. Основні напрями розвитку РТС.....	22
1. 2. 1. Аналіз сучасного стану антропоморфної робототехніки для соціальної сфери господарювання.....	24
1. 3. Аналіз методів та принципів моделювання і побудови антропоморфних апаратів.....	26
1. 3. 1. Аналіз базових підходів до моделювання кінематичних зв'язків і динаміки антропоморфних крокуючих апаратів.....	30
1. 3. 2. Аналіз існуючих методів та підходів до управління усталеним рухом антропоморфних крокуючих апаратів.....	43
1. 4. Мета і задачі дослідження.....	54
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТА З ВРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОДІЇ ЙОГО З ОПОРНОЮ ПОВЕРХНЕЮ.....	57
2. 1. Біологічні основи побудови моделі антропоморфного крокуючого апарата з чутливою стопою.....	57
2. 1. 1. Особливості антропоморфних механізмів.....	57
2. 1. 2. Динамічна взаємодія крокуючого апарата з опорною поверхнею.....	60
2. 2. Загальна модель антропоморфної системи. Динамічні зв'язки антропоморфного крокуючого апарата з опорною поверхнею.....	62
2. 2. 1. Аналітичні методи формалізації моделі.....	63

2. 2. 2. Комп'ютерні методи формалізації моделі.....	73
2. 3. Модель антропоморфного крокуючого апарата з врахуванням розподілу сили реакції опорної поверхні.....	77
2. 3. 1. Кінематична модель шести-ланкового антропоморфного крокуючого апарата.....	77
2. 3. 2. Формування обмежень кінематичної моделі антропоморфного крокуючого апарата.....	86
2. 3. 3. Формалізація динамічної моделі антропоморфного крокуючого апарата з врахуванням взаємодії з опорною поверхнею.....	87
2. 3. 4. Формалізація обмежень до застосування аналітичної моделі антропоморфного крокуючого апарата для задач управління його усталеним рухом.....	97
2. 3. 5. Комп'ютерна модель антропоморфного крокуючого апарата з врахуванням взаємодії з опорною поверхнею.....	99
2.4. Висновки до розділу.....	110

РОЗДІЛ 3. КРИТЕРІЇ УСТАЛЕНОГО РУХУ ТА ЗАВАЛУ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТУ НА ДОВІЛЬНІЙ ОПОРНІЙ ПОВЕРХНІ ЗА ДАНИМИ ПРО СИЛУ РЕАКЦІЇ ОПОРИ.....	112
3. 1. Опис критеріїв та структури СУ усталеним рухом АКА за даними про розподіл сили реакції ОП.....	112
3. 1. 1. Концепція усталеного руху антропоморфного крокуючого апарата за критеріями розподілу сили реакції опорної поверхні.....	112
3. 1. 2. Умови порушення усталеного руху АКА на довільній ОП у його статичних положеннях.....	114
3. 1. 3. Умови дотримання оптимального положення АКА для забезпечення його стійкості на ОП.....	115
3. 1. 4. Структурна схема СУ дотримання стійкості АКА з застосуванням запропонованих критеріїв стійкості.....	117
3. 2. Формалізація процесу управління антропоморфним крокуючим	

апаратом за критеріями розподілу сили реакції опорної поверхні.....	120
3. 2. 1. Формалізація процесу визначення місцезнаходження поточної ТПЦМ замкненої механічної системи АКА.....	121
3. 2. 2. Формалізація процесу визначення координат ТПЦМ на площині стопи АКА за даними про розподіл сили реакції ОП.....	131
3. 2. 3. Формалізація взаємозв'язку між координатами ТПЦМ і положенням ТПЦМ АКА.....	136
3. 2. 4. Визначення граничного та оптимального положення ТПЦМ АКА на ОП при яких зберігається стійкість апарата.....	146
3. 2. 5. Перерахунок кінематичного стану АКА за даними про відхилення положень ТПЦМ.....	155
3. 2. 6. Умови дотримання рівноваги АКА на ОП за даними про розподіл сили реакції ОП.....	156
3. 2. 7. Передумови відновлення стійкості апарата після факту виходу ТПЦМ за контур стопи за даними про розподіл сил реакції ОП.....	157
3. 3. Висновок до розділу.....	161

РОЗДІЛ 4. УПРАВЛІННЯ СТІЙКІСТЮ АНТРОПОМОРФНОГО АПАРАТА ЗА ДАНИМИ ПРО РОЗПОДІЛ СИЛИ РЕАКЦІЇ

ОПОРНОЇ ПОВЕРХНІ.....	163
4. 1. Структурна формалізація системи управління стійкістю АКА на ОП.....	163
4. 2. Результати дослідження.....	169
4. 3. Висновки до розділу.....	175

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	177
-------------------------------	------------

ЛІТЕРАТУРА.....	179
------------------------	------------

ДОДАТКИ.....	196
---------------------	------------

Додаток А.

Визначення положення ТЦМ АКА у залежності від розташування його ланок.....	197
---	-----

Додаток Б.

Структурна схема системи управління усталеним рухом АКА на довільній ОП за даними про розподіл сил реакції ОП.....	201
---	-----

Додаток В.

Значення моментів у кінематичних парах і відповідні значення кутів у шарнірах АКА при дотриманні ним усталеного руху.....	210
--	-----

Додаток Г.

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	215
---	-----

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АКА	–	антропоморфний крокуючий апарат;
ДР	–	дотримання рівноваги;
ОРА	–	опорно-руховий апарат;
ЗРА	–	закон руху апарата;
ОП	–	опорна поверхня;
ОРС	–	опорно-рухова система;
СУ	–	система управління;
СП	–	сагітальна площина;
ТПЦМ	–	точка проекції центру мас;
ТЦМ	–	точка центру мас;
ТОМ	–	точка нуль-моменту;
КП	–	кероване падіння;
КМ	–	комп'ютерна модель;
НР	–	нестійка рівновага;
МСУ	–	мікроконтролерна система управління;
ФР	–	фаза руху;
ARM	–	Advanced RISC Machine;
ANFIS	–	adaptive-network-based fuzzy inference system;
CAN	–	controller area network;
HIL	–	hardware in loop;
SPI	–	serial peripheral interface;
P	–	proportional controller;
PD	–	proportional-difference controller;
PID	–	proportional-integer different controller;
PIL	–	processor in loop.

ВСТУП

Актуальність теми. В останні десятиліття велика увага дослідників області робототехніки та біомеханіки спрямована на процес людської ходи, її математичне моделювання та штучне апаратне відтворення. Причиною зацікавленості є істотна перевага крокуючого руху, в порівнянні з колісним чи гусеничним аналогами, що проявляється у високій адаптивності до умов навколишнього середовища – опорної поверхні (зокрема – рельєфу та шорсткуватості поверхні) та відсутності поздовжнього натягу опори при відштовхуванні від опорної поверхні, що зумовлює високу прохідність по довільній поверхні.

Проте технічна реалізація двоногій ходи є складною задачею, що потребує опрацювання низки різнопланових факторів конструювання, управління та сенсорики. На відміну від багатоногої ходи (за наявності більше двох опор), яку можна реалізувати за допомогою послідовності статично стійких конфігурацій руху, двонога хода вимагає значно складніших алгоритмів управління рухом, що враховують регулювання рівноваги у статичних та динамічних фазах руху, здійснюють керовану втрату рівноваги для синергії руху, вирішують зворотні задачі статички та динаміки для перерахунку положення ланок апарата у відповідності до положення центру мас і точки проекції центру мас, розподілу сил реакції опори.

Найбільшою прохідністю та адаптивністю відносно різнотипних поверхонь руху володіє антропоморфний метод двоногого руху. Але даний вид синергії повинен враховувати низку обмежень, зокрема: дотримання усталеного руху, перенесення маси апарата, вирішення задач орієнтації та позиціонування ланок апарата, завчасне прогнозування поведінки опорної поверхні вздовж траєкторії руху антропоморфного крокуючого апарата. Комплексне вирішення вказаних додаткових задач дасть змогу апарату рухатись у довільному напрямі, дотримуючись усталеності руху, застосувати для однотипного руху поліморфність положення ланок, рухатись довільною поверхнею тощо. Загалом, всі основні задачі здійснення антропоморфного руху можна класифікувати на підзадачі:

- конструювання опорно-рухової системи (ОРА) антропоморфного

крокуючого апарата (АКА):

- забезпечення дотримання усталеного положення АКА при статичному положенні його опорно-рухового апарата (ОРА);
- кероване переміщення центру мас апарата за програмованим законом руху;
- дотримання усталеного руху точки центру мас АКА у динамічних фазах руху;
- вибір типу постановки опори на опорну поверхню (ОП);
- здійснення прогнозування переміщення центру мас та ланок апарата для запобігання його падінню;
- вирішення задач оптимізації по енергоефективності руху;
- відновлення усталеного та прогнозованого стану АКА до стану з положення великого завалу ТЦМ.

Задачі конструювання опорно-рухового апарата АКА залишаються областю досліджень механіки, біоніки та теоретичної механіки. На сьогодні існує низка варіантів технічної реалізації штучної опорно-рухової системи для двоногого крокуючого апарата, в тому числі й антропоморфного типу. Значний внесок у конструювання подібних апаратів, що базуються на принципах будови та дії людського організму, зробили: *Christian Ott*, *Maximo A. Roa*, *Gerd Hirzinger* корпорації *DLR*; компанія *Boston Dynamics*; корпорація *Honda Motors*; корпорація *PAL Robotics*; об'єднання фінансово-економічної палати Японії (*METI*); палата розвитку нових енергетичних і промислових технологій (*NEDO*), корпорації *Kawada Industries* та *Iran's Tehran University*. Зважаючи на великий досвід та напрацювання в області механіки, задача конструювання опорно-рухового апарата АКА є вирішеною, проте може бути цікавою виключно з погляду проектування приводів, ідентичних за принципом роботи до м'язів людини.

Проблема збереження усталеного положення апарата є базовою задачею керування АКА. Незважаючи на тривалий інтерес до вирішення цієї задачі, вона залишається актуальною і сьогодні. Найзначніші здобутки, присвячені даній проблемі, дослідили вчені: М. Белецький, В. Бербюк, М. Вукобратович, Б. Ларін, Д. Охоцимский, Е. Попов, Т. Стрижак, Е. Muybridge, Maximo A. Roa, Н. Høifødt, Christian Ott, Gijs van Oort, Н. F. Yu, К. Erbatur, A. Chemor, Ling-Feng Sang,

Jung-Yup Kim, Hayder F. N. Al-Shuka, Y. Aoustin L'unam, Jean-Paul Laumond, N. KM'Sirdi, Tran Dinh Huy, J. Baltes, Eric R. Westervelt та ін. Спільною рисою цих робіт є застосування математичного апарата, який розглядає АКА в якості розімкненої механічної системи твердих тіл з наявним принциповим наближенням поведінкою до оберненого механічного маятника з наявною позицією (зоною) нестійкої рівноваги та єдиною точкою у якості опори до поверхні. При цьому, характеристики дотичної до маятника поверхні нівелюються. Критерієм дотримання нестійкої рівноваги маятника є знаходження його точки центру мас у певному допустимому околі, що задовольняє рівнодійній сил тяжіння та функції моментів у основі ланки, дотичної до поверхні. Сам окіл може бути обрахованим за теоремою Ляпунова, а поточне положення центру мас визначається з даних гіроскопів та декодерів, розміщених на шарнірах системи. Описаний метод характерний особливостями, які перешкоджають його ефективному впровадженню для вирішення задачі антропоморфної ходи, а саме:

- Рішення теореми Ляпунова дає змогу лише стверджувати про наявне, або відсутнє положення нестійкої рівноваги маятника. Теорема не здатна визначити величину відхилення від області нестійкої рівноваги, а отже її застосування у якості параметрів регулятора дотримання рівноваги матиме неоднозначний характер. Таким чином, СУ має формувати управляючі впливи до того стану, доки критерії рівноваги не характеризуватимуть дотримання усталеного положення апарата.
- Розгляд кінематичної будови АКА як “маятникової системи” носить наближений характер через невідповідність будови АКА всім умовам математичного маятника.
- Застосування інерційних засобів сенсорної системи дає змогу визначити відхилення від положення ТЦМ апарата, але унеможливорює визначення позиції ТЦМ і його поточного стану при взаємодії з ОП. Невизначеність положення ТЦМ у початковий момент утворює явище математичного запізнювання в управлінні апаратом, що потребуватиме постійного коригування положення ланок для дотримання його усталеного положення.

Беручи до уваги високу складність керування рухом АКА, застосування методів дотримання усталеного руху за теоремою Ляпунова та гіроскопічної сенсорної системи не виправдовує часових затрат, тому не є перспективною для застосування у якості методу критерію управління усталеним рухом апарата.

Наступною ваговою задачею для управління АКА є рух за принципом керованої втрати рівноваги (завалом). За антропоморфним принципом, існує два методи руху: переміщення ланок апарата і в наслідок чого – переміщення центру мас; переміщення ТЦМ (віддаленої ланки з найбільшою масою), потім ланок ОРА. Для випадку усталеного, комфортного руху АКА, синергія антропоморфним принципом є ефективнішою з точки зору енергетики та простоти системи управління. Проте обидва методи виконуються за програмованим законом руху апарата. Антропоморфний рух потребує застосування обох методів переміщення точки центру мас, у залежності від топологічної структури опорної поверхні. Так, для прикладу, рух поверхнею зі складною структурою (сходи тощо) потребує початкового переміщення ланок, а потім — ТЦМ апарата. Рух довільною, але подібною поверхнею (пісок, ґрунт тощо) навпаки, потребує переміщення ТЦМ, а потім вже ланок апарата. Найвагоміші роботи, присвячені розробкам методів управління переміщенням ТЦМ та ланок АКА згідно із законом руху апарата, належать вченим: *Christian Ott, H. F. Yu, Gijs van Oort, K. Erbatur, A. Chemor, Ling-Feng Sang, Jung-Yup Kim, Hayder F. N. Al-Shuka, Y. Aoustin L'unam, Jean-Paul Laumond, N. KM'Sirdi, Tran Dinh Huy, J. Baltes, Eric R. Westervelt*. Спільною особливістю методів є застосування принципів моделювання механіки у динаміці руху. Описана задача успішно вирішується, проте існує низка проблем, які зараз не мають вирішеними, а саме: вибір оптимального усталеного положення опор АКА на ОП; позиціонування стопи за параметром кута рискання; переміщення маси одночасно із зміною постановочної ФР.

Узагальнена проблема управління положенням точки центру мас АКА виникає при розгляді динамічних фаз руху (ФР), що спостерігаються у період між статичними фазами усталеного положення АКА та в моменти зіткнень стоп апарата

з опорною поверхнею. До складу задачі динамічного дотримання усталеного положення відносяться проблеми вибору фази руху, визначення параметрів положення ланок у межах кожної з фаз руху, коригування положення ТЦМ у залежності від характеру ОП та дії на АКА інших зовнішніх факторів. У зв'язку з динамічною поведінкою руху ТЦМ та ланок, утворюються нелінійні параметри впливу на апарат. Такі параметри виникають під час руху АКА по довільній ОП, що призводить до переміщення ТЦМ довільною траєкторією. Таке переміщення призводить до втрати усталеного положення АКА. Збереження усталеного положення потребує відповідних нелінійних змін значень моментів у шарнірах апарата, значення яких формується у СУ. Також на непрогнозовану зміну значення моментів впливають випадки ковзання стоп АКА по ОП та зіткнення стоп з поверхнею. Беручи до уваги сказане, задачу дотримання динамічного усталеного руху класифікують як одну з найскладніших задач управління АКА.

Найбільший внесок у проблему дотримання усталеного руху антропоморфного крокуючого апарата зробили: М. Вукобратович, В. Бербюк, М. Демидюк, Б. Литвин, *C. Ott, G. Hirzinger, H. F. Yu, E. H. K. Fung, C. Chevallereau, P. Sahu*. Незважаючи на наявні поступи у вирішенні складових проблеми, а саме: корегування положенням ТЦМ апарата у залежності від напрямку втрати стійкості; перерахунку моментів у шарнірах та дотичних з поверхнею точках; побудові “плоских” моделей апарата; методів урахування сил тертя та інерції тощо, проблема дотримання усталеного руху АКА і на сьогодні є невирішеною. Залишаються мало розглянутими випадки стабілізації і дотримання усталеного руху АКА на довільній опорній поверхні. Проте існує низка робіт на тему руху АКА на екстремальних опорних поверхнях. Найбільш актуальними з цієї теми є праці авторів: *E. R. Westervelt, B. Morris, J. W. Grizzle, H. Høifødt, H. Bruyninckx, M. Field, D. Stirling, F. Naghdy, Z. Pan*. Особливістю такої поверхні є інваріантність впливу сил реакції на опору. Зауважуючи на вагомості впливу цих сил, стабілізація апарату неможлива без дослідження характеру поверхні, безпосередньо під опорою апарата та наявного регулятора, задача якого полягає у пасивній стабілізації положення АКА без перешкоджання його руху згідно з ЗРА.

Задача вибору типу розташування опори на ОП найчастіше обумовлена проблемою ускладненої стабілізації АКА на похилих ОП, що пов'язано із зміщенням точки проекції центру мас апарата за межі його стоп. Тому вибір постановки опори АКА набуває актуальності у випадку неможливого досягнення усталеності руху апарата за методом регулювання положення його ТЦМ без відриву опори від ОП, що проглядається у випадку руху АКА по стрибкоподібній поверхні, або за умови зміни закону руху апарата без попереднього досягнення усталеного положення апарата на поверхні.

Вперше проблема вибору постановочної ФР людини була виділена ще М. Белінським у 1930 році. Пізніше актуальність цієї проблеми для моделювання руху крокуючих апаратів досліджувалася багатьма вченими, зокрема: В. Белецький, М. Вукобратович, Б. Литвин, Д. Охоцімский, Ю. Степаненко, *J. L. Nevins, R. Tomovic, R. B. McGhee, A. A. Frank*. Проте у жодній з оглянутих праць не досліджувалися проблеми зміни напрямку руху та порушення усталеного стану апарата на довільній ОП за принципами, що властиві людському організму.

Комфортний рух АКА на довільній опорній поверхні без зміни закону руху передбачає виконання попередньої класифікації рельєфу поверхні. Коректне позиціонування опор та ланок апарата відповідно до кута нахилу ОП забезпечує безударність динамічних ФР у процесі переміщення поблизу екстремальних зон поверхні, що мінімізує енерговитратність та ймовірність падіння апарата у результаті зіткнення. З точки зору управління, базовими вхідними даними СУ є значення кутів у шарнірах ОРА та сила реакції опор. На основі базових даних положення ТЦМ, як критерію дотримання усталеного положення для автоматичного резидентного регулятора управління положенням ланок АКА та позиціонування його центру мас. На сьогодні задача класифікації характеру поверхні опрацьована низкою учених, серед яких: В. Белецький, М. Вукобратович, Т. Стрижак, Е. Попов, И. Морейнис, *C. W. Chow, D. H. Jacobson, D. Jaricic, Okhotsimskiy* Зокрема, ученими *D. Jaricic*, А. Михайлов було розроблено методи регулювання кута нахилу поверхні за відеоінформацією з подальшим моделюванням керованого позиціонування апарата. Технічна реалізація методу класифікації за відеоінформацією здійснювалась

ученими та інженерами: *German Aerospace Center (DLR)*, *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*, *Honda Motors inc.*, *FutureBots Labs'*, *Aldebaran Robotics*. Проте класифікація рельєфу поверхні, яка базувалася б на статичних локальних методах та не потребувала б додаткового обладнання на сьогодні відсутня. Таким чином, дотримання усталеного руху апарата на довільній ОП без застосування додаткового сенсорного та математичного оснащення на сьогодні не досліджено.

Дотримання усталеного положення АКА за умов перебування точки проєкції центру мас за межами стопи передбачає використання методів відновлення усталеного положення зі стану великого завалу. Подібна ситуація спостерігається у випадку падіння апарата. Аналіз методів управління АКА показує відсутність досліджень питання повернення класифікованих систем до усталеного положення. Проте це питання розглядалося у контексті дотримання стану НР математичних систем “маятникового” типу. Основні здобутки у області управління усталеним положенням апаратів отримані вченими: М. Вукобратовічем, К. Уоттом (*C. Ott*), К. Чоу (*C. W. Chow*). Також питання дотримання стану рівноваги механічних систем за великих відхилень від положення рівноваги були розглянуті у роботах: В. Кунцевіча, Т. Стрижака, Дж. Андерсона (*J. Anderson*), Р. Флетчера (*R. H. Pletcher*), С. Фарлов (*S. J. Farlow*), Дж. Блезека (*J. Blazek*), Дж. Вента (*J. Wendt*).

Перспективною для вивчення залишається проблема енергоефективності ходи АКА. У зв'язку з відсутністю реалізації апарата, основними методами вивчення та дослідження енергоефективності руху АКА є моделювання кінематики та динаміки системи. Найактуальнішими залишаються задачі оптимізації енергоефективності руху спуском та поверхнею без нахилу, що базуються на методах пасивної динаміки. Найважливіший внесок у дослідження оптимізації руху зробили вчені: В. Бербюк, М. Демидюк, Б. Литвин, Г. Красюк, Д. Вінтер (*D. Winter*). Вказана задача, хоч і не є принципово важливою для двохопрного руху, та все ж залишається недослідженою та перспективною для подальшого розвитку конструювання та моделювання крокуючих апаратів антропоморфного типу.

Підсумовуючи поточний стан побудови антропоморфного руху та конструювання АКА в цілому, найважливішими та актуальними проблемами

залишаються:

- вирішення задачі статичної стабілізації положення точки центру мас АКА для забезпечення його усталеного руху;
- вирішення задачі позиціонування опори на ОП у залежності від положення чи переміщення ТЦМ антропоморфного крокуючого апарата;
- вирішення задачі управління усталеним рухом АКА на довільній ОП у статичних та динамічних фазах руху;
- розв'язання проблеми багатопараметричності у задачах дотримання усталеної позиції АКА;
- вирішення задачі дотримання усталеної позиції АКА у випадку великих відхилень ТЦМ від допустимих значень.

Дослідження та розв'язання задач процесів керування рухом антропоморфного крокуючого апарата, що базується на вирішенні перерахованих задач та застосовуванні вже розв'язаних задач управління дасть змогу побудувати АКА, що відповідатиме поставленим вимогам прохідності, швидкодії та енергоефективності.

У дисертаційній роботі розглянуто питання підвищення швидкодії управління усталеним рухом АКА на довільній опорній поверхні без попередньої підготовки умови експлуатації, що базується на управлінні кінематичним положенням ланок АКА за даними про розподіл сил натиску-реакції ланок АКА на дотичну опорну поверхню.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота тісно пов'язана з планами науково-дослідницької роботи кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” і виконувалась в рамках таких науково-дослідних робіт: № 2474 “Методологія побудови інформаційних системи з інтелектуальною підтримкою прийняття рішень” (2011 р. НДР № 0111U002510); №2326 “Розробка спеціалізованої бази знань для рекурсивного аналізатора зв'язаної природно-мовної текстової інформації Web-застосувань” (2010-2011 р. НДР № 0110U002002409); № 517138-TEMPUS -1 -2011 -1 –CZ –TEMP -JPCR “Подвійний магістерський диплом по автоматизації / механотроніці країн ЄС – країн партнерів” (2015 р. РК № 517138-

TEMPUS-1-2011-1-CZ-TEMP-JPCR).

Теоретичні результати роботи використовувалися під час створення рухомої платформи роботизованої системи «Інтелектуальний робот» для проекту «Розумного будинку» в рамках договору про науково-технічне співробітництво від 11.04.2015 р. між НТУУ "КПІ" та Компанією «Linyi Top Network Co., Ltd» (м. Ліньї, провінція Шаньдун, КНР) на розробку і поставку технічної документації з розробки системи “Розумний будинок”.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення запасу стійкості АКА під час руху на довільній опорній поверхні за даними, що базуються на розподілі сил реакції опори апарата.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначені наступні завдання:

1. На основі аналізу сучасного стану проблеми виконати теоретичні дослідження процесу дотримання усталеного руху АКА на довільній ОП, зокрема задач, що вирішуються при управлінні положенням точки центру мас (ТЦМ) і точки проекції центру мас (ТПЦМ) апарата під час його руху на довільній ОП, визначити методи, що дають змогу підвищити запас стійкості.
2. На основі аналізу сучасних підходів до моделювання динаміки АКА визначити залежності положення ТПЦМ апарата від розташування його ланок під час руху АКА на довільній ОП, що дають змогу отримати допустимі кутові відхилення кінематичних пар ланок та проаналізувати напрям прикладання сили тяжіння до ТЦМ апарата.
3. На основі аналізу і вдосконалення існуючих підходів до управління рухом АКА розробити критерії стійкості АКА, які враховують прийняті методи управління положенням ТПЦМ апарата і дають змогу виконати пошук оптимальних розв'язків задачі збереження усталеного руху АКА з найбільшим запасом його стійкості в умовах довільної ОП.
4. На основі розроблених критеріїв управління усталеним рухом апарата на довільній ОП удосконалити підхід до моделювання кінематичних зв'язків та динамічної поведінки АКА, який забезпечить спостережуваність положення його ТЦМ і ТПЦМ.

5. Розробити нові ефективні стратегії управління положенням ТПЦМ апарата, що ґрунтуються на розроблених критеріях і забезпечують дотримання та відновлення усталеного руху АКА на довільній ОП.
6. Розробити систему управління усталеним рухом АКА на довільній ОП, що забезпечить зміну кутових положень кінематичних пар апарата у залежності від його положення та стратегії управління.
7. Провести апробацію виконаних розробок.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного управління АКА.

Предмет дослідження – автоматизація процесу управління усталеним рухом антропоморфних крокуючих апаратів на довільній опорній поверхні.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених в дисертаційній роботі задач використано: метод напрямних косинусів (для опису положення кінематичних пар ланок АКА), метод кутів Ейлера (для опису положення ланок стоп апарата), метод Денавіта-Хартенберга (для опису кінематичного ланцюга ланок), рівняння Ньютона-Ейлера (для формалізованого подання рівнодійної сили і моментів), метод рівняння Лагранжа другого роду (для опису динамічної поведінки апарата і його взаємодії з ОП), метод множників Лагранжа (для визначення оптимального положення ТПЦМ АКА, метод нульового моменту (для визначення поточного місцезнаходження ТПЦМ і ТЦМ апарата).

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано стратегію відновлення і дотримання усталеного руху АКА на довільній ОП, яка ґрунтується на визначенні оптимального та поточного положення ТПЦМ та мінімізації їхньої розбіжності, що дозволяє відновлювати усталений рух АКА в умовах коли його ТПЦМ виходить за межі дотичної області стопи апарата до ОП;
2. Вперше визначені залежності положення ТПЦМ апарата від розташування його ланок під час руху на довільній ОП, що дало змогу отримувати допустимі кутові відхилення кінематичних пар ланок та напрям прикладання сили тяжіння до ТЦМ апарата для забезпечення моніторингу запасу його стійкості;
3. Вперше обґрунтовано та розроблено критерії дотримання усталеного руху

апарата на довільній ОП, які дають змогу виконати пошук оптимальних розв'язків задачі збереження усталеного руху апарата з найбільшим запасом стійкості;

4. Удосконалено підхід до моделювання кінематичних зв'язків та динамічної поведінки АКА за рахунок формалізованого опису його взаємодії з довільною ОП, що дало змогу забезпечити спостережуваність положення ТЦМ і ТПЦМ;
5. Набув подальшого розвитку підхід до управління усталеним рухом АКА, який за рахунок розширення постановки задачі введенням додаткових обмежень на характер взаємодії апарата з ОП, дав можливість відновлювати усталений рух апарата за наявних передумов його падіння.

Практичне значення одержаних результатів. Визначається спрямованістю дисертаційної роботи на вирішення актуальної задачі – побудови моделі АКА та забезпечення управління його усталеним рухом на довільній ОП.

Практичні результати роботи:

1. Розроблені кінематична та динамічна моделі дають змогу: зменшити трудомісткість процесу побудови фізичної моделі АКА, що забезпечується шляхом заміни фізичної моделі її комп'ютерним аналогом; підвищити спостережуваність поведінки апарата під час формування управляючих впливів від системи управління (СУ), що реалізовано за рахунок монолітної структури зв'язків між комп'ютерною моделлю та СУ; здійснювати моніторинг та аналіз поведінки АКА на різних типах ОП, що забезпечується інтеграцією до складу моделі апарата характеристик навколишнього середовища, зокрема рельєфності ОП.
2. Розроблений апаратно-програмний комплекс моніторингу та аналізу параметрів взаємодії апарата з довільною опорною поверхнею, що базується на зчитуванні розподілу сил реакції ОП і управлінні положенням маятника-балансира, що дає змогу здійснити практичну реалізацію запропонованої стратегії управління усталеним рухом АКА на довільній ОП.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на: міжнародній конференції “The Activity Of One Hundred Foreign

Experts' Visit in Linyi” з темою доповіді “On construction the Home Robot” (м. Лінї, КНР, 08.08.2015 р.), міжнародній конференції “Israel Conference on Mechanical Enguneering 2015” з темою доповіді “Planning Algorithm of Quasi-Static Locomotion for Humanoid Robot Walking on Rough Terrain”, (Tel Aviv, Israel, 02.04.2015 р.), міжнародній конференції “Автоматизация: проблемы, идеи, решения». "АПИР-2014"" з темою доповіді “Дослідження швидкодії балістичного методу дотримання рівноваги крокуючого апарата”, (м.Севастополь, 17.09.2014 р.), міжнародній конференції “Eccomas thematic conference Multibody Dynamics 2013” з темою доповіді “A Hybrid Control Method for Stabilizing of Walking Robot on Irregular Surface Using Plantar Pressure Sensors” (Zagreb, Croatia, 13.09.2013 р.), міжнародній конференції “Автоматизация: проблемы, идеи, решения” з темою доповіді “Управління рівновагою крокуючого апарата за даними про опорну поверхню” (Тула, РФ, 09.09.2013 р.), міжнародній конференції ”Стратегии качества в промышленности и образовании” з темою доповіді “Керування рівновагою антропоморфного крокуючого апарата за інформацією про екстремуми на поверхні руху”, (м. Дніпропетровськ, Україна, 29.06.2012 р.), міжнародній конференції “Розподілені комп'ютерні системи” з темою доповіді “Адаптивна система автоматичного керування з дуальним спостерігачем та пам'яттю” (м. Київ, Україна, 29.06.2010 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно.

У спільних роботах автору належить: комп'ютерна модель апарата на основі запропонованої схеми [61, 63]; застосування PIL і NIL для управління роботом за даними із комп'ютерної моделі, опис аналітичної динамічної і комп'ютерної моделі апарата із застосуванням методів Лагранжа і Ньютона-Ейлера та аналітичної моделі кінематики антропоморфного робота-маніпулятора [64, 137]; запропоновано застосовувати положення стопи у якості базової системи відліку [62]; критерії стійкості апарата, стратегія відновлення його стійкого положення, структура системи управління усталеним рухом і регулятори управління кінематичного положення ланок [65]; модель поведінки антропоморфного крокуючого апарата під час його

переміщення прямою та похилою поверхнями [138]; концепція управління антропоморфним апаратом за даними про розподіл сили реакції опорної поверхні [136]; умови збереження стійкого положення крокуючого апарата на поверхні руху [136, 172]; проаналізовано існуючі методи управління стійкістю крокуючих апаратів та визначено практичну доцільність побудови нових методів управління стійкістю з можливістю мінімізації математичного запізнення управління [29].

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується: коректністю поставлених завдань; використанням достовірних методів аналітичного і комп'ютерного моделювання, теорії автоматичного керування, теорії оптимального управління, дослідження операцій; статистичною обробкою накопичених експериментальних даних розподілу сили реакції ОП при взаємодії сенсорної стопи АКА з типовими опорними поверхнями. Результати моделювання характеристик взаємодії АКА та ОП мають розбіжність порівняно з аналогічною експериментальною взаємодією сенсорної стопи АКА з ОП, що не перевищує 5%. При цьому зазначена величина розбіжності відповідає похибці резистивного елемента сенсорної стопи апарата.

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи викладено в 16 друкованих працях, у тому числі: 9 статей у наукових фахових виданнях, з них 1 у міжнародному науковому виданні, що входить до наукометричних баз Scopus, 7 тез доповідей в збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел (184 найменувань) та 4 додатків. Загальний обсяг роботи 218 сторінок. Основна частина дисертації займає 178 сторінок, містить 56 рисунки.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ДОТРИМАННЯ РІВНОВАГИ АНТРОПОМОРФНИХ КРОКУЮЧИХ АПАРАТІВ

У розділі проаналізовано та показано етапи розвитку робототехніки соціального спрямування. Також висвітлено особливу роль антропоморфної робототехніки для вирішення низки задач господарювання людини. Значну частину розділу присвячено аналізу базових та сучасних підходів до моделювання антропоморфних крокуючих апаратів, вирішенню задачі управління усталеним рухом апаратів у їх статичних фазах на опорній поверхні.

1. 1. Історичні та соціальні аспекти формування антропоморфної робототехніки

Упродовж розвитку цивілізації людина прагне до нагромадження достатку та підвищення показників якості життя. У результаті, з зростанням соціальних норм, невпинно ростуть потреби підвищення кількісних та якісних характеристик товарів споживання, що, в свою чергу, потребує покращення інструментів видобутку сировини та виготовлення продукції [163]. Одним із методів підвищення обсягів нагромадження достатку залишається впровадження експлуатаційної і найманої людської праці [117, 163]. Так, базовими властивостями робітників, у цьому випадку, була здатність їх виконувати певну роботу під чинниками управління, що могли надходити до окремих працівників та їхніх груп. Такі властивості централізованого управління дали змогу виконувати складні задачі. Можливість централізовано управляти робітниками за допомогою доступних засобів впливу встановила явну перевагу застосування людської праці у порівнянні з будь-якими іншими її видами.

Використання методів підвищення особистого достатку, що базувалося на експлуатації людської праці, залишалися актуальними до часу перевищення граничної межі їхньої рентабельності [98, 117, 163].

Для вирішення проблеми нерентабельності людської праці в умовах примусової чи найманої форми впливу було застосовано методи підвищення якісних характеристик виробів та зменшення затратності виробництва. В основу цих методів було покладено постійну модернізацію інструментального забезпечення робітників.

При застосуванні незмінної кількості робітників, швидкість виготовлення продукції та її якість зростали. Проте, незважаючи на підвищення продуктивності виробництва, утримання робітників все ще потребувало значних затрат. Для зменшення затратності виробництва на оплату праці чи утримання робітників була сформована концепція часткової заміни робітників механізмами [160]. Така заміна була можлива в тому разі, якщо робітник виконував однотипні операції. Для подальшого зменшення затратності у виробництво вводилися складніші механічні засоби автоматизації, що виконували технологічні операції, ґрунтуючись на інформації про навколишнє середовище, стан системи, передатну функцію операції тощо [33, 160]. Так, складність передатної функції, що описувала процеси автоматизації, зростала у відповідності до технологічних потреб та інструментальних можливостей автоматизованого процесу [33].

Заміна людської праці засобами автоматичного управління уможливила мінімізацію затрат на видобування ресурсів та виробництво споживчих товарів. Проте автоматизація певних операцій потребувала застосування складних математичних обчислень і призвела до підвищення вартості відповідних інструментальних засобів, що виконували ці обчислення. Окрім цього, механічні автоматизовані інструменти замінювали лише заздалегідь задані технологічні операції. Для виконання не заданих, а лише подібних операцій, стало необхідним перелагодження або заміна інструмента. Для вирішення цих проблем залучалися комп'ютеризовані системи та гнучкі методи автоматизації [33, 70, 71, 72].

Упровадження комп'ютеризованих систем та гнучких методів автоматизації дало змогу застосовувати засоби цифрової схемотехніки та концепцію програмного управління для вирішення широкого спектру задач господарювання людини [73]. Зокрема, у разі автоматичного виконання технічних операцій, які передбачають функціональну взаємодію інструмента з об'єктом в умовах впливу навколишнього середовища (може включати вплив людини), впроваджувалися робототехнічні системи (РТС) [71, 77]. Важливою відмінністю РТС, у порівнянні з іншими інструментальними засобами, є застосування математично-алгоритмічного програмного забезпечення, що за допомогою електронно-обчислювальних машин

може взаємодіяти з об'єктом, середовищем експлуатації, людиною та класифікувати власний технічний стан [78]. Тож, з названих причин, РТС набули широкого спектру застосування практично у всіх областях господарювання людини.

1. 2. Основні напрями розвитку РТС

Економічна доцільність впровадження та простота розробки дали поштовх для значного розповсюдження промислових РТС. Такі РТС поділяються на спеціалізовані та універсальні, мобільні та стаціонарні [79, 80, 82]. У залежності від поставлених задач, названі системи додатково характеризуються рівнем гнучкості конструкції і системи управління (СУ), що обумовлює придатність до переналаштування, підвищення адаптивності тощо.

Основний науковий внесок у розвиток сучасної промислової робототехніки зробили такі вчені, як: А. Ф. Верещагін, М. Вукобратович, В. Я. Копп, К. С. Лі, Г. В. Орловський, М. М. Поліщук, Р. Пол, О. А. Стенін, М. М. Ткач, В. Н. Томашевський, М. Б. Ігнат'єв, К. С. Фу, Р. С. Хантенберг, Л. С. Ямпольський.

Паралельно з розвитком промислової робототехніки, широкого розповсюдження набула тематика розробки і впровадження автономної та автоматизованої транспортної робототехніки [86]. Такий вид РТС спрямований на підвищення якісних параметрів переміщення матеріальних об'єктів, виконання технічної розвідки віддалених та недосяжних людині районів тощо [85, 86]. Практичне впровадження результатів робіт з цього напрямку полягає у розробці апаратних, програмних і математичних засобів та методів, що були б придатні для розробки автоматичних або автономних систем повітряного, наземного, водного або безповітряного руху.

Окрім промислового або транспортного використання, існує інша низка областей застосування РТС [86]. Кожна з них має свій рівень розвитку та впровадження робототехніки. Проте на сьогодні існують галузі господарювання, що лише починають впровадження таких засобів, зокрема: медицина, сервіс, торгівля, вантажні перевезення тощо [85, 96, 97]. Впровадження РТС у ці галузі дасть змогу істотно підвищити рівень соціального розвитку суспільства.

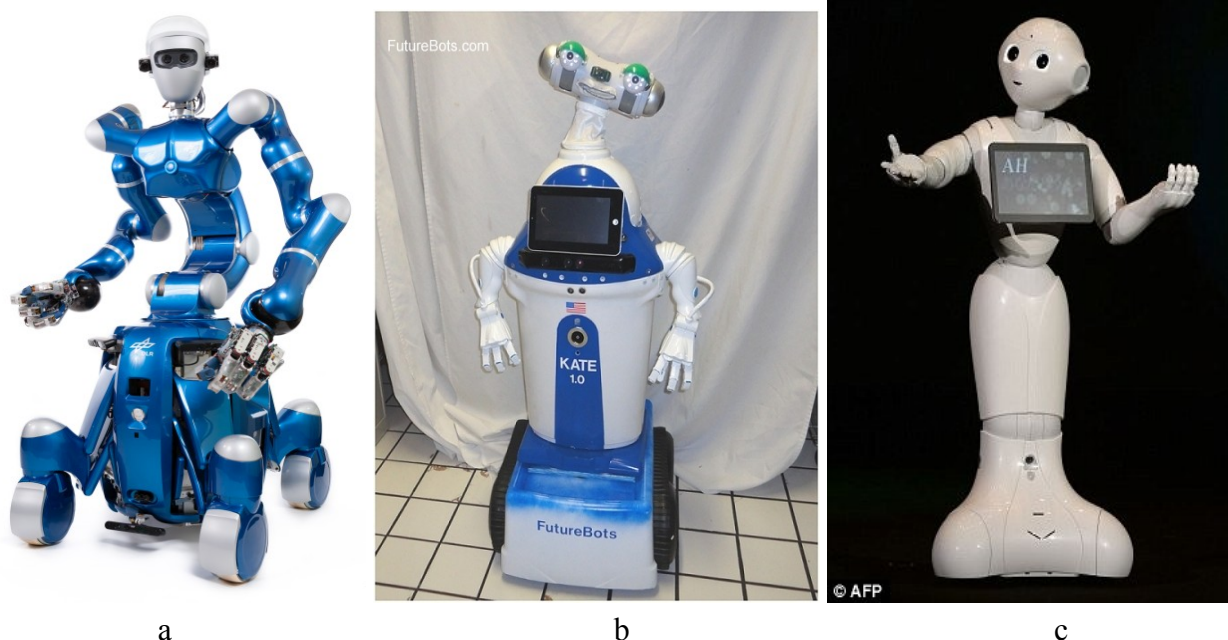
Значну кількість задач, які визначають рівень соціального розвитку, складають задачі, що пов'язані з медичними проблемами та сервісним обслуговуванням людини [4, 99]. Однак, впровадження засобів РТС для автоматизації вирішення проблем соціального спрямування характеризуються низькою економічною доцільністю, у порівнянні з промисловою чи транспортною робототехнікою [107]. Проте, їх застосування спроможне вивільнити великий людський ресурс, який здатний виконувати більш затратну інтелектуальну роботу.

Використання РТС для вирішення соціальних задач передбачає взаємодію людини з апаратом для спільного виконання певних дій [100]. Тип цієї взаємодії визначається відповідно до задач, які мають бути вирішені. Вагомими факторами для спрощення взаємодії робота та людини є наявність простих для людини, але спільних з роботом інтерфейсів [100, 103]. Так, для обміну командами та відповідями, оптимальним інтерфейсом взаємодії є людська мова [62, 100], яка відтворюється та сприймається голосом. Для здійснення процесу передачі матеріальних предметів, найбільш ефективною є багатоланкова консоль з антропоморфним інструментом для маніпуляції [65, 104]. Окрім задач, що потребують безпосередньої взаємодії людини і робота, до області соціального спрямування входять роботи, які доповнюють людину певними якісними характеристиками, зокрема, специфічною сенсорною системою [27, 29, 107], підвищеною вантажопідйомністю, прохідністю, стійкістю до механічних, теплових, хімічних впливів тощо [70, 105, 122, 166].

Відзначимо, що за останні десятиліття розвиток математичних і апаратно-програмних засобів розпізнавання та синтезу мови досяг якісно нового рівня [78, 106]. Паралельно з цим розвинулися і методи обробки зображення [114] та відеосигналу [115], тактильної інформації [37] та інших сенсорних засобів [37, 115, 116]. Такий розвиток стимулював прискорення інтеграції РТС у соціальну сферу. Також позитивно на розвиток РТС цього напрямку вплинуло якісне зростання продуктивності, енергоефективності та мініатюрності мікро-ЕОМ [111] та іншої електроніки, що застосовується для управління технічними об'єктами.

1. 2. 1. Аналіз сучасного стану антропоморфної робототехніки для соціальної сфери господарювання

Перспективною галуззю РТС для застосування у соціальній сфері господарювання залишається мобільна робототехніка [26, 79, 112, 136, 137]. Проте інтенсивність її впровадження знаходиться на низькому рівні [70, 119]. Існуючі розробки в цьому напрямку базуються на принципах гусеничного або колісного переміщення [70]. Антропоморфні ж системи розвинені значно гірше [62, 65, 100, 120, 136, 180]. Так, найуспішнішими системами соціального спрямування, що рухаються за колісним або гусеничним принципами, є такі: *Rollin' Justin* (Рис. 1.1 а) створена під керівництвом К. Бурста (*C. Borst*) і К. Уотта (*C. Ott*) [157], *KATE rev.1* (Рис. 1.1 b) створена лабораторією *FutureBots Labs'* [173], *Meet Pepper* (Рис. 1.1 c) створена фірмами *Softbank* і *Aldebaran Robotics* [74]. Основний науково-експериментальний внесок у сучасні системи соціальної робототехніки на колісному чи гусеничному принципах руху зробили такі автори, як: Р. Волпе (*Richard Volpe*) [83, 175, 176], А. Ансаром (*Adnan Ansar*) [108, 12, 14], К. Ассадом (*Christopher Assad*) [88, 90, 91], М. Беналеже (*Mehdi Benallegue*) [23]. Зокрема, робота “*Contribution of Actuated Head and Trunk to Passive Walkers Stabilization*” [88], яка подана групою авторів: М.Беналеже, Ж.П. Ламондом (*Jean-Paul Laumond*) і А.Бертозом (*Alain Berthoz*), орієнтована на побудову руху робота-рикші. У роботі П. Бустоса (*P. Bustos*), Д. Матіаса (*D. Mathias*) [132] визначена актуальність інтеграції засобів навігації, маніпуляції, динаміки, антропоморфності, ергономіки, енергоефективності тощо в єдину систему для забезпечення високого рівня їх взаємодії.



а
 б
 в
 Рисунок 1.1 – Гусеничні та колісні систем соціальної робототехніки:
 а – *Rollin' Justin*; б – *KATE rev.1*; в – *Meet Pepper*

Дослідники зазначають, що поєднання всіх окреслених засобів взаємодії систем соціальної робототехніки з навколишнім середовищем та людиною дадуть змогу виконувати задачі спільно з людиною, водночас замінюючи їх у багатьох сферах господарювання. Авторами Бріскін Е. та Калінін Я. основну увагу приділили розробці крокуючого антропоморфного апарата (АКА) з екскаваторним типом руху [21], що базується на теорії про кінцеві стани [123]. Важливим аспектом цієї роботи є застосування методів оптимального управління для формування матриці станів апарата. Такий підхід дав змогу управляти крокуючим апаратом за принципом переходів між статичними станами, що гарантувало його усталений рух. Тож, загалом, у всіх розглянутих працях спостерігаються спроби авторів вирішити задачу підвищення швидкості переміщення, прохідності та ергономіки руху крокуючих апаратів. Показано високий інтерес до проблеми їх побудови за антропоморфним принципом руху. Зокрема, в роботі “Математичне моделювання руху людини на підставі експериментальних даних” [10], авторами В. Є. Бербюком, М. В. Демидюком та Б. А. Ларіном, основну увагу актуалізовано на побудові динаміки руху людини на основі зчитування кінограми та балістики її руху.

1. 3. Аналіз методів та принципів моделювання і побудови антропоморфних апаратів

Починаючи з публікації Е. Мейбріджа (*Eadweard Muybridge*) у 1901 році статті “*Human Figure in Motion*” [121] не припинялися спроби побудови крокуючих систем. Серед найуспішніших розробок слід відмітити такі проекти: *DLR BiPed* (рис. 1.2 а), який побудований під керівництвом К. Уотта (*Christian Ott*), М.А. Роа (*M.A. Roa*) та Г. Гірзінгера (*Gerd Hirzinger*); *Atlas* (рис. 1.2 b), який розроблений компанією *Boston Dynamics*; *ASIMO* (*Advanced Step in Innovative Mobility*) (Рис. 1.2 c) – авторство компанії *Honda Motor Company*; *REEM-C* (Рис. 1.2 d), який побудований компанією *PAL robotics*; *HRP-4* (“*Promet*”) (Рис. 1.2 е), який розроблений спільними силами фінансово-економічної палати Японії (*METI*), організацією з розвитку нових енергетичних і промислових технологій (*NEDO*) та організацією *Kawada Industries, Inc*; *Surena* (Рис. 1.2 f), який розроблений *Iran's Tehran University*.

Проте, незважаючи на значний прогрес у побудові АКА, не існує завершеного виробу, здатного забезпечити сучасні потреби [59, 61, 139, 167].

Варто відзначити, що в результаті робіт, проведених такими авторами, як: Б. А. Бордюг [19], В. Б. Ларін [20], А. Г. Тімошенко [40], В. В. Величенко [30], Д. Є. Охоцимский [52], Е. Накано [69], Н. А. Бернштейн [4], В. В. Белецький [2], Д. Вітт (*D. Witt*) [78], І. Като (*I. Kato*) [80], А. Франк (*A. Frank*) [82], Д. Гілл (*J. Hill*) [83], Р. Мак-Гі (*R. McGee*) [84], В. Фарел (*W. Ferrell*) [85], М. Вукобратович (*M. Vucobratovic*) [71], К. Уотт (*Ch. Ott*) [92], М.А. Роа (*M. A. Roa*), Г. Гірзінгер (*G. Hirzinger*) [122], загальну задачу побудови роботизованого крокуючого апарата з антропоморфним принципом руху було розмежовано на ряд підзадач, вирішення яких дало змогу, в перспективі, успішно розв'язати початкову задачу з побудови АКА з динамікою, властивою людському організму.

Так, у публікації [172] основну увагу приділено побудові динамічної моделі антропоморфного крокуючого апарата. Зокрема, автором виділено три основні етапи:

- побудова статичної та динамічної моделей крокуючого апарата;
- побудова математичних принципів дотримання усталеного положення та

алгоритмів руху апарата;

- енергетичний аналіз і реалізація штучної ходи.



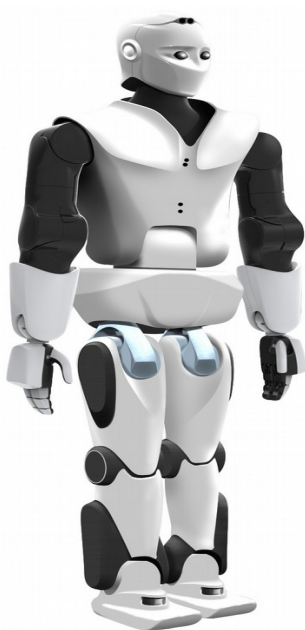
a



b



c



d



e



f

Рисунок 1.2 – Найуспішніші крокуючі РТС соціальної сфери:
a – DLR BiPed; b – Atlas; c – ASIMO; d – REEM-C; e – HRP-4 ; f – Surena

Натомість, у публікаціях [92, 122] вже розмежовано етапи моделювання самого крокуючого апарата та управління його усталеним рухом:

- моделювання апарата і середовища;
- управління дотриманням усталеного положення апарата на опорній поверхні (ОП);

- управління усталеним рухом апарата на ОП.

Під час виконання етапу “моделювання” робиться опис АКА, зовнішнього середовища та ОП. Також на цьому етапі задаються характеристики інших зовнішніх впливів на апарат. Модель АКА характеризується типом і методом його подання [92, 115, 122]. Розрізняються аналітичні та комп'ютерні типи кінематичної та динамічної моделей апарата. Аналітична кінематична модель здебільшого подається в матричній формі і описує лінійне та кутове переміщення ланок АКА. Однак не враховує причин, що спричинили ці переміщення. Аналітична динамічна модель описує дію зовнішніх і внутрішніх сил на ланки АКА, враховує довжини, маси ланок та час впливу цих величин. Для подання аналітичної динамічної моделі АКА використовуються такі методи: метод Ньютона-Гауса, метод Лагранжа, метод Ейлера тощо. Застосування аналітичних методів подання кінематичної і динамічної моделей має низку обмежень у застосуванні. Вони характеризуються складністю, розмірністю і розмірами відповідних математичних виразів. Для побудови моделей апарата, яким характерна висока деталізація опису, застосовуються методи комп'ютерного моделювання. Таким чином, проблеми складності, розмірності та розміру математичного подання кінематики і динаміки вирішуються автоматизовано.

Виконання етапу “управління усталеним рухом АКА на ОП” передбачає побудову та опис методів управління усталеним рухом АКА, що базуються на критеріях дотримання стійкості та обраній стратегії управління апаратом [88, 92]. Методи управління усталеним рухом поділяються на антропоморфні та аналітичні. Антропоморфні методи базуються на застосуванні антропоморфних моделей апарата і структури сенсорної системи. Натомість аналітичні методи управління усталеним рухом ґрунтуються на використанні обраної моделі апарата, яка може відрізнятися від антропоморфної. Критерії управління усталеним рухом відрізняються відповідно до вибору методу, а відтак і стратегії управління апаратом. На сьогодні найбільш розповсюдженими критеріями управління усталеним рухом АКА є:

- відстеження та аналіз положення точки ТЦМ;
- відстеження та аналіз положення ТПЦМ;
- аналіз кутових положень і моментів у шарнірах апарата;

- аналіз зусиль у кінематичних парах;
- відстеження та аналіз кутових прискорень, швидкостей та переміщень точки корпусу АКА відносно точки на його стопі (балістичний критерій);
- відстеження та аналіз переміщення точки на корпусі АКА відносно віддаленого стаціонарного об'єкта (застосування стереометрії, ехолокації тощо).

В той же час стратегія управління процесом дотримання усталеного положення АКА базується на таких принципах:

- швидке досягнення усталеного положення АКА на опорній поверхні;
- найвища енергоефективність при збереженні усталеного руху;
- зберігання усталеного руху АКА з урахуванням мінімальної затратності для подальшого керованого завалу, що відбувається у відповідності до закону руху апарата;
- досягнення усталеного стану АКА на ОП та підтримка найвищого запасу його стійкості при русі по ОП.

В залежності від умов експлуатації, будови АКА, структури сенсорної системи апарата та задач, які вирішуються, критерії дотримання стійкості та стратегії управління можуть комбінуватися з метою взаємного доповнення.

Крім того, на етапі “управління усталеним рухом апарата по ОП” необхідно формалізувати метод управління рухом АКА, який залежить від його динамічної моделі, моделі середовища, структури сенсорної системи та можливостей виконавчої системи, що у комплексі з траєкторією переміщення точки центру мас АКА формують закон руху [68, 162, 134]. Реалізація цього етапу, в свою чергу потребує попереднього вирішення таких задач:

1. Моніторинг і аналіз інформації про взаємодію апарата з навколишнім середовищем;
2. Моніторинг поточного стану та просторового положення апарата;
3. Зчитування траєкторії руху ТЦМ апарата;
4. Розв'язання задачі побудови руху як циклу кроків АКА;
5. Розв'язання задачі класифікації циклічної зміни фаз руху апарата;

6. Визначення задач управління усталеним рухом АКА та зміною фаз його руху;
7. Вирішення зворотної кінематичної задачі управління ланками апарата в межах задачі зміни фази руху.

В результаті вирішення наведених вище задач, стає можливим вирішення і базової задачі управління рухом АКА. Проте для управління апаратом в нестандартних умовах потрібно вирішити ряд додаткових задач, серед яких є такі, що потребують:

- побудови складнішої моделі апарата, здатної враховувати додаткові керуючі впливи на АКА. Такі випадки можуть бути пов'язані з врахуванням:
 - динаміки руху ланок АКА, що не входять до складу опорно-рухового апарата (ОРА);
 - застосування альтернативної кінематичної схеми АКА;
 - застосування альтернативних критеріїв, засобів та методів управління усталеним рухом АКА;
- забезпечення усталеного руху апарата на довільній ОП;
- виконання апаратом операцій, які передбачають взаємодію з іншими об'єктами;
- стохастичної зміни динамічної поведінки апарата, що застосовується в ситуаціях, які спричинені:
 - ймовірною зміною умов усталеного руху;
 - зміною напрямку руху та впливом на АКА сторонніх сил.

Виконання вказаних етапів та врахування розглянутих додаткових задач і дає можливість побудувати АКА, який здатний рухатись довільною ОП.

1. 3. 1. Аналіз базових підходів до моделювання кінематичних зв'язків і динаміки антропоморфних крокуючих апаратів

Основний внесок в моделювання АКА внесли такі вчені: І. І. Артоболевському. [128], Н. А. Бернштейну [105], В. В. Веліченку [102], М. М. Ткачу [38, 39], К. Чов (*C. Chow*), Е. Чеморі (*A. Chemori*), Е. Домбер (*E. Dombre*) [109], Е. Френк (*A. Frank*) [19], С. Ле-Флок (*S. Le Flock*), Д. Якобсон

(D. Jacobson) [11], С. Крут (S. Krut), Е. Мейбрідж (E. Muybridge) [18], Р. Мак-Гі (R. McGee) [15], Т. Мак-Гір (T. McGeer) [118], Е. Пей (A. Pai) [110], Р. Томовіч (R. Tomovic) [13], М. Вукобратович (M. Vukobratovic) [122] та інші.

Так, у роботах [11, 12] автором виконані перші наукові спостереження за рухом тварин та людини. Зроблено кінограми та ескізні роботи щодо моторики і ритміки руху, визначено та класифіковано фази людської ходи (рис. 1.3) і вперше застосовано метод кінограми руху. На основі даних, отриманих за допомогою кінограми (рис. 1.3), стало можливим визначити пропорції і положення ланок, діапазони кутів у шарнірах, кінематику (рис. 1.4) та ритміку руху АКА.

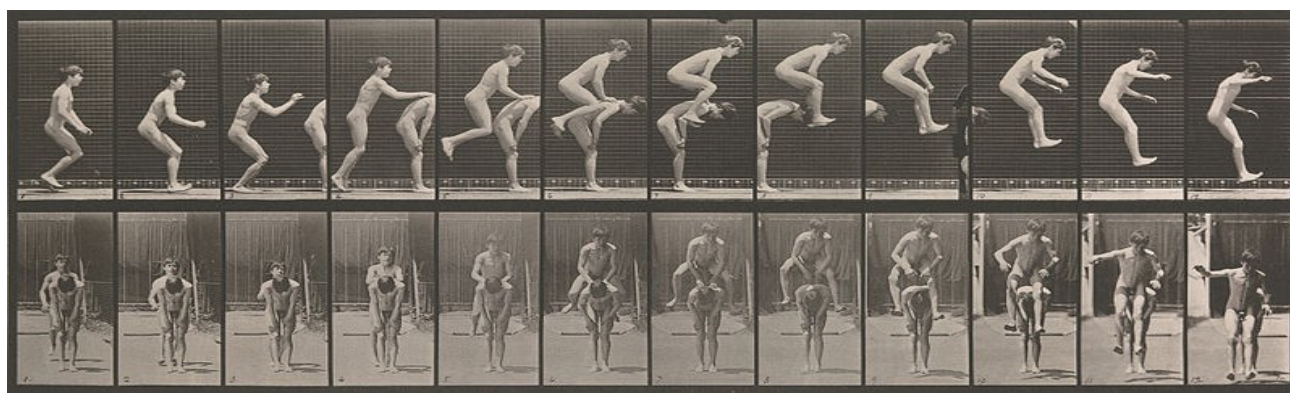


Рисунок 1.3 – Циклічність фаз переміщення стрибком

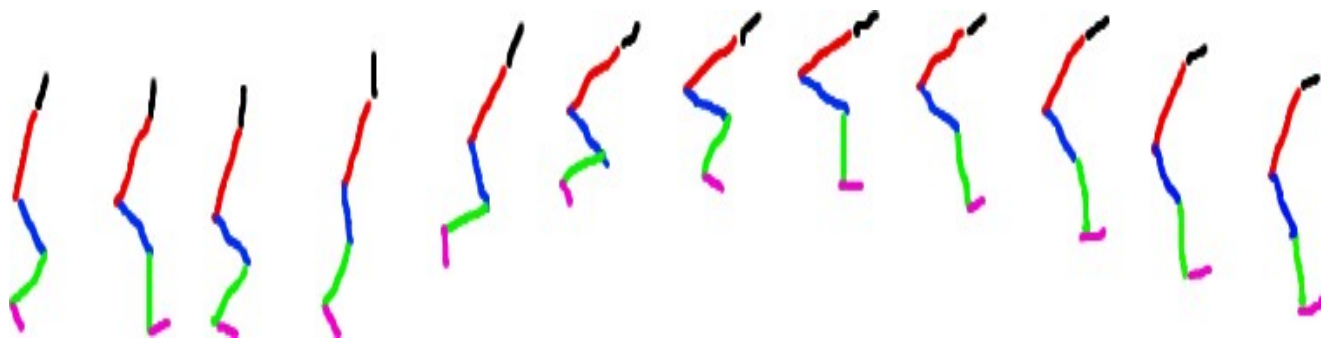


Рисунок 1.4 – Двомірна кінематична модель АКА, отримана за допомогою кінограми Е Муйбриджа

Також варто зауважити, що означені характеристики визначають положення точки центру мас, а відтак, можуть застосовуватися для вирішення задач моніторингу стану рівноваги людини або антропоморфного апарата в різних його положеннях.

Ґрунтуючись на роботах Е. Мейбріджа, радянським лікарем та науковцем М. А. Бернштейном встановлено фазовість і циклічність руху людини [105]. Відмічено алгоритмічний характер положення ланок опорно-рухового апарата

людини, в залежності від місцезнаходження її ТЦМ. Вперше припущено участь вестибулярного апарату та тактильної чутливості кінцівок у дотриманні статичної рівноваги людини [105].

У роботах Т. Мак-Гіра [127, 129, 132 138] виконано побудову моделі двовимірного крокуючого апарату з використанням математичних засобів його синтезу. Зокрема, для опису кінематичної схеми і динаміки руху автор застосував методи теоретичної механіки та елементи теорії стійкості, а для формування рівняння руху – теорію про кінцеві стани [106]. Кінематична структура моделі крокуючого апарату (рис. 1.5) налічує три ланки, які формують дві одноланкові ноги та корпус. Взаємний рух ланок даної моделі забезпечується одноосевим шарніром. Кутове положення ланок визначається параметрами $-\Delta\theta_f$ і $-\Delta\theta_c$. Маса ланок задаються за допомогою параметрів m_h, m_c, m_f – відповідно для корпусу, випереджаючої та відстаючої ноги. Довжини ланок задані параметрами l, c . До того ж, c – задає відстань від точки дотику ОП до ТЦМ ланки. Особливістю розглянутої моделі є будова стопи апарату. Так, область дотичних точок ніг апарату до ОП сформована сектором кола з радіусом R . Таке подання дає змогу описувати кутове положення апарату методом напрямних косинусів.

У роботі автор також демонструє динаміку моделі апарату. Так, рух апарату відбувається за принципом почергового переносу однієї з ніг у нове положення, подібно до оберненого маятника. Врахування моментів при зіткненні ніг з ОП описується так:

$$H^b = (\cos 2\alpha_0 + r_{gr}^2) ml^2 \Omega$$

$$H^a = (1 + r_{gr}^2) ml^2 \Omega$$

де: H^b, H^a – моменти до зіткнення та після зіткнення відповідно; кут α_0 – кут який описується як $\theta = -\alpha_0$ у разі зупинки апарату і змінюється в діапазоні $[-\Delta\theta() \dots \Delta\theta(c)]$.

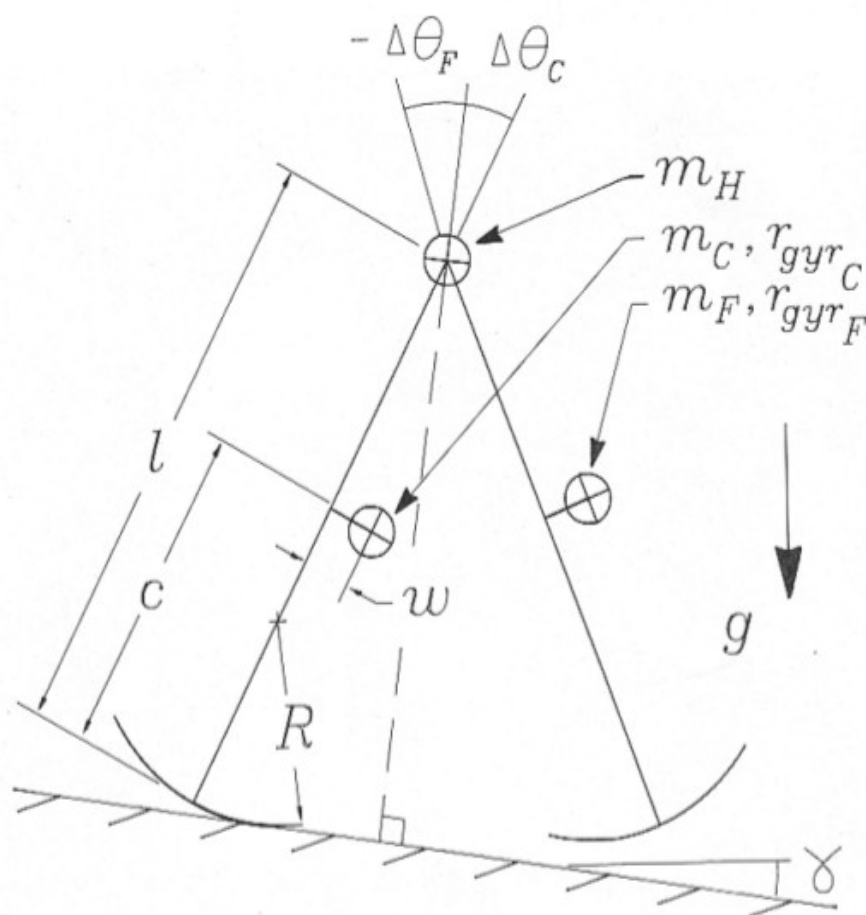


Рисунок 1.5 – Кінематична схема крокуючого апарата з радіальними опорами, задана в сагітальній площині: $-\Delta\theta_F, \Delta\theta_C$ – діапазон відхилення ніг апарата; ω – відхилення проекції ТПЦМ; φ – максимальний кут нахилу опорної поверхні; g – спрямування вектора сили тяжіння; c, l – довжини ланок апарата; m_H, m_c, m_f – маси апарата і його ланок; r_{gyr_c}, r_{gyr_f} – сили, які виникають у наслідок взаємодії апарата з ОП; γ – кут нахилу ОП

Під час переносу ноги точка проекції центра мас апарата переміщується від дотичних точок задньої ноги до дотичних точок передньої ноги. Таким чином, після виходу ТПЦМ за межі стопи апарата, він починає завалюватися. Фізична реалізація апарата зображена на рис. 1.6.

У працях К. Чов і Д. Якобсона [111, 129] показано застосування методів оптимального програмування для задання положення ланок апарата. Математична модель, що використовувалася автором для застосування вказаних методів, базувалася на три-ланковій системі твердих тіл. Кожна з ланок системи характеризувалася масою та довжиною. Особливістю застосування даної моделі є відсутність у неї ланок стоп, що дало змогу використати методи дотримання рівноваги, що базуються на теоремі Ляпунова для систем маятникового типу.

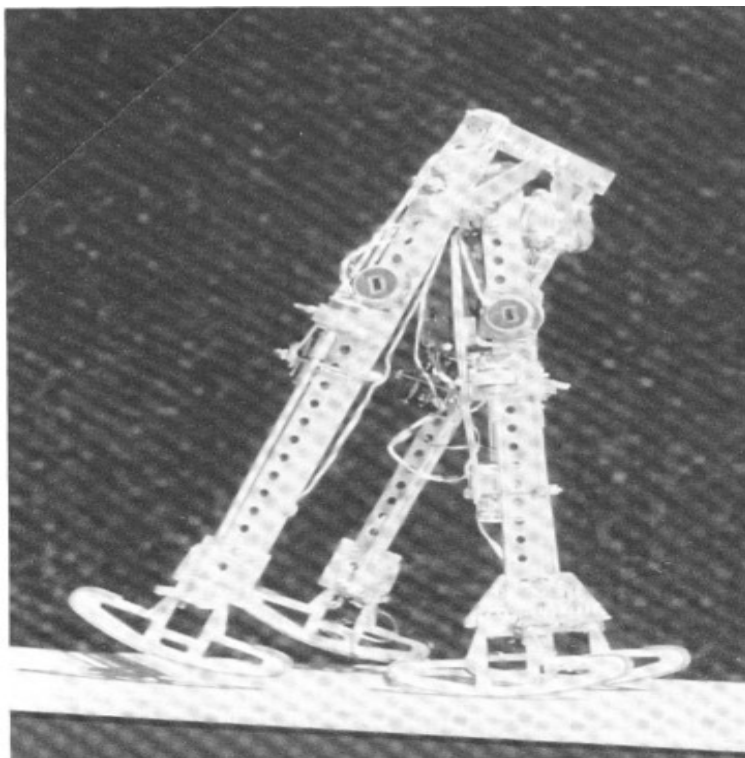


Рисунок 1.6 – Крокуючий апарат з перекочувальним принципом руху

Натомість у публікаціях М. Вукобратовича [11, 12, 106] для побудови статичної моделі АКА було обрано двовимірну та тривимірну системи координат, що використовувалися для дослідження кінематики та динаміки руху, відповідно. Так, у публікації [106] автором побудовано модель з п'яти твердих тіл, які пов'язані між собою у кінематичні пари через обертальні шарніри. Дана модель складається з цільного одно-ланкового корпусу, ланок бедер та ланок гомілок. Усі ланки моделі зв'язані в розімкнений кінематичний ланцюг засобами одно-осьових, двохосьових та три-осьових шарнірів. Модель формалізує кінематичну взаємодію між ланками крокуючого апарата та застосовується для його побудови.

Наведена в роботі модель робота дає змогу задавати параметри мас ланок, положення їх ТЦМ, довжин та моментів інерції. Математичний апарат, що застосовувався для побудови моделі, базувався на рівняннях Лагранжа. Перехідні значення кутів та положення ланок визначалися за допомогою методу кутів Ейлера. Моменти інерції у шарнірах апарата визначалися з рівняння про моменти стержнів, для випадку, коли стержень має малий радіус перерізу.

У публікації “*Contribution of Actuated Head and Trunk to Passive Walkers Stabilization*” [88] авторів М. Беналеге (M. Benallegue), Дж.-П. Ламонда

(J.P. Laumond) і Е. Бертоза (A. Berthoz) показано розробку двовимірної моделі антропоморфного крокуючого апарата для задач пасивної ходи. Модель налічує дві одноланкові ноги та дволанковий корпус. Кожна з ланок моделі характеризується довжиною l та масою m , відповідно.

Динаміка моделі описується вектором x , який має вигляд $x = [\theta, \varphi, \alpha, \beta, \dot{\theta}, \dot{\varphi}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}]^t$, де параметр t визначається відносно моменту зіткнення ланки апарата з опорною поверхнею. Характер зіткнення не є пружним, тому управління моделлю може виконуватися методом кінцевих станів. Динаміка моделі простежується в інтервалі між зіткненнями ніг з ОП і формалізується у вигляді рівняння $\tau_k = [\tau_{t,k} \ \tau_k]^t$.

Зміна параметрів вектора стану описується так:

$$x_{k+1} = f(x_k, \tau_k)$$

де f — функція, що набуває приросту параметрів вектора x , у проміжку часу між τ_{k-1} і τ_k .

Для моделювання динамічних процесів управління рівновагою АКА авторами застосовано принцип теореми Ляпунова, що в значній мірі обмежує структуру кінематичної схеми апарата.

Натомість, у публікації “*A Control Architecture With Stabilizer For 3D Stable Dynamic Walking of SHERPA Biped Robot on Compliant Ground*” [109] авторами Е. Черомі (A. Chemori), С.Ле-Флоком (S. Le Flock), С. Крутом (S. Krut) і Е. Дембре (E. Dombre) показано побудову і застосування кінематичної моделі антропоморфного крокуючого апарата, що налічує 12 ланок. До того ж, всі ланки переміщуються з врахуванням наявної опорної поверхні і мають 18 ступенів свободи. Для управління моделлю значення кутів задаються у вигляді вектора управління $X \in R^{18}$. Тоді, як сама модель описується вектором $X_{tags} = f(q); q \in R^{18}; X_{tags} \in R^{45}$, а її зворотня модель (простір станів) подається так: $q = f^{-1}(X_{tags}); q \in R^{18}; X_{tags} \in R^{45}$. Графічна інтерпретація кінематичних зв'язків запропонованої моделі АКА зображена на рис. 1.7.

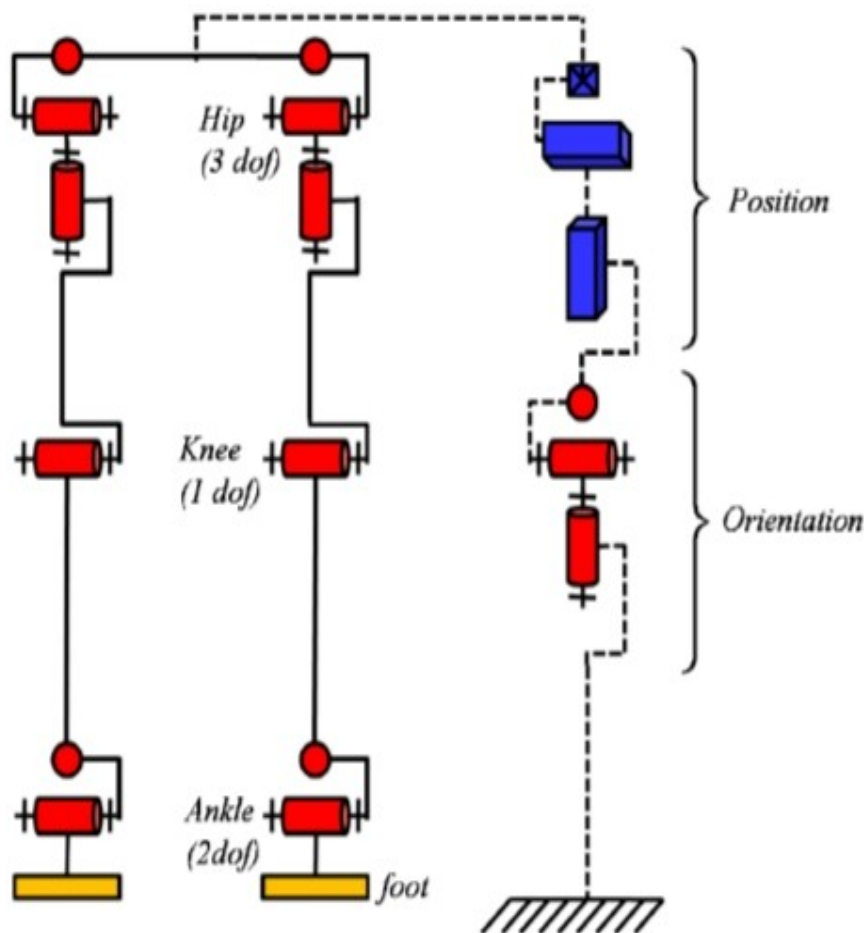


Рисунок 1.7 – Кінематична схема тривимірного АКА з 18 ступенями свободи: *Hip*, *Knee*, *Ankle* – шарніри апарата; *dof* – кількість ступенів свободи у шарнірі; *Position* – блок схеми, що відповідає за переміщення апарата; *Orientation* – блок схеми, що відповідає за розворот апарата

Зокрема, з рис. 1.7 видно, що кутове переміщення у тазобедерному шарнірі задається трьома ступенями свободи, в гомілкобедровому шарнірі – одним ступенем свободи, тоді як у гомілокостоповому шарнірі – двома ступенями свободи.

Особливістю розглянутої моделі є наявна група шарнірів *Position*, *Orientation* (рис. 1.7), які задають кутове та лінійне положення моделі АКА відносно опорної поверхні. На основі запропонованої кінематичної моделі авторами побудовано динамічну модель апарата, що налічує 18 ступенів свободи. Динаміка моделі задана рівняннями Лагранжа [110] у такому вигляді:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Su$$

де: $q = [q_1, \dots, q_{12}, \omega_x, \omega_y, \omega_z, T_x, T_y, T_z]^T \in R^{18}$ – вектор узагальнених координат;

$M(q) \in R^{18 \times 18}$ – матриця інерції ланок; $C(q, \dot{q}) \in R^{18 \times 18}$ – матриця Коріолісових та

доцентрових прискорень; $G(q) \in R^{18}$ – вектор сили тяжіння; $u \in R^{12}$ – вектор вхідних управляючих впливів; $S \in R^{18 \times 12}$ – матриця розподілу обертових моментів шарнірів. У випадку дотику ланки (ланок) до ОП, рівняння динаміки моделі АКА задається рівнянням:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Su + J(q)^T \lambda,$$

де λ і $J(q)$ – відповідно, Лагранжеві множники та матриця Якобі.

До складу розглянутої моделі, авторами інтегровано додаткову модель, що описує взаємодію стопи крокуючого апарата з ОП.

У роботі “*Control of Biped Robot with Stable Walking*” [119] авторів Т. Гуй (T.D. Huy), Н. Чуонг (N.C. Cuong) та Н. Пхонг (N.T. Phuong) кінематична модель апарата має 10 ступенів свободи. Схема моделі, яка зображена на рис. 1.8, має 8 ланок, серед яких ланка $TorsoC$, що задає тулуб апарата, ланка BK , яка визначає таз апарата, ланки KK_1, BB_1 , які задають бедра АКА та ланки K_1E, B_1B_2 , що задають його гомілки. Кожна з ланок моделі характеризується масою та довжиною, що задають параметрами m, l відповідно. Кінематична взаємодія ланок задається координатами точок, які формують відповідні ланки (рис.1.8). Запропонована в роботі модель задана у тривимірному просторі, що відповідає прийнятому поданню координат точок. Також у розглянутій моделі АКА є деякі особливості, зокрема, наявний антропоморфний набір ланок та ступенів свободи (за виключенням ступеней свободи розвороту ніг у площині Z). Модель також містить ланки стоп і тазу, що дає змогу досліджувати динаміку процесів руху АКА.

Положення моделі задається значеннями кутів: $[\theta_1, \dots, \theta_{10}]$, де: $\theta_1, \theta_2, \theta_{10}, \theta_9$ - кути між стопою та гомілкою у площинах Z та X правої і лівої ноги, відповідно; θ_3, θ_8 - кути між гомілками та стегнами правої і лівої ноги, відповідно; $\theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7$ - кути повороту ланок бедер у площинах X та Y для правої і лівої ноги, відповідно.

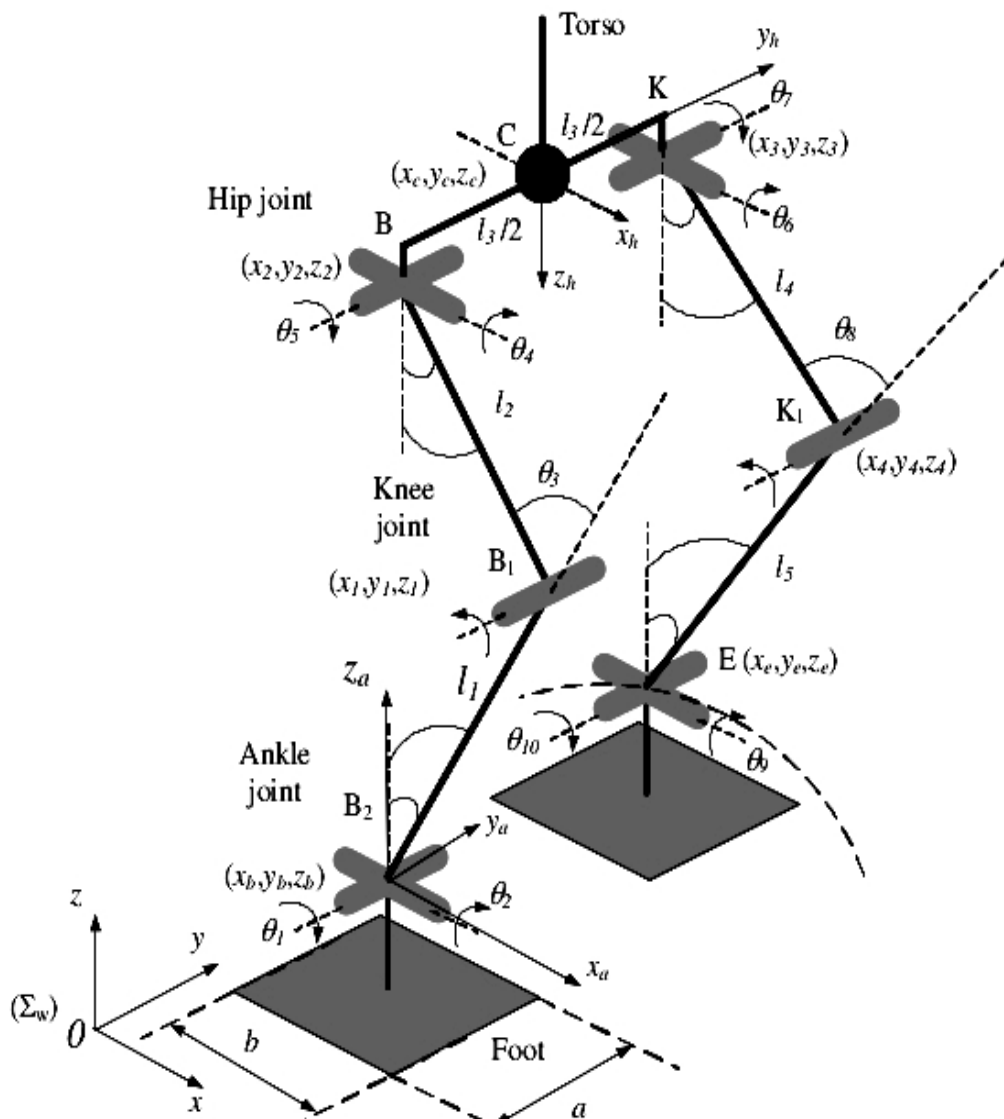


Рисунок 1.8 – Кінематична модель АКА з десятима ступенями свободи: x, y, z – всі базової системи координат апарата; a, b – ширина і довжина стопи; B, B_1, K, K_1, E – шарніри апарата; Θ – кути кінематичних пар ланок (у динамічній інтерпретації моделі описують моменти ланок); C – положення ТЦМ апарата; *Ankle joint, Knee joint, Hip joint* – блоки шарнірів апарата; *Torso* – ланка корпусу (яка включає руки, голову, шию тощо)

Статичне положення моделі задається координатами точки центру тазу і формалізується так:

$$x_{ca} = l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_3 - \theta_1)$$

$$y_{ca} = l_1 \sin(\theta_2) + l_2 \cos(\theta_3 - \theta_1) \sin(\theta_2) + \frac{l_3}{2} \cos(\theta_3 + \theta_4)$$

$$z_{ca} = l_1 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) + l_2 \cos(\theta_3 - \theta_1) \cos \theta_2 - \frac{l_3}{2} \sin(\theta_2 + \theta_4)$$

Положення точки центру мас моделі апарата задано так:

$$x_{com} = \frac{m_b x_b + m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_c x_c + m_3 x_3 + m_4 x_4 + m_e x_e}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e};$$

$$y_{com} = \frac{m_b y_b + m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_c y_c + m_3 y_3 + m_4 y_4 + m_e y_e}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e};$$

$$z_{com} = \frac{m_b z_b + m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_c z_c + m_3 z_3 + m_4 z_4 + m_e z_e}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e},$$

де m – маси, які зосереджені у шарнірах кінематичних пар (відповідно рис. 1.8).

На основі кінематичної моделі авторами роботи побудовано модель динаміки апарата. Зважаючи на те, що при зміні опорної фази кінематична модель і динаміка апарата також зазнають змін, у роботі побудовано кінематичні та динамічні моделі для одноопорної та двоопорної фаза руху.

Кінематична модель АКА в одноопорній фазі задається координатами ТЦМ антропоморфного крокуючого апарата $C[x_{ca}, y_{ca}, z_{ca}]$, що зв'язана з точкою на опорі вектором $q = [\Theta_r, \Theta_p, r]^T$. Параметри, що входять до векторів C та q , визначені на рис. 1.8 та рис. 1.9.

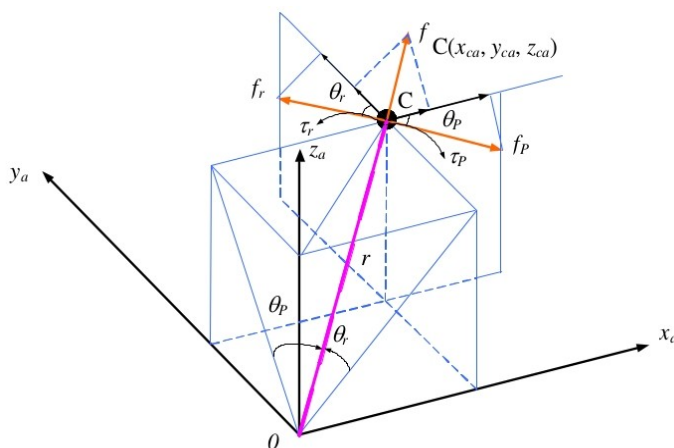


Рисунок 1.9 – Тривимірна модель взаємодії ноги АКА з опорною поверхнею:

x_a, O, y_a – орти системи координат моделі; Θ_r, Θ_p – кути (у динамічній інтерпретації – моменти) ланки OC ; r – відстань від базової точки до ТЦМ; C – ТЦМ; f_r, f_p, f – сили, які діють на ТЦМ у проєкціях на орти системи координат; x_{ca}, y_{ca}, z_{ca} – система координат ТЦМ; τ_r, τ_p – моменти ланки OC

Динамічна поведінка моделі АКА описана рівняннями Лагранжа в такому вигляді:

$$m \begin{pmatrix} \ddot{x}_{ca} \\ \ddot{y}_{ca} \\ \ddot{z}_{ca} \end{pmatrix} = (J^T) \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_p \\ f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{pmatrix},$$

де J – матриця Якобі, що задана так:

$$J = \frac{dp}{dq} = \begin{pmatrix} 0 & rC_p & S_p \\ -rC_r & 0 & -S_r \\ \frac{-rC_r S_r}{D} & \frac{-rC_p S_p}{D} & D \end{pmatrix}.$$

Роді рівняння динаміки у площині x АКА подано так:

$$m(-z_{ca}\ddot{y}_{ca} + y_{ca}\ddot{z}_{ca}) = \tau_x - mgy_{ca}, \tau_x \equiv \frac{D}{C_r} \tau_r.$$

Аналогічним чином описані рівняння динаміки, що задають рух АКА у площинах y і z .

У розглянутих роботах [11, 13, 15, 19, 102, 105, 109, 110, 111, 118, 122, 128] для вивчення антропоморфного руху та розробки відповідних математичних, алгоритмічних, програмних і апаратних засобів авторами побудовано низку математичних та комп'ютерних моделей, що у визначеній мірі описують структуру зв'язків і динаміку руху крокуючого апарата. Спільною особливістю робіт [11, 12, 15, 16, 17, 18, 106, 111] є відсутність опису ланок стоп, що характерно при вивченні процесів переміщення ланок ніг, корпусу та визначенні параметрів, які виникають при зміні фази руху. Натомість, у роботах [11, 12, 72–81, 92, 109, 119] описані моделі апаратів мають ланки стоп, але задані вони без врахування інерції і визначені у тривимірному просторі. Кінематичні структури крокуючих апаратів, подані у вказаних публікаціях, нараховують велику кількість ступенів свободи для опису людської ходи [106]. Динаміка АКА заснована на перерахунку позицій та моментів в

шарнірах відносно корпусу з застосуванням методів динаміки абсолютно твердих тіл, зокрема, методу Ньютона-Гауса, Лагранжа тощо.

У публікації К. Уотта [123] побудовано математичну та комп'ютерну моделі крокуючого апарата з антропоморфною будовою. У роботі наведено: визначення простору стану робота; побудову моделі; визначення поняття та пошук положення точки нуль-моменту (T0M); визначення залежності усталеності крокуючого апарата від положення його T0M; пошук положення ТЦМ тощо. Зокрема, простір стану апарата подано векторами його просторового положення:

$$Q \times SE(3)$$

$$H_b \in SE(3)$$

$$q \in Q, Q \equiv R^n, Q \equiv T^n = S^1 \times S^1 \times \dots \times S^1$$

де змінні векторів визначені на рис. 1.10.

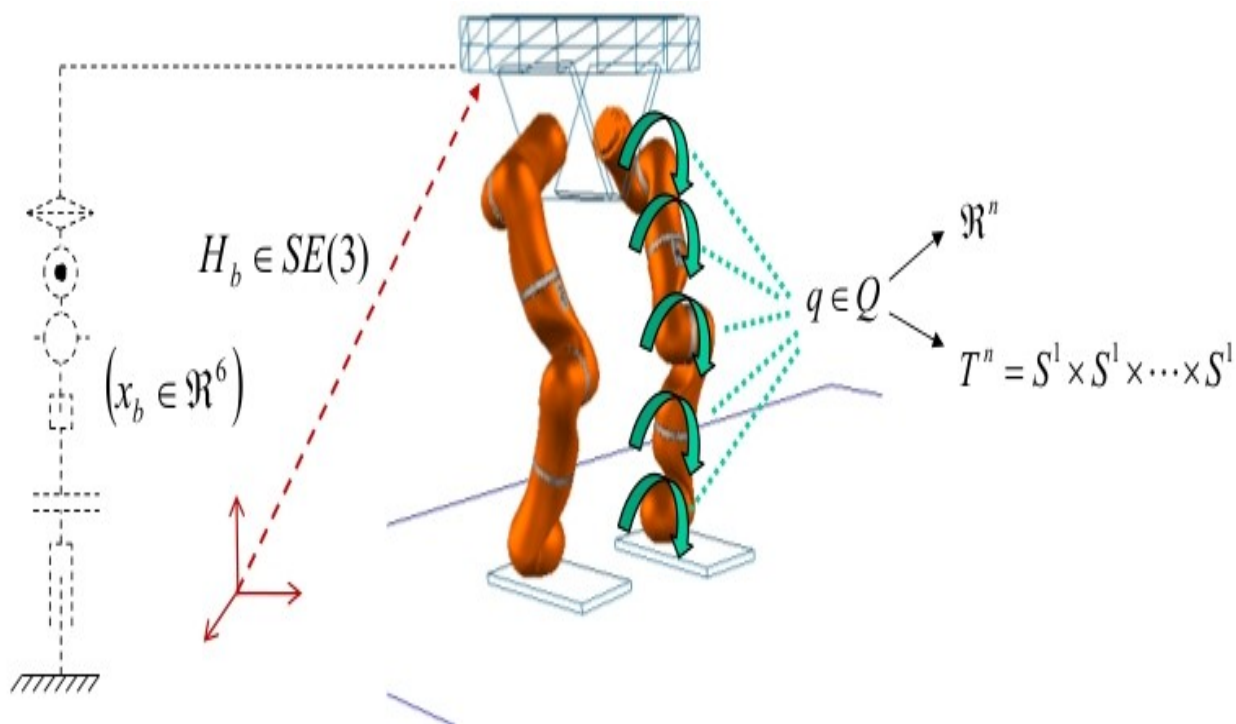


Рисунок 1.10 – Комп'ютерна візуалізація АКА з відображенням його векторів стану:

\mathbb{R}^6 – простір шести вимірів; $SE(3)$ – простір лінійного переміщення; H_b – базова точка моделі; x_b – ступінь свободи лінійного переміщення ланки відносно осі x ; q – індекс шарніра; Q – вектор стану кутів кінематичної схеми апарата; \mathbb{R}^n – простір з n вимірами; T^n – вектор стану апарата поданий операторною формою; S^1 – матриця кутового перетворення

Моменти в шарнірах АКА визначені рівнянням:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + J(q)^T F_{ext},$$

$$F_{ext} \in R^6 [\in se(3)]$$

У випадку, якщо положення базової точки апарата змінюється, виконуються такі рівняння:

$$\begin{bmatrix} M_x(q) & M_{xq}(q) \\ M_{qx}(q) & M(q) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \vec{C}(q, \dot{x}_b, \dot{q}) * \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \vec{q}(x_b, q) = \begin{bmatrix} F_b \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_b(q)^T \\ J(q)^T \end{bmatrix} * F_{ext}$$

Підводячи підсумки можна визначити, що наведені в роботах методи подання моделей АКА мають важливі особливості:

1. Поліморфність. Модель придатна для зображення поведінки апарата при одноопорній та двохопорній фазах руху;
2. Спостережуваність. Модель одночасно може бути застосована для моніторингу і управління положенням крокуючого апарата.

У всіх розглянутих вище моделях крокуючі апарати подано з врахуванням чотирьох основних складових:

- структури кінематичних ланцюгів;
- динамічної поведінки апарата;
- взаємодії апарата з опорною поверхнею;
- взаємодії з сенсорною системою та системою управління.

Їх кінематичні моделі поділяються за структурою на:

- оглядові та концептуальні моделі апаратів:
 - маятникові моделі;
 - моделі взаємодії ланок у складі кінематичної пари;
 - моделі взаємодії кінематичної пари ланок із середовищем;
 - моделі ланок, що потребують особливих методів формалізації;
- двохопорні з птахоподібним типом згину кінематичних пар;

- моделі антропоморфних апаратів:
 - моделі з дволанковими опорами без стоп;
 - моделі з дволанковими опорами і стопами;
 - моделі, в яких ланки опор та (або) стопи невагомі;
 - моделі з дволанковими опорами та дволанковими стопами;
 - моделі, ланки та (або) опори яких невагомі;
 - моделі, що налічують дволанкові опори, стопи та корпус;
 - моделі, в яких ланка корпусу невагома;
- моделі апаратів, що налічують більше двох опор:
 - моделі триопорних апаратів;
 - моделі апаратів з підпорою для “руху тиранозавра”;
 - моделі апаратів із трьома опорами маятникового типу;
 - моделі багатоопорних апаратів.

На відміну від кінематичних моделей, динамічні моделі враховують сили, що спричиняють переміщення описують рух усього крокуючого апарата відносно нерухомої точки простору, та рух ланок апарата одна відносно одної. Проаналізовані динамічні моделі крокуючих апаратів базуються на застосуванні динаміки твердих тіл або комп'ютерній комбінаторній динаміці. Для опису динаміки апаратів застосовують методи: Ейлера, Ньютона, Ньютона-Ейлера, рівняння Лагранжа, алгебри кватерніонів тощо. У разі використання комп'ютерної комбінаторики, застосовують метод, що базується на адаптивних нейронечітких методах (*ANFIS*).

1. 3. 2. Аналіз існуючих методів та підходів до управління усталеним рухом антропоморфних крокуючих апаратів

Проблема управління усталеним рухом антропоморфних крокуючих апаратів є актуальною лише при розгляді двоногих, триногих та чотириногих систем. Дотримання ж усталеного руху апаратів, які налічують більше чотирьох ніг, вирішується вже шляхом перебору стійких конфігурацій взаємодії опор апарата з поверхнею.

У разі, якщо крокуючий апарат є антропоморфним, вирішення задачі управління його усталеним рухом може розглядатися у двох взаємопов'язаних ситуаціях:

- перша ситуація, яка супроводжується рухом АКА відповідно до заданої траєкторії переміщенням його ТЦМ, а процес зміни його стану здійснюється від однієї опорної фази з усталеними характеристиками до іншої опорної фази. При цьому, перехід між фазами характеризується динамічною усталеністю руху.
- друга ситуація, коли антропоморфний крокуючий апарат зберігає поточне опорне положення та не змінює своєї опорної фази. При цьому, в кожний момент часу крокуючий апарат залишається стійким.

Відтак, варто зауважити, що критерії збереження усталеного руху для вказаних випадків відрізнятимуться, а забезпечення усталеного руху АКА у визначеній фазі та при заданій траєкторії руху ТЦМ передбачатиме вирішення задач управління усталеним рухом апарата.

Зважаючи на те, що збереження усталеного руху є однією з найважливіших задач при побудові крокуючих апаратів, вагомий внесок у її вирішення внесли такі вчені: Е. Мейбрідж (*E. Muybridge*) [28], Дж. Хіл (*J. Hill*) [22], В. Фарел (*W. Ferrell*) [24], Р. Джонсон (*R. Johnson*) [25], Р. Мак-Гі (*R. McGee*) [9, 23], Т. Мак-Гір (*T. McGeer*) [118], А. Френк (*A. Frank*) [26], Е. Пей (*A. Pai*) [27], К. Чов (*C., Chow*), Д. Якобсон (*D. Jacobson*) [111], М. Вукобратович (*M. Vukobratovic*) [23, 24, 122, 220], Е. Черомі (*A. Chemori*), С. Ле-Флок (*S. Le Flock*), С. Крют (*S. Krut*), Е. Домбре (*E. Dombre*) [109], Г. Гемамі Н. Немамі (*H. Hemami*) [210] та інші.

Зокрема, у своїх роботах автори Ц. Чоу і Д. Якобсон [111] дослідили стійкість опорної фази (пози) із застосуванням другого методу Ляпунова [21] на прикладі антропоморфного апарата з динамічними властивостями, властивими людському ОРА. Ними встановлено, що через те, що на верхню частину людського тіла доводиться 70% загальної маси, та для опису АКА може бути застосована спрощена модель. В такому випадку, корпус вважається твердим тілом з трьома кутовими ступенями свободи θ, ψ, φ , що формують інерційну систему відліку

(рис. 1.11) на базі осей Ox_0, Oy_0, Oz_0 , а система координат Ox', Oy', Oz' пов'язана з цим тілом. Кути повороту корпусу реалізовані за рахунок трьох послідовних поворотів навколо осей, що зв'язані з тілом. Кут θ задається, як результат повороту корпусу навколо осі Oz' або осі Oz_0 і описує рух корпусу в сагітальній площині Ox_0y_0 . Кут ψ є результатом повороту тіла навколо осі Ox' , що відповідає перекочуванню апарата. Обертання тіла навколо власної осі Oy' описується кутом φ .

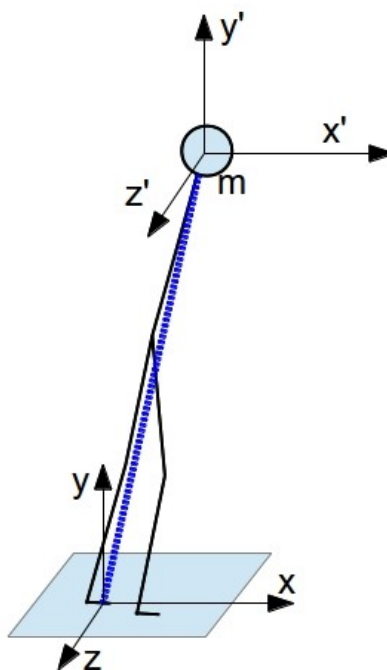


Рисунок 1.11 – Перетворення системи координат і модель корпусу крокуючого апарата із застосуванням принципу зворотнього маятника:
 x, y, z – положення базової точки моделі апарата; x', y', z' – положення ТЦМ; m – ТЦМ апарата

Вказані кути відрізняються від кутів між-ланкових з'єднань, що містяться в поданих аналітичних моделях із застосуванням кутів Ейлера. Описане застосування кутів θ, ψ, φ пояснюється тим, що при малих відхиленнях кути Ейлера стають погано спостережуваними. А це саме той випадок, що виникає при розв'язуванні задач, які пов'язані зі стійкістю крокуючого апарата.

У роботі приймається твердження, що точка корпусу O є початком траєкторії руху ТЦМ, яка задана заздалегідь. Тоді її координати можуть бути визначені векторами $\vec{f}(t), \vec{g}(t), \vec{h}(t)$. У такому разі, координати точки центру мас у довільний момент часу визначаються так:

$$x_c = \vec{f}(t) + \rho \sin(\theta) \cos(\psi)$$

$$y_c = \vec{g}(t) + \rho \cos(\theta) \sin(\psi)$$

$$z_c = \vec{h}(t) + \rho \sin(\psi),$$

де ρ – відстань між O і центром мас O' .

Кінетична енергія поступального руху задана таким чином:

$$T_{\text{поступ.}} = \frac{1}{2} M (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2).$$

Кінематична енергія обертання виражена відносно основних осей рівнянням:

$$T_{\text{оберт.}} = \frac{1}{2} (I_0 \omega_1^2 + I_2 \omega_2^2 + I_0 \omega_3^2)$$

де: $\omega_i, i=1,2,3$ – кутові швидкості відносно осей Ox', Oy', Oz' , відповідно; I_0, I_2 – головні моменти інерції відносно цих осей. При цьому будуть виконуватися такі залежності:

$$\omega_1 = \dot{\psi} \cos(\varphi) + \dot{\theta} \sin(\varphi) \cos(\psi),$$

$$\omega_2 = \dot{\varphi} - \dot{\theta} \sin \psi,$$

$$\omega_3 = \dot{\psi} \sin(\varphi) - \dot{\theta} \cos(\varphi) \cos(\psi).$$

З наведених рівнянь, що визначають положення ТЦМ, значення кінетичної енергії поступального та обертального рухів та рівнянь моментів апарата, авторами були виведені рівняння для кінетичної та потенціальної енергії, з яких отримано рівняння руху апарата:

$$\frac{d}{dt} \frac{dT}{dq_i} - \frac{dT}{dq_i} + \frac{dV}{dq_i} = M_i,$$

де: q_i – кути кінематичних пар апарата; M_i – моменти відносно основних осей при вертикальному положенні апарата.

Зважаючи на те, що кут власного обертання апарата φ є малим, у порівнянні з кутами θ, ψ , авторами була побудована спрощена математична модель четвертого порядку, яка в загальному вигляді подається так:

$$\dot{x}_1 = x_3,$$

$$\dot{x}_2 = x_4,$$

$$\dot{x}_3 = (1 - \mu \sin^2(x_2))^{-1} [\mu \sin(2x_2) x_3 x_4 + c_0 (g + \ddot{g}) \sin(x_1) \cos(x_2) + u_1],$$

$$\dot{x}_4 = \frac{-1}{2} \mu \sin(2x_2) x_3^2 + c_0 (g + \ddot{g}) \sin(x_2) \cos(x_1) - c_0 \ddot{h} \cos(x_2) + u_2.$$

Тут фазовими змінними є: $x_1 = \theta, x_2 = \psi, x_3 = \dot{\theta}, x_4 = \dot{\psi}$, а керуючими впливами:

$$u_1 = \left(\frac{1}{A}\right) M_\theta, \quad u_2 = \left(\frac{1}{A}\right) M_\psi,$$

$$\mu = 1 - \frac{I_2}{A}, \quad c_0 = \frac{M_\rho}{A}, \quad A = I_0 + M \rho^2$$

За умов представлення моделі корпусу у вигляді оберненого маятника, очевидно, що точка $\theta = \psi = \dot{\theta} = \dot{\psi} = 0$ відповідає усталеному положенню. Враховуючи те, що при нормальній ході відхилення АКА по вертикалі є малим, авторами виконано лінеаризацію динаміки корпусу для підтримання вертикальної пози крокуючого апарата. У результаті такого спрощення зворотний зв'язок має вигляд:

$$u_1 = -k \dot{\theta} - [\omega_1^2 + 2c_0 g_0 \operatorname{sat}(\theta \dot{\theta}) + c_{0g}] \theta,$$

$$u_2 = -k \dot{\psi} - [\omega_2^2 + c_0 g + 2c_0 g_0 \operatorname{sat}(\psi \dot{\psi})] \psi,$$

де: $\operatorname{sat}(\theta \dot{\theta}) = 1$, якщо $[\theta \dot{\theta}] \geq 0$ і $\operatorname{sat}(\theta \dot{\theta}) = 0$ у інших випадках.

Аналогічно визначено і $\operatorname{sat}(\psi \dot{\psi})$.

Визначивши керуючі координати відносно рівняння руху апарата, матимемо прискорення відносно кутів θ, ψ :

$$\ddot{\theta} = (1 - \mu \sin^2 \psi)^{-1} *$$

$$*(\mu \sin(2\psi) \dot{\theta} \dot{\psi} - c_0 g (\theta - \sin \theta \cos \psi) - 2c_0 g_0 \sin(\theta) \dot{\theta} + c_0 g_0 \sin(2\pi t) \sin(\theta) - k \dot{\theta} - \omega_1^2 \theta),$$

$$\ddot{\psi} = \frac{-1}{2} \mu \sin(2\psi) *$$

$$*\dot{\theta}^2 - c_0 g \psi - \sin(\psi) \cos(\theta) - 2c_0 g_0 \sin(\psi) \dot{\psi} \psi + c_0 g_0 \sin(2\pi t) \sin \psi - k \dot{\psi} - \omega_2^2 \psi.$$

Звідси безпосередньо видно, що обернений маятник тепер стабілізовано. Однак, розміри області, при якій зберігається усталений стан, в рівнянні не визначені.

Визначивши функцію $f_\theta(\theta, \psi) = c_0 g (\theta - \sin(\theta) \cos(\psi))$, матимемо початкові значення кутів маятника. Тоді, $f_\theta(-\theta, \psi) = -f_\theta(\theta, \psi)$, тобто функція непарна відносно θ . Наразі, для всіх $\theta > 0$ і $-\pi < \psi < \pi$ маємо $(\theta - \sin(\theta) \cos(\psi)) > 0$, що виконується і при $f_\psi(\theta, \psi) = c_0 g (\psi - \sin(\psi) \cos(\theta))$. Таким чином, у функції $f_\theta(\theta, \psi)$ знак буде протилежним до кутового прискорення $\ddot{\theta}$, тоді, як у початкових рівняннях зворотнього маятника знакова величина відповідала кутовому прискоренню. Отже, поведінці АКА властиве пікове значення прискорення у точці екстремуму. Така поведінка властива маятниковим системам.

З метою узагальнення цієї аналогії, автори вважають, що рух апарата, в основному, задається пружною силою, що дає можливість розглядати симетричну модель, отриману з узагальненої моделі апарата:

$$\ddot{\theta} = -c_0 g (\theta - \sin(\theta) \cos(\psi)) - \omega^2 \theta,$$

$$\ddot{\psi} = -c_0 g (\psi - \sin(\psi) \cos(\theta)) - \omega^2 \psi.$$

Функція Ляпунова для цієї системи має такий вигляд:

$$V(x) = \frac{1}{2} (\omega_1^2 + c_0 g_0) \theta^2 + \frac{1}{2} (\omega_2^2 + c_0 g_0) \psi^2 + \frac{1}{2} (1 - \mu \sin^2(\psi)) \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} (\dot{\psi}^2 + c_0 g f(\theta, \psi)),$$

$$x = (x_1, x_2, x_3, x_4)' = (\theta, \psi, \dot{\theta}, \dot{\psi})',$$

$$f(\theta, \psi) = \frac{1}{2}\theta^2 + 1 \text{ pver } 2\psi^2 + \cos(\theta)\cos(\psi) - 1.$$

Так як $f(\theta, \psi) \geq 0$ для всіх $\theta, \psi, \cos(\theta)\cos(\psi) \leq 1$, то для всіх θ, ψ функції W_1, W_2 матимуть таке значення: $W_1(x) \leq V(x) \leq W_2(x)$, де:

$$W_1(x) = \frac{1}{2}(\omega_1^2 + c_0 g_0)\theta^2 + \frac{1}{2}(\omega_2^2 + c_0 g_0)\psi^2 + \frac{1}{2}(1 - \mu \sin^2(\psi))\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}\dot{\psi}^2,$$

$$W_2(x) = \frac{1}{2}(\omega_1^2 + c_0 g_0 + c_0 g)\theta^2 + \frac{1}{2}(\omega_2^2 + c_0 g_0 + c_0 g)\psi^2 + \frac{1}{2}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}\dot{\psi}^2.$$

Функції $W_1(x)$ і $W_2(x)$ визначені додатними для $\omega_1^2 \geq 0$, $\omega_2^2 \geq 0$, якщо $c_0 g, c_0 g_0$ – додатні. Таким чином, якщо $\omega_2^2 \geq 0$, то $V(x)$ також буде додатною.

Авторами визначено повну похідну $V(x)$ вздовж всієї траєкторії:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{d\theta}\dot{\theta} + \frac{dV}{d\psi}\dot{\psi} + \frac{dV}{d\dot{\theta}}\ddot{\theta} + \frac{dV}{d\dot{\psi}}\ddot{\psi},$$

яка з урахуванням функції Ляпунова має такий вигляд:

$$\frac{dV}{dt} = I_1 + I_2 + I_3,$$

де:

$$I_1 = \dot{\theta}[-2c_0 g_0 \sin(2\pi t) \cos(\psi) \sin(\theta)],$$

$$I_2 = \dot{\psi}[-2c_0 g_0 \sin(2\pi t) \cos(\theta) \sin(\psi)],$$

$$I_3 = -k(\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2).$$

Член I_1 від'ємний або нуль – для всіх значень $\theta, \dot{\theta}, \psi$. У зв'язку з тим, що I_2 має такий самий вигляд, що й I_1 , то $I_2 \leq 0$. Відтак буде справедливим

твердження, що $I_3 = -k(\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2) \leq 0, k \geq 0$. Звідси маємо, що $\frac{dV}{dt} \leq 0$.

Таким чином, V - є функцією Ляпунова для розглянутої системи, яка показує, що система є стійкою для будь-яких початкових умов кутів і кутових швидкостей. Проте рівняння повної похідної не враховує сили і моментів взаємодії апарата з ОП, а відтак не можуть бути визначені початкові та граничні значення похідних кутів і відповідних моментів, при яких апарат зберігатиме усталене положення на поверхні.

Робота Дж. Хіла [22] стосується управління позою антропоморфного крокуючого апарата і значно відрізняється від підходу, який застосований у роботі К. Чов і Д. Якобсона. Так, автор будує рівняння руху механізму, що складається з 7 ланок, які являють собою: корпус, стегно, гомілку, стопу, плече, передпліччя і голову. Для кожної з ланок задано масу і момент інерції. Наприклад, для корпусу використовується ланка довжиною l_{TR} з моментом інерції J_{TR} і центром мас, який розташований над тазом на відстані l_{TRM} .

Для того, щоб отримати рівняння руху такої системи, було використане рівняння Лагранжа у вигляді:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\dot{q}_i} \right) - \frac{dT}{dq_i} + \frac{dV}{dq_i} = Q_i, (i=1, \dots, n),$$

Де: q_i - узагальнена координата; \dot{q}_i - її похідна за часом; V - повна потенційна енергія системи; T - повна кінетична енергія; Q - узагальнена сила, яка породжена моментами м'язів і опорними реакціями.

Застосування рівняння Лагранжа другого роду призвело до побудови нелінійної моделі такого вигляду:

$$\ddot{A}z = B\dot{z}^2 + Cf(z) + V + Q,$$

де $\ddot{z}, \dot{z}^2, z, f(z)$ визначають наступні дев'яти-компонентні вектори:

$$[\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{\sigma}, \ddot{\gamma} - \ddot{\sigma}, \ddot{\beta} - \ddot{\gamma} + \ddot{\sigma} + \ddot{\alpha}, \ddot{\delta} - \ddot{\sigma}, \ddot{\delta} - \ddot{\sigma} + \ddot{\epsilon}, \ddot{\sigma} + \ddot{\zeta}] \in \ddot{z},$$

$$[\dot{x}^2, \dot{y}^2, \dot{\sigma}^2, (\dot{\gamma} - \dot{\sigma})^2, (\dot{\beta} - \dot{\gamma} + \dot{\sigma})^2, (\dot{\delta} - \dot{\sigma})^2, (\dot{\delta} - \dot{\sigma} + \dot{\epsilon})^2, (\dot{\sigma} + \dot{\zeta})^2] \in \dot{z}^2,$$

$$[x, y, \sin(\sigma), \sin(\gamma - \sigma), \sin(\delta - \gamma + \sigma), \cos(\beta - \gamma + \sigma + \alpha), \sin(\delta - \sigma), \sin(\delta - \sigma + \epsilon), \sin(\sigma + \zeta)] \in f(z),$$

$$[x, y, \sigma, \gamma - \sigma, \beta - \gamma + \sigma, \beta - \gamma + \sigma - \alpha, \delta - \sigma + \epsilon, \sigma + \zeta] \in z,$$

V – постійний вектор, отриманий з параметрів $\frac{dV}{dq_i}$, а Q – вектор узагальнених сил, породжений роботою внутрішніх сил шарнірів та опорних реакцій:

$$V = [V_1, V_2, \dots, V_9],$$

$$Q = [Q_x, Q_y, Q_v, Q_\gamma, Q_\beta, Q_\alpha, Q_\delta, Q_\epsilon, Q_\zeta].$$

Узагальнені сили визначаються двома етапами. Спершу приймається твердження, що опорні реакції дорівнюють нулю, і єдиними силами, що діють на систему є моменти, які діють відносно стегнового, колінного та гомілкового шарнірів, а також шарнірів плеча, ліктя та шиї. Вони позначаються $M_\gamma, M_\beta, M_\alpha, M_\delta, M_\epsilon, M_\zeta$, відповідно. Окрім того, вважається, що ці моменти породжуються силами, які діють лише між сусідніми ланками апарата.

Далі до моделі додаються ефекти, пов'язані з опорними реакціями п'ятки та носка апарата.

На другому етапі розраховуються узагальнені сили відповідних реакцій опори: $F_{Hx}, F_{Hy}, F_{Tx}, F_{Ty}$, які зображуються за допомогою наступних рівнянь:

$$Q_x = F_{Tx} + F_{Hx}, \quad Q_y = F_{Ty} + F_{Hy}, \quad Q_v = -F_{Ty} X_{TRT} + F_{Hy} X_{TRH} - F_{Hx} Y_{TRH},$$

$$Q_\gamma = M_\gamma + F_{Ty} X_{HT} + F_{Tx} Y_{HT} + F_{Hy} X_{HH} + F_{Hx} Y_{xH}, \quad Q_\beta = M_\beta - F_{Ty} X_{kT} + F_{Hy} X_{kH} - F_{Hx} Y_{kH},$$

$$Q_\alpha = M_\alpha - F_{Ty} X_{AT} - F_{Tx} Y_{AT}, \quad Q_\delta = M_\delta, \quad Q_\epsilon = M_\epsilon, \quad Q_\zeta = M_\zeta.$$

На основі повної нелінійної диференційної моделі $\ddot{A}z = B\dot{z}^2 + Cf(z) + V + Q$, автором змодельовано три ситуації стабілізації апарата:

1. Вільне падіння при відсутності моментів у шарнірах. Апарат вільно падає,

поки не дотикається до опорної поверхні. Після взаємодії з поверхнею він змінює позу під дією сили реакції опори;

2. Моменти у шарнірах пропорційні кутам та кутовим швидкостям у шарнірах;
3. Стрибок. Закон керування, що визначає моменти у шарнірах, вибраний так, щоб ланки ноги апарата розпрямилися і стопа відштовхнулася від опорної поверхні.

Хоча в роботі застосована повна нелінійна модель АКА, результати моделювання системи управління мають обмежену можливість практичного застосування. Моделювання ситуацій не несе принципово нових рішень для задачі управління крокуючим апаратом, а проблема, яка пов'язана з реакціями поверхні, не вирішена, так як вираження значень цих реакцій, опираючись лише на координати п'яти та носка, не несе заданої величини та напряму прикладення сили та моменту. До того ж, закон руху вибраний так, щоб звести всі внутрішні кути до нуля, а єдиний зовнішній кут ψ враховується лише у зворотньому зв'язку, що не вирішує задачу визначення зв'язку між зовнішніми та внутрішніми координатами.

Під час дослідження усталеної пози крокуючих апаратів автори Р. Мак-Гі [9, 23] і Е. Пей [27] знехтували масою опор. У результаті такого спрощення рівняння руху апарата лінеаризувалися. Однак, у їх роботах розглядалося управління чотириногим крокуючим апаратом, певні ідеї та методи якого можна застосувати і для управління двоногим антропоморфним крокуючим апаратом. Крім того, в роботі запропоновано управління усталеним рухом апарата за принципом телеуправління, але при цьому, закон руху задається людиною, а його виконання покладено на системи апарата.

Загальний вигляд запропонованої СУ показано на рис. 1.12. Як видно, в її основу покладена концепція людино-машинної взаємодії.

Автори роботи вважають, що запропонована система управління є прикладом людино-машинного симбіозу, у якому ефективність роботи людини буде значно вищою у порівнянні з режимом телеуправління. Водночас можливості такої системи мають бути вищими, ніж у автоматичної СУ, так як задачею ЕОМ залишається лише обрахунок відносно простих задач планування траєкторії.

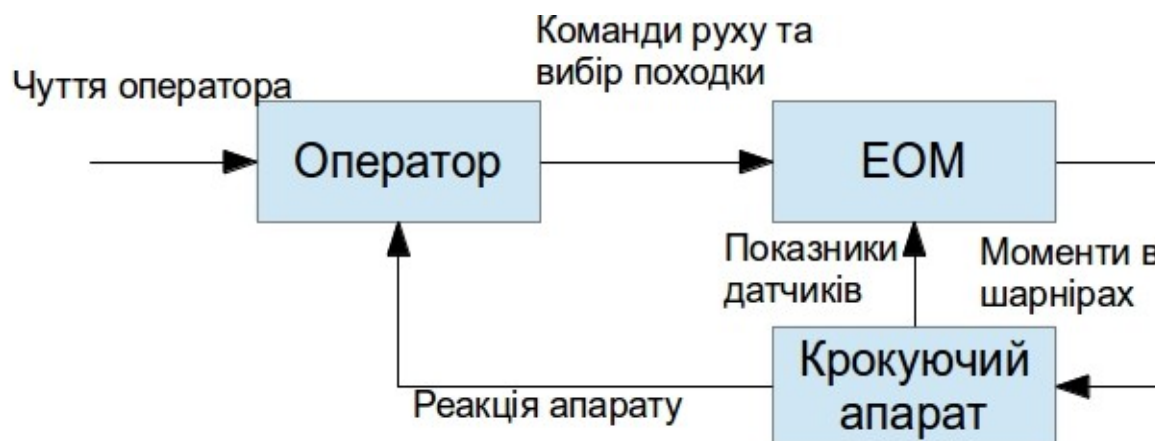


Рисунок 1.12 – Блок-схема людино-машинної СУ усталеним рухом крокуючого апарата

У роботі наведено СУ дотриманням усталеного руху апарата при збереженні ним заданої опорної фази, для реалізації якої застосовано концепцію кінцевих станів і відповідних кінцевих автоматів.

Для реалізації даної концепції управління авторами запропоновано лінеаризувати функцію управління дванадцятого порядку, а також проведено дослідження взаємодії між коефіцієнтами підсилення у системі і значеннями коливальних режимів лінеаризованої системи [26, 27].

Розглянута в роботі модель апарата є моделлю з невагомими опорами, причому довжина кожної опори здатна змінюватися, а сили і моменти, що прикладаються опорою до ОП можуть бути довільними. З кожною ланкою апарата зв'язана сила f_i та момент M_i . Крім того, вважається, що ці сили і моменти попарно-рівні для лівої і правої опори. У такому разі диференційне рівняння, що описує мале коливання, матиме такий вигляд:

$$m \ddot{x} = mg \frac{x_c \theta}{l_0} + \frac{1}{l_0} \sum_{i=1}^4 M_i,$$

$$m \ddot{z} = mg + \sum_{i=1}^4 f_i,$$

$$J_y \ddot{\theta} = c + \frac{l_0}{l_0} \sum_{i=1}^4 M_i + 2a(f_4 - f_2) + mgc \frac{c + (c + l_0)\theta}{l_0},$$

де: l_0 – довжина опори при рівновазі; m – маса апарата; J_y – момент інерції апарата в площині x, z .

Коливальний рух апарата в горизонтальній площині (x, y) описується рівняннями:

$$-m \ddot{y} = -mg \frac{y - c \varphi}{l_0} + \frac{1}{l_0} \sum_{i=1}^4 T_i,$$

$$J_x \ddot{\varphi} = \frac{c + l_0}{l_0} \sum_{i=1}^4 T_i + 2b(f_2 - f_1) - mgc \frac{y - (c + l_0)\varphi}{l_0},$$

$$J_z \ddot{\psi} = mg \frac{a^2 + b^2}{l_0} \psi - \frac{b}{l_0} (M_1 + M_3 - M_2 - M_4) - \frac{a}{l_0} (T_1 + T_2 - T_3 - T_4)$$

а моменти і сили подані рівняннями:

$$M_i = c_{\alpha} \alpha_i + c_{\dot{\alpha}} \dot{\alpha}_i,$$

$$T_i = c_{\beta} \beta_i + c_{\dot{\beta}} \dot{\beta}_i,$$

$$f_i = c_l (l_i - l_0) + c_{\dot{l}} \dot{l}_i - \frac{mg}{4}.$$

Таке подання зворотнього зв'язку еквівалентне до ефекту пружності, що спостерігається під час демпфірування у кожному ступені свободи моделі апарата.

Запропоноване управління може бути застосоване для стабілізації усталеної пози двохопного та чотирьох-опного крокуючих апаратів, якщо всі його опори дотикаються до поверхні. При цьому, контактна поверхня дотику стопи апарата до відповідної ОП повинна бути задана у вигляді взаємодії сил в єдиній точці. Таким чином, питання про дотримання усталеного руху апарата зводиться до визначення власних значень системи, а саме: положення ланок і значення сил взаємодії з поверхнею.

1. 4. Мета і задачі дослідження

Аналіз існуючих методів управління процесом усталеного руху на довільній ОП показав високу актуальність вирішення цієї задачі. Так, у проаналізованих публікаціях зустрічається вирішення задачі управління усталеним рухом АКА на

різних заданих типах поверхні. Однак вирішення задачі управління усталеним рухом на довільній ОП не має завершеного рішення. Зокрема, у ряді робіт показані методи управління усталеним рухом АКА з метою досягнення ними стану рівноваги за принципом вирішення теореми Ляпунова. Також зустрічаються публікації, що вирішують задачу забезпечення усталеного руху АКА на ОП за даними про кутове відхилення його ТЦМ від області стійкості. Проте такі методи хоч і вирішують задачу збереження заданої опорної фази руху апарата, але не вирішують задачу забезпечення його усталеного руху. У багатьох роботах взаємодія АКА з опорною поверхнею задана характеристичними рівняннями взаємодії двох твердих тіл з наявними спільними ступенями рухомості. Кінематична схема АКА зводиться до замкненої форми, а відтак не передбачає можливості зміни фази руху апарата без попередньої зміни кінематичної моделі. У роботах що базуються на такому методі характер взаємодії апарата з ОП є заданим. Для моделей апаратів з розімкненою кінематичною схемою застосовано метод пошуку точки нульового моменту. Цей метод дозволяє оцінити динаміку кутового переміщення апарата відносно ОП і визначити умови дотримання ним стійкого стану на рівних ОП. Головною перешкодою успішному застосуванню існуючих методів управління усталеним рухом АКА є значне математичне запізнювання управління (формування управляючих впливів СУ виконується після порушення умови усталеного руху апарата), що виникає за рахунок зміни типу інформації системи зворотнього зв'язку і точності відповідних сенсорів. Також важливо відмітити те, що в опрацьованих публікаціях задача забезпечення усталеності руху (у тому числі і забезпечення комфортного руху) та збереження опорної фази руху класифікуються різними задачами процесу управління АКА.

Таким чином, аналіз методів, що застосовуються до опису моделі АКА і методів управління усталеним рухом, як узагальненої форми дотримання стійкості, заданої фази та комфортності руху апарата показав необхідність проведення дослідження фундаментальних принципів дотримання усталеного руху апарата на довільній ОП. Тому **метою даної роботи** є підвищення запасу стійкості АКА під час руху на довільній опорній поверхні за даними, що базуються на розподілі сил реакції

опори апарата.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначені наступні завдання:

- на основі аналізу сучасного стану проблеми виконати теоретичні дослідження процесу дотримання усталеного руху АКА на довільній ОП, зокрема задач, що вирішуються при управлінні положенням точки центру мас (ТЦМ) і точки проекції центру мас (ТПЦМ) апарата під час його руху на довільній ОП, визначити методи, що дають змогу підвищити запас стійкості;
- на основі аналізу сучасних підходів до моделювання динаміки АКА визначити залежності положення ТПЦМ апарата від розташування його ланок під час руху АКА на довільній ОП, що дають змогу отримати допустимі кутові відхилення кінематичних пар ланок та проаналізувати напрям прикладання сили тяжіння до ТЦМ апарата;
- на основі аналізу і вдосконалення існуючих підходів до управління рухом АКА розробити критерії стійкості АКА, які враховують прийняті методи управління положенням ТПЦМ апарата і дають змогу виконати пошук оптимальних розв'язків задачі збереження усталеного руху АКА з найбільшим запасом його стійкості в умовах довільної ОП;
- на основі розроблених критеріїв управління усталеним рухом апарата на довільній ОП удосконалити підхід до моделювання кінематичних зв'язків та динамічної поведінки АКА, котрий забезпечить спостережуваність положення його ТЦМ і ТПЦМ;
- розробити нові ефективні стратегії управління положенням ТПЦМ апарата, що ґрунтуються на розроблених критеріях і забезпечують дотримання й відновлення усталеного руху АКА на довільній ОП;
- розробити систему управління усталеним рухом АКА на довільній ОП, що забезпечить зміну кутових положень кінематичних пар апарата у залежності від його положення та стратегії управління;
- провести апробацію виконаних розробок.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТА З ВРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОДІЇ ЙОГО З ОПОРНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

У розділі визначені біологічні складові у будові антропоморфного механізму. Показані параметричні особливості взаємодії АКА з різними типами ОП. На основі їх аналізу побудовані аналітичні моделі АКА, які описують його кінематичну структуру, систему обмежень і динамічну поведінку. Змодельовано поведінку АКА у різних ситуаціях його статичного положення на ОП. На основі біологічних особливостей будови людини, кінематичних можливостях опорно-рухового апарата АКА і на нових критеріях усталеного руху апарата розроблено комп'ютерну динамічну модель АКА для відтворення та аналізу поведінки АКА на довільній ОП.

2. 1. Біологічні основи побудови моделі антропоморфного крокуючого апарата з чутливою стопою

2. 1. 1. Особливості антропоморфних механізмів

Антропоморфний крокуючий апарат є механічною системою, яка розробляється у відповідності до будови та принципів кінематичної та динамічної поведінки людини. У зв'язку з тим, що АКА є технічним фізичним виробом, на нього накладається низка обмежень кінематичного, динамічного та механічного характерів. Окрім цього, у зв'язку з антропоморфністю кінематичної структури АКА необхідно враховувати ще і додаткові кінематичні та динамічні обмеження, зокрема, для опису його взаємодії з ОП. Загалом, для побудови узагальненої моделі АКА потрібно врахувати такі фактори:

- перше, особливістю антропоморфних крокуючих апаратів є їхня змінна структура. Відтак, для виконання запрограмованого динамічного переміщення (зокрема, під час руху) АКА повинен постійно підтримувати свій усталений стан та адаптовуватися до змінної конфігурації власної кінематичної структури і динамічних властивостей. Кінематична структура АКА змінює свій стан в залежності від фази руху апарата. Так, в одноопорній фазі АКА формує розімкнений кінематичний ланцюг, а у випадку двохопорної фази – замкнений

кінематичний ланцюг. Проте навіть в одноопорній фазі кінематична схема АКА зазнає змін. Так, у процесі ходи стопа АКА нахиляється відносно ОП, що супроводжується дотиком стопи АКА до ОП в певній обмеженій групі точок та переміщенням ТЦМ АКА в межах реакції однієї стопи (рис. 2. 1). У випадку двохопорної фази руху, кінематична структура АКА також зазнає змін, які обумовлені положенням корпусу та стоп;

- друге, кінематична модель АКА містить некеровані ступені свободи, які забезпечують збереження комбінацій точок дотику апарата до ОП. Так і некеровані ступені свободи, хоч і впливають на рухомість АКА, але не містяться у векторі стану апарата та не задаються засобами СУ. Проте управління некерованими ступенями свободи може виконуватися неявно, шляхом конфігурації положення інших (керованих) ступенів свободи без зміни опорної фази АКА;
- третє, на рухомість АКА накладені кінематичні обмеження. Ці обмеження задані для кожного з шарнірів апарата і запобігають виникненню сингулярності ланок;
- четверте, АКА пов'язаний з ОП за рахунок сил тертя і реакції та відповідних моментів цих сил.

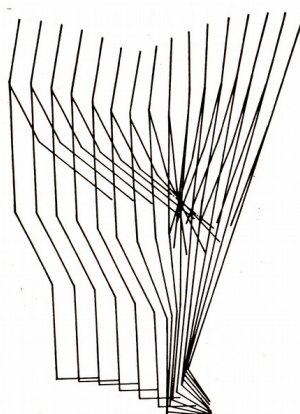


Рисунок 2.1 - Інваріант дотику до ОП АКА в одноопорній фазі

Для врахування впливу означених вище факторів на АКА необхідно формалізувати його взаємодію з навколишнім середовищем, а саме – силою тертя, ковзання та силою реакції опори.

Так, для формалізації взаємодії АКА з ОП за силами реакції модель АКА буде

консервативною. Зокрема, моменти у шарнірах є внутрішніми і не можуть впливати на рух ТЦМ, а зовнішні сили включають: силу тяжіння G , реакцію опори N та силу тертя на опорній поверхні T . Тоді приріст кількості руху V за певним напрямом задається одиничним вектором s так:

$$\Delta_s V = \int (N + G + T) s dt. \quad (2.1)$$

Аналогічне співвідношення для моменту кількості руху Ω подано так:

$$\Delta_s \Omega = \int (r \times N + r \times T + M + M_T) s dt, \quad (2.2)$$

де: r – радіус-вектор від ТЦМ до центра опорної поверхні на стопі; M – моменти між ланками апарата; M_T – момент сил тертя після узгодження ТЦМ із центром стопи. Сила тяжіння не входить до рівняння (2. 2), так як вона впливає на центр мас.

Сили N, G колінеарні, а сила тертя T – перпендикулярна до них. Отже, якщо вектор s горизонтальний, то рух ТЦМ здаватиметься лише силою тертя T , тобто має такий вигляд:

$$\Delta_s V = \int T s dt.$$

Аналогічно визначається приріст кількості руху відносно горизонтальної осі s , який буде визначатися тільки реакцією опори:

$$\Delta_s \Omega = \int (r \times N + M) s dt,$$

а поворот системи (момент кількості руху відносно вертикальної осі) визначається лише за силами тертя, описаними так:

$$\Delta_s \Omega = \int (r \times T + M_T) s dt.$$

Таким чином, сили реакції і сили тертя накладають на систему різні

обмеження. Так, сила реакції визначає стійкість у фронтальній та сагітальній площинах, а сила тертя забезпечує рух і повороти у площині переміщення.

Рівняння 2.1 та 2.2 можуть бути адаптовані для опису двоногої фази руху шляхом перерахунку параметрів r, M, M_c , а також завдяки цим рівнянням спостерігається взаємозв'язок між положенням ТЦМ АКА r (його стійкістю) і моментами та силами, які діють на апарат ззовні.

2.1.2. Динамічна взаємодія крокуючого апарата з опорною поверхнею

Моніторинг розподілу сили реакції ОП дає змогу визначати положення ТПЦМ АКА на ОП. Проте дані про розподіл сили реакції однозначно характеризують лише положення ТЦМ, тоді як положення ТПЦМ залежатиме від динамічної поведінки АКА, зокрема, від його інерційності. Так, в умовах однакової кінематичної структури апарата і при ідентичній позиції його ланок розподіл сили реакції ОП і координати ТПЦМ залежать від його динамічної поведінки. Координати ТПЦМ АКА у статичному положенні на рис. 2.2. (a), а з врахуванням розподілу сили реакції ОП показано на рис. 2.2. (c). Тоді положення ТПЦМ під час руху АКА знаходитиметься в певній зоні, як це показано на рис. 2.2. (b), а відповідний розподіл сили реакції ОП буде виглядати так, як показано на рис. 2.2. (d).

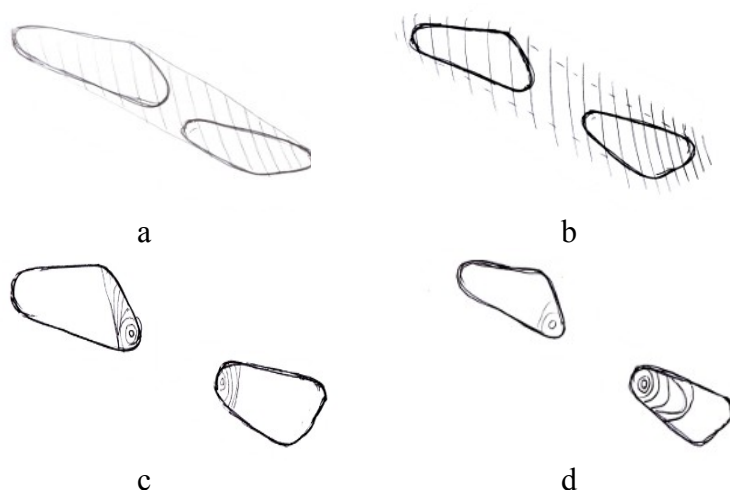


Рисунок 2.2 - Характеристика взаємодії АКА з ОП: а - положення ТЦМ при статичній фазі; б - положення ТЦМ при динамічній фазі; в - розподіл сил реакції ОП при статичній фазі; г - розподіл сил реакції ОП при динамічній фазі.

Для моніторингу положення ТЦМ та ТПЦМ АКА в роботі [46] показано, що якщо всі елементарні сили реакції звести в точці центру стопи АКА, то можна однозначно визначити силу N та момент M взаємодії АКА з ОП з врахуванням динамічних властивостей апарата.

Оскільки розподіл сили N має один знак, то сила реакції ОП може бути урівноважена за рахунок впливу протилежної еквівалентної сили R . У результаті динамічних процесів в АКА, точка прикладання сили R змінює своє положення. Тоді слід на ОП, що формується переміщенням сили R , є точкою нульового моменту (Т0М) і описує область існування ТПЦМ АКА.

Варто відзначити, що при одноопорній фазі руху Т0М (у канонічній динаміці АКА) не може виходити за межі контуру стопи апарата, а при двоопорній – Т0М не може виходити за контур, що зображено на рис. 2. 3. У іншому випадку, якщо Т0М знаходиться за межами контуру стопи, сила реакції ОП буде направлена вниз, що правомірно при більшості положень ланок АКА. Таким чином, під час руху АКА Т0М буде знаходитись в зоні з подвійною штриховою, при двоопорній фазі руху, а в двоопорній фазі – в зоні з простою штриховою (рис. 2. 3), при одноопорній фазі руху. У межах цих границь Т0М може рухатися за різними законами (стрибками або плавно) в залежно від методів реалізації руху апарата.



Рисунок 2.3 - Границі можливого положення Т0М |при двоопорній фазі руху АКА

Проведений моніторинг положення Т0М, ТПЦМ, та сили реакції ОП дає змогу формувати умови дотримання усталеного положення апарата на різних типах ОП.

Однак для застосування цих умов потрібно побудувати відповідні моделі апаратів, які відповідають антропоморфній структурі і поведінці та застосовують дані про ТОМ, ТПЦМ і розподіл сили реакції ОП для знаходження умов дотримання усталеного руху.

2. 2. Загальна модель антропоморфної системи.

Динамічні зв'язки антропоморфного крокуючого апарата з опорною поверхнею

Кінцевою метою побудови моделі антропоморфного крокуючого апарата є синтез певного обчислювального алгоритму, що може бути застосований для обрахунку на ЕОМ. На вхід такого алгоритму подаються впливи керування, а виходом з нього є параметри руху згідно з законом керування апарата.

Модель крокуючого апарата описує стан та поведінку групи апаратів антропоморфного типу, що мінімально відрізняються один від одного за кінематичною схемою. Тоді як адаптація моделі до кожного окремо взятого апарата відбувається за рахунок зміни параметрів моделі.

Для побудови моделі апарата можуть застосовуватись два підходи: аналітичний та комп'ютерний. Основною особливістю використання аналітичного підходу до моделювання АКА є можливість подальшого застосування побудованої моделі в обчислювальному експерименті. Однак, зважаючи на математичні методи, які використовуються для формалізації моделі, аналітичний підхід практично не застосовується для моделювання складних динамічних процесів АКА з великим ступенем свободи. Натомість, застосування комп'ютерного підходу до моделювання АКА нівелює проблеми великої розмірності рівнянь, проте, у зв'язку з неявною формою обчислювальних процесів комп'ютерної моделі, його застосування обмежується зображуванним математичним апаратом, який використано у відповідній системі комп'ютерного моделювання.

Тоді, для опису структури і поведінки АКА, а також для розгляду взаємодії АКА з навколишнім середовищем (зокрема з ОП) необхідно синтезувати: аналітичні моделі кінематики та динаміки, які нададуть можливість точного опису динамічних властивостей апарату та комп'ютерну модель, яка дасть змогу застосовувати та

випробовувати запропоновані критерії, методи та підходи до управління апаратом, зокрема до управління його усталеним рухом на ОП.

2. 2. 1. Аналітичні методи формалізації моделі

Для формалізації аналітичної моделі АКА враховуються такі умови:

- до складу моделі входять n жорстких ланок $i=1..n$;
- ланки АКА об'єднані в кінематичні пари шарнірами;
- шарніри кінематичних пар АКА подані найпростішим способом;
- з кожною ланкою пов'язана система координат x, y, z . Початок системи координат співпадає з ТЦМ ланки;
- кожна ланка i характеризується масою m_i та тензором інерції J_i ;
- відстань між ТЦМ та першим шарніром позначається параметром d_i . Перший шарнір ланки буде той, що розташований ближче до точки фіксації;
- кількість шарнірів співпадає з кількістю ланок. Шарніри позначаються індексом $p=0, 1, \dots$;
- довжина ланки l визначає відстань від першого шарніра до всіх інших шарнірів, які розташовані в одному кінематичному ланцюзі. Кінцевий шарнір не має параметра l . Кількість l у всій системі рівняється m , $j=1, 2, \dots$;
- положення останньої ланки задається положенням його ТЦМ (у відношенні до найближчого шарніра) і кутами Ейлера θ, ψ, φ , що описують орієнтацію рухомої системи координат x, y, z по відношенню до нерухомої системи координат X, Y, Z . Положення ТЦМ АКА залежить від положення всіх ланок, що зв'язують дану ланку з точкою фіксації.

Структура моделі задається заздалегідь та враховує всі можливі варіанти рухомості АКА, кількості його ланок та ступенів свободи. Опис моделі відбувається після її формалізації за допомогою структурних матриць, що задають кількість ланок, їх рухомість, кількість ступенів свободи, прикладених моментів тощо. Таким чином, одна й та ж модель може бути застосована для опису групи подібних моделей апаратів.

Застосовані структурні матриці задаються так:

- матриця ε описує вплив ланок на моменти у шарнірах;
 - $\varepsilon_{ip}=1$, – якщо ланка i задає момент відносно шарніра p ;
 - $\varepsilon_{ip}=0$, – у інших випадках;
- матриця δ описує вплив довжини l_i на момент у шарнірі p , породжений i -тою ланкою.
 - $\delta_{ip}=1$, якщо довжина l_j знаходиться на позитивній частині променя, який прокладено від розглянутого шарніра p до першого шарніра на ланці i ;
 - $\delta_{ip}=0$, у інших випадках;
- матриця γ пов'язує ланки з їхніми довжинами;
 - $\gamma=1$, якщо довжина l_j відповідає ланці i ;
 - $\gamma_{ij}=0$, у інших випадках;

Моменти у шарнірі p задано в системі координат, одна з осей якої співпадає з напрямом базової ланки та описується направляючим косинусом. Кожний шарнір p характеризується індексами першої та другої ланок, які він з'єднує. При цьому, базова ланка має менший індекс. Напрямок косинуса першої осі відносно базової ланки буде залежати від вектора $(l, m, n)_{p,1}$, а напрям косинуса другої осі відносно другої ланки залежатиме від вектора $(l, m, n)_{p,2}$. Вибір осей визначається конструкцією шарніра. Орієнтація третьої осі визначається з умови перпендикулярності до двох інших.

Матричний підхід до моделювання антропоморфного крокуючого апарата аналітичним методом передбачає виконання таких етапів:

1. Перерахунок кутових переміщень ланок;
2. Перерахунок лінійних переміщень ланок;
3. Визначення моментів у шарнірах;
4. Формування рівняння руху.

Кутове переміщення ланок відносно нерухомої системи координат X, Y, Z у координат рухомої системи x, y, z виконується так:

$$\begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} = [\varphi][\psi][\theta] \begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix}, \quad (2.3)$$

$$[\theta] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}, \quad [\psi] = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & 0 & -\sin(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{pmatrix}, \quad [\varphi] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}.$$

Кутова швидкість визначається як перша похідна від переміщення:

$$\begin{matrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{matrix} = [\varphi][\psi] \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + [\psi] \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\psi} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \equiv \begin{matrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{matrix} = [\pi] \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

$$[\pi] = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & 0 & 1 \\ \sin(\psi)\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ \sin(\psi)\cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \end{pmatrix}.$$

Тоді, похідна від кутової швидкості задана так:

$$\begin{matrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{matrix} = \frac{d}{dt} \begin{matrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{matrix} = \frac{d}{dt} ([\pi] \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix}), \quad \text{або} \quad \begin{matrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{matrix} = [\pi] \begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \\ \ddot{\varphi} \end{pmatrix} + [\pi_1] \begin{pmatrix} \dot{\psi}\dot{\varphi} \\ \dot{\varphi}\dot{\theta} \\ \dot{\theta}\dot{\psi} \end{pmatrix}, \quad (2.5)$$

де матриця $[\pi_1]$ задана у вигляді:

$$[\pi_1] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\sin(\psi) \\ -\sin(\varphi) & \sin(\psi)\cos(\varphi) & \cos(\psi)\sin(\varphi) \\ -\cos(\varphi) & -\sin(\psi)\sin(\varphi) & \cos(\psi)\cos(\varphi) \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Зовнішні моменти, що приводять до виникнення кутового руху ланок, задаються у вигляді проекцій на осі x, y, z . З цією метою кутові моменти ланок мають матричне подання:

$$\begin{matrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{matrix} = [J] \begin{matrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{matrix}, \quad (2.7)$$

де $[J]$ - тензор інерції ланки:

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Тоді, кутовий момент визначатиметься з похідної так:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} + [\omega] \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix}, \quad \text{де} \quad [\omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Оскільки осі x, y, z зберігають свої напрями після диференціювання, рівняння кутових моментів визначається так:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} + [\omega] \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad \text{або} \quad \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

де $[J_1], [J_2]$ – матриці:

$$[J_1] = \begin{bmatrix} 0 & -J_{xy} & J_{yz} \\ J_{zx} & 0 & -J_{xz} \\ -J_{yz} & -J_{xy} & 0 \end{bmatrix}, \quad [J_2] = \begin{bmatrix} J_{zz} - J_{yy} & J_{yz} & -J_{zx} \\ -J_{xy} & J_{xx} - J_{zz} & J_{zy} \\ J_{xz} & -J_{yz} & J_{yy} - J_{xx} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Тоді, як лінійне переміщення ланок АКА описується визначенням положення його ТЦМ, що задана довжиною l і відстанню d , довжина ланки l визначається як вектор, направлений від першого шарніра ланки до інших шарнірів цієї ланки. Кожна ланка, за виключенням кінцевих, має один або більше векторів l . Їх індекси не залежать від індексів ланок і позначаються як l_j , ($j=1,2,\dots,m$). Відстань d визначається як вектор \vec{d} , що направлений з першого шарніра до ТЦМ ланки. Кожна ланка має один вектор \vec{d} , який позначається як d_i , ($i=1,2,\dots,n$). Компоненти векторів l і d у проекціях на осі x, y, z не змінюються в часі, але їх значення у проекціях на X, Y, Z нерухомої системи координат залежать від поточних

значень кутів Ейлера, і тому змінюються відносно часу. Перетворення компонентів цих векторів від рухомої системи координат до нерухомої задається наступним рівняннями:

$$\begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} = [\Theta][\Psi][\Phi] \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} = [\Theta][\Psi][\Phi] \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix}. \quad (2.12)$$

Друга похідна вектора l відносно осей нерухомої системи координат X, Y, Z має такий вигляд:

$$\begin{pmatrix} \ddot{l}_x \\ \ddot{l}_y \\ \ddot{l}_z \end{pmatrix} = \frac{d^2}{dt^2} ([\Theta][\Psi][\Phi]) \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix}, \quad (2.13)$$

або такий вигляд:

$$\begin{pmatrix} \ddot{l}_x \\ \ddot{l}_y \\ \ddot{l}_z \end{pmatrix} / \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} = [\Theta_2][\Psi][\Phi]\dot{\Theta} + [\Theta][\Psi_2][\Phi]\dot{\Psi}^2 + [\Theta][\Psi][\Phi]\dot{\Phi} + 2[\Theta][\Psi_1][\Phi_1]\dot{\Psi}\dot{\Phi} + \\ + 2[\Theta_1][\Psi][\Phi_1]\dot{\Psi}\dot{\Theta} + \\ + 2[\Theta_1][\Psi_1][\Phi]\dot{\Theta}\dot{\Psi} + [\Theta_1][\Psi][\Phi]\ddot{\Theta} + [\Theta][\Psi_1][\Phi]\ddot{\Psi} + [\Theta][\Psi][\Phi_1]\ddot{\Phi}. \quad (2.14)$$

Матриці $[\Theta_1][\Theta_2], [\Psi_1][\Psi_2], [\Phi_1][\Phi_2]$ формують відповідні похідні від матриць $[\Theta], [\Psi], [\Phi]$:

$$[\Theta_1] = \frac{d}{d\Theta} [\Theta] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{pmatrix}, \quad [\Theta_2] = \frac{d^2}{d\Theta^2} [\Theta] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & -\cos(\theta) \end{pmatrix}, \quad (2.15)$$

$$[\Theta_1] = \frac{d}{d\Theta} [\Theta] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{pmatrix}, \quad [\Theta_2] = \frac{d^2}{d\Theta^2} [\Theta] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & -\cos(\theta) \end{pmatrix}, \quad (2.16)$$

$$[\Phi_1] = \frac{d}{d\Phi} [\Phi] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \\ 0 & -\cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \end{bmatrix}, \quad [\Phi_2] = \frac{d^2}{d\Phi^2} [\Phi] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & -\cos(\varphi) \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

Вираз 2. 14 можна подати в більш компактнішій формі:

$$\begin{bmatrix} \ddot{l}_x \\ \ddot{l}_y \\ \ddot{l}_z \end{bmatrix} = [A][\Lambda] \ddot{\psi} + [B][\Lambda] \dot{\psi}^2 + [C][\Lambda] \begin{bmatrix} \dot{\psi} \dot{\varphi} \\ \dot{\varphi} \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \dot{\varphi} \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

де:

$$[A] = \begin{bmatrix} [\Theta_1] & [\Psi] & [\Phi] \\ [\Theta] & [\Psi] & [\Phi] \\ [\Theta] & [\Psi] & [\Phi] \end{bmatrix}, \quad [B] = \begin{bmatrix} [\Theta_2] & [\Psi] & [\Phi] \\ [\Theta] & [\Psi_2] & [\Phi] \\ [\Theta] & [\Psi] & [\Phi_2] \end{bmatrix}, \quad [C] = 2 * \begin{bmatrix} [\Theta] & [\Psi_1] & [\Phi_1] \\ [\Theta_1] & [\Psi] & [\Phi_1] \\ [\Theta_1] & [\Psi_1] & [\Phi] \end{bmatrix}, \quad (2.19)$$

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} l_x & 0 & 0 \\ l_y & 0 & 0 \\ l_z & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Перші три матриці є функціями кутів Ейлера θ, ψ, φ і відповідають ланці, що має довжину l_j .

Друга похідна вектора d відносно осей нерухомої системи координат X, Y, Z вказує прискорення ланки і виражається так:

$$\begin{bmatrix} \ddot{d}_x \\ \ddot{d}_y \\ \ddot{d}_z \end{bmatrix} = \frac{d^2}{dt^2} ([\Theta][\Psi][\Phi]) \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Центр мас ланки i має координати $(X, Y, Z)_{ip}$ по відношенню до координат шарніра p та заданий як сума всіх довжин l (від першого до розглянутого шарніра) з відстанню d . Застосовуючи структурні матриці $[\varepsilon], [\delta]$, відстань між вказаними ланками та їх ТЦМ можна записати в такому вигляді:

$$\begin{matrix} X \\ Y \\ Z_{ip} \end{matrix} = \begin{matrix} d_X \\ \varepsilon_{ip} d_Y \\ d_{Zi} \end{matrix} + \sum_{j=1}^m \begin{matrix} l_X \\ \delta_{ijp} l_Y \\ l_{Zj} \end{matrix}. \quad (2.22)$$

Тоді елементи структурних матриць визначаються так: $\varepsilon_{ip}=1$, якщо ланка i має момент відносно шарніра p , $\varepsilon_{ip}=0$ – в інших випадках; $\delta_{ijp}=1$, якщо l_j знаходиться на позитивній частині променя p та направлена до першого шарніра на ланці, $\delta_{ijp}=0$ – у іншому випадку.

Варто зауважити, що головна точка опори зафіксована у просторі і вважається нульовим шарніром ($p=0$). Таким чином, відстань між головними точками опори (згідно з рівнянням 2. 22) може бути розрахована так:

$$\begin{matrix} X \\ Y \\ Z_{i0} \end{matrix} = \begin{matrix} d_X \\ d_Y \\ d_{Zi} \end{matrix} + \sum_{j=1}^m \begin{matrix} l_X \\ \delta_{ij0} l_Y \\ l_{Zj} \end{matrix}, \varepsilon=1. \quad (2.23)$$

Тоді прискорення ТЦМ i -тої ланки може бути отримано за рахунок диференціювання рівняння 2. 23 у такому вигляді:

$$\begin{matrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z}_i \end{matrix} = \begin{matrix} \ddot{d}_X \\ \ddot{d}_Y \\ \ddot{d}_{Zi} \end{matrix} + \sum_{j=1}^m \begin{matrix} \ddot{l}_X \\ \delta_{ij0} \ddot{l}_Y \\ \ddot{l}_{Zj} \end{matrix}. \quad (2.24)$$

Гравітаційний момент ланки відносно шарніра задано так:

$$Mg = -m_i \begin{bmatrix} 0 \\ X \\ 0 \end{bmatrix}_{ip} \begin{bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Таким чином, загальний момент відносно шарніра p з врахуванням антигравітаційного моменту може бути поданий в такому вигляді:

$$\begin{matrix} M_X \\ M_Y \\ M_{Zp} \end{matrix} = \sum_{i=1}^n \begin{matrix} M_X \\ M_Y \\ M_{Zip} \end{matrix} + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ip} \begin{matrix} M_X \\ M_Y \\ M_{Zi} \end{matrix} + \sum_{i=1}^n m_i \begin{matrix} X_{ip} \\ 0 \\ g \end{matrix}. \quad (2.25)$$

Для обчислення моментів у ланці i рівняння 2.14 та 2.17 підставляються у рівняння 2.25, після чого останнє набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned} \begin{matrix} M_X \\ M_Y \\ M_{Zp} \end{matrix} &= \sum_{i=1}^n m_i [X]_{ip} \sum_{k=1}^n \gamma_{kj} [A]_k [\Lambda]_j \ddot{\Psi} + \ddot{\Phi}_x \\ &+ \sum_{i=1}^n m_i [X]_{ip} [A]_i [\Lambda]_i \ddot{\Psi} + \ddot{\Phi}_i \\ &+ \sum_{i=1}^n m_i [X]_{ip} \sum_{j=1}^m \delta_{ij0} \sum_{k=1}^n \gamma_{kj} [B]_k [\Lambda]_j \dot{\Psi}^2 + \dot{\Phi}^2 \\ &+ \sum_{i=1}^n m_i [X]_{ip} [B]_i [\Lambda]_i \dot{\Psi}^2 + \dot{\Phi}_i^2 \\ &+ \sum_{i=1}^n m_i [X]_{ip} \sum_{j=1}^m \delta_{ij0} \sum_{k=1}^n \gamma_{kj} [C]_k [\Lambda]_j \dot{\Psi} \dot{\Phi} + \dot{\Theta} \dot{\Psi}_k \\ &+ \sum_{i=1}^n m_i [X]_{ip} [C]_i [\Lambda]_i \dot{\Psi} \dot{\Phi} + \dot{\Theta} \dot{\Psi}_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ip} [D]_i \ddot{\psi} + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ip} [E]_i \dot{\psi}^2 + \\
& \quad \ddot{\varphi}_i \quad \dot{\varphi}_i^2 \\
& + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ip} [F]_i \dot{\psi} \dot{\varphi} + \sum_{i=1}^n m_i [X]_{ip} \frac{0}{g} \cdot \\
& \quad \dot{\theta} \dot{\psi}_i \quad \dot{\theta} \dot{\psi}_i
\end{aligned}$$

Члени даного рівняння з потрійними сумами можна спростити зміною порядку їх додавання та застосуванням скороченої форми запису:

$$[S]_{ip} = \sum_{i=1}^n \delta_{ij0} m_i [X]_{ip}. \quad (2.26)$$

В інших виразах індекси суми i замінений на еквівалентні k . Тоді, остаточна форма для опису загального моменту в шарнірі p записується так:

$$\begin{aligned}
& \frac{M_X}{M_Y} = \sum_{k=1}^n (m_k [X]_{kp} [A]_k [\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj} [S]_{jp} [A]_k [\Lambda]_j + \varepsilon_{kp} [D]_k) \ddot{\psi} + \\
& \quad \ddot{\varphi}_k \\
& \quad + \sum_{k=1}^n (m_k [X]_{kp} [B]_k [\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj} [S]_{jp} [B]_k [\Lambda]_j + \varepsilon_{kp} [E]_k) \dot{\psi}^2 + \\
& \quad \dot{\varphi}_k^2 \\
& \quad + \sum_{k=1}^n (m_k [X]_{kp} [C]_k [\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj} [S]_{jp} [C]_k [\Lambda]_j + \varepsilon_{kp} [F]_k) \dot{\psi} \dot{\varphi} + \sum_{i=1}^n m_i [X]_{ip} \frac{0}{g} \cdot \\
& \quad \dot{\theta} \dot{\psi}_k \quad \dot{\theta} \dot{\psi}_k
\end{aligned} \quad (2.27)$$

Моменти для всіх шарнірів фіксовані у просторі та зв'язані з сусідніми ланками. Тому, для скороченої форми запису, виконаємо такі присвоєння:

$$[\alpha]_p^{-1}(m_k[X]_{kp}[A]_k[\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj}[S]_{jp}[A]_k[\Delta]_j + \varepsilon_{kp}[D]_k) = [AA]_{pk},$$

$$[\alpha]_p^{-1}(m_k[X]_{kp}[B]_k[\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj}[S]_{jp}[B]_k[\Delta]_j + \varepsilon_{jp}[E]_k) = [BB]_{pk},$$

$$[\alpha]_p^{-1}(m_k[X]_{kp}[C]_k[\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj}[S]_{jp}[C]_k[\Delta]_j + \varepsilon_{kp}[F]_k) = [CC]_{pk},$$

$$\sum_{i=1}^n m_i [X]_{ip} \begin{matrix} 0 \\ g \end{matrix} = [G]_p, \quad \begin{matrix} M_1 \\ M_2 \\ M_{3p} \end{matrix} = M_p.$$

Тоді рівняння моментів для всіх шарнірів p будуть подані в скороченій формі:

$$[M]_p = \sum_{k=1}^n [AA]_{pk} \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\varphi}_k} + \sum_{k=1}^n [BB]_{pk} \frac{\dot{\theta}^2}{\dot{\varphi}_k^2} + \sum_{k=1}^n [CC]_{pk} \frac{\dot{\psi}\dot{\varphi}}{\dot{\theta}\dot{\psi}_k} + [G]_p, \quad (2.28)$$

а для формування закону руху виконаємо такі присвоєння:

$$[AA]_{pk} = [A], \quad [BB]_{pk} = [B], \quad [CC]_{pk} = [C],$$

$$\frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\varphi}_k} = [\ddot{\Theta}], \quad \frac{\dot{\theta}^2}{\dot{\varphi}_k^2} = [\dot{\Theta}^2], \quad \frac{\dot{\psi}\dot{\varphi}}{\dot{\theta}\dot{\psi}_k} = [\dot{\Theta}\dot{\Theta}], \quad (2.29)$$

$$[M]_p = M, \quad [G]_p = [G].$$

Такий запис дає змогу сформулювати закон руху багатоланкового АКА, що матиме наступний вигляд:

$$[M] = [A][\ddot{\Theta}] + [B][\dot{\Theta}^2] + [C][\dot{\Theta}\dot{\Theta}] + [G]. \quad (2.30)$$

У результаті виконання формалізації закону руху АКА (рівняння 2.3 - 2.30)

стає можливим моделювання АКА з довільною кількістю ланок, дві з яких дотикаються до ОП. При цьому враховується: кутове переміщення, лінійне переміщення, моменти в шарнірах та закон руху.

Однак, через низьку наочність та математичну складність, його практичне застосування обмежується розв'язанням задач, пов'язаних з інтеграцією моделі до об'єкта управління (за принципом *HIL* чи *PIL*).

Таким чином, запропонована аналітична модель динаміки АКА, що побудована на основі кінематичної схеми і базується на застосуванні методів кутів Ейлера, рівнянні Лагранжа та основних засадах аналітичної динаміки, може застосовуватися для опису динамічної поведінки АКА, зокрема для дослідження параметрів динаміки апарата у граничних положеннях його кінематичних властивостей, проте модель не може застосовуватися для дослідження взаємодії АКА з анапріорною ОП. Для врахування взаємодії моделі АКА з ОП необхідно формалізувати ОП та включити її до складу моделі АКА. Принагідно зазначимо, що така інтеграція передбачає апріорність ОП, а це не відповідає умовам експлуатації моделі. Тому для врахування взаємодії ОП з АКА потрібно застосувати методи моніторингу та аналізу ОП, які дають змогу отримувати інформацію попередньо або одночасно з взаємодією АКА з ОП.

Для забезпечення можливості відтворення взаємодії АКА з ОП потрібно застосовувати методи з гнучкими властивостями моделювання (*Multibody Dynamics*), що характерно для комп'ютерних методів моделювання.

2. 2. 2. Комп'ютерні методи формалізації моделі

Комп'ютерні методи моделювання об'єктів та систем (*Multibody Dynamics*) відрізняються від аналітичних гнучкістю побудови складних систем і простотою застосування в комплексних моделях, які складаються з: кінематичної моделі, динамічної моделі, системи управління та системи зворотного зв'язку. Математичні методи, що застосовуються у комп'ютерній моделі, можуть не відрізнятися від їх аналітичних аналогів.

Для дослідження АКА методом комп'ютерного моделювання, побудуємо

демонстраційну моделі, що складається з п'яти пов'язаних між собою шарнірами ланок, заданих у двовимірному просторі x, y . Модель складається з корпусу та двох дволанкових опор. Загальний структурний вигляд моделі показано на рис. 2. 4 (а).

Формалізація процесу переміщення апарата у площині x, y , може бути представлена з 7 ступенями свободи, вектор стану якої має такий вигляд:

$$q = [x_0, y_0, \alpha, \beta_L, \beta_R, \gamma_L, \gamma_R]^T$$

Координати x_0, y_0 визначають положення ТЦМ корпусу АКА, а інші параметри вектора q задають кути в шарнірах апарата. Також до властивостей моделі додано параметри довжин ланок (l_0, l_1, l_2) , маси кожної з ланок (m_0, m_1, m_2) (що відповідають довжинам, згідно з індексами) та положення точок-центрів мас ланок (r_0, r_1, r_2) , які задані за відстанню до найближчого шарніра.

Динамічні властивості моделі описані за допомогою кутових моментів у шарнірах. Загальна рухомість АКА задана вектором:

$$M = [M_{L1}, M_{R1}, M_{L2}, M_{R2}]^T,$$

де моменти M_{L1}, M_{R1} задають рухомість корпусу АКА відносно його ніг, а моменти M_{L2}, M_{R2} задають рухомість бедер АКА відносно його гомілок (рис. 2. 4 (b)).

Для опису взаємодії моделі АКА з навколишнім середовищем, зокрема з ОП, до складу моделі введений вектор сил:

$$F = [F_{Lx}, F_{Ly}, F_{Rx}, F_{Ry}]^T.$$

За допомогою рівнянь Лагранжа рівняння динаміки комп'ютерної моделі АКА буде мати такий вигляд:

$$A(q)\ddot{q} = b(q, \dot{q}, M, F),$$

де: $A(q) \in R^{7 \times 7}$ - матриця інерції;

$b(q, \dot{q}, M, F) \in R^{7 \times 1}$ - вектор, що містить систему координат “правої трійки” із семи груп диференціальних рівнянь.

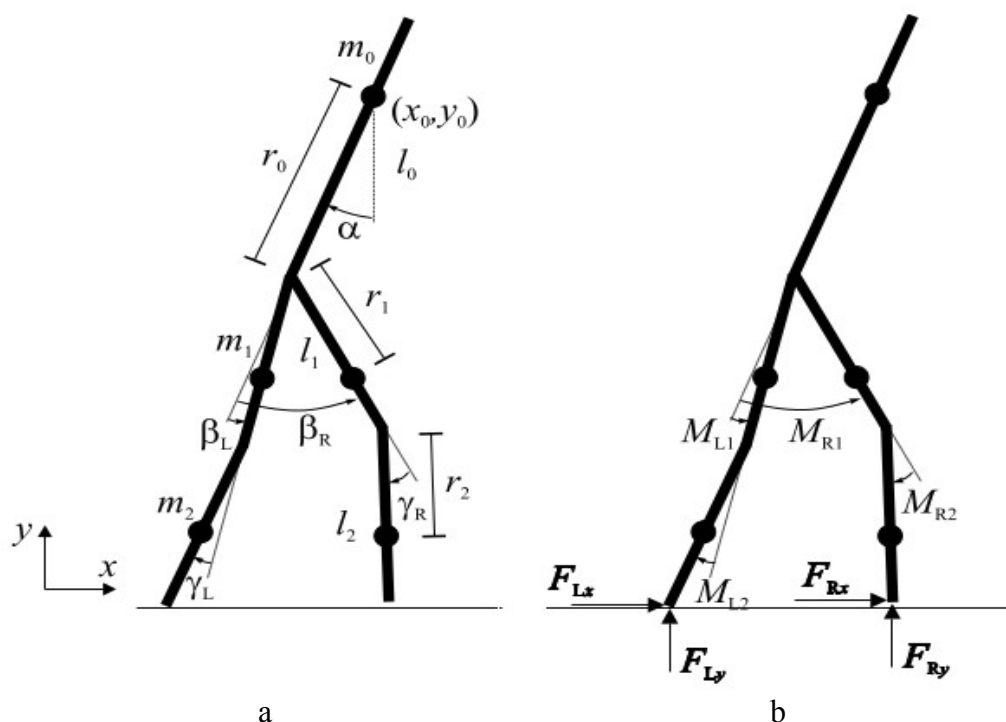


Рисунок 2.4 - Загальний схематичний вигляд п'яти-ланкової плоскої моделі АКА:
a - схема розташування ланок та міжланкових кутів; *b* - схема розташування та значення кутових моментів; x, y - базова система координат; m_0, m_1, m_2 - маси ланок АКА; r_0, r_1, r_2 - відстані від шарнірів до ТЦМ ланок; l_0, l_1, l_2 - довжини ланок апарата; x_0, y_0 - положення ТЦМ АКА; α, β, γ - кути кінематичних пар ланок апарата; $F_{Lx}, F_{Ly}, F_{Rx}, F_{Ry}$ - сили ковзання і реакції ОП для лівої і правої ноги АКА

Окремою складовою комп'ютерної моделі є модель ОП. Опорна поверхня для руху АКА моделюється як набір координат x, y , які задають точки ОП і формують лінії траєкторії на ній. Для реалістичної формалізації сили реакції ОП модель АКА містить *PD*-регулятор, що відіграє роль демпфера під час проникнення ланки стопи АКА в ОП. Моніторинг сили реакції ОП може бути зчитаний та проаналізований за величиною вихідної функції *PD*-регулятора в такій формі:

$$F_n = -k_y y'_G - b_y \dot{y}'_G,$$

де: y'_G - поточне “проникнення” ланки стопи АКА в ОП відносно осі y ;
 k_y - константа пружності ОП у точці дотику ланки стопи; b_y - константа демпфування.

Значення F_n набуває актуальності лише під час дотику стопи до ОП. У іншому разі величина сили буде або негативною, або нульовою.

Тангенціальна складова сили взаємодії з ОП F_t викликана тертям. Для її моделювання також застосовано PD -контролер. Для опису F_t відносно початкової точки x'_0 застосовано такий вираз:

$$F_t = -k_x(x'_G - x'_0) - b_x \dot{x}'_G,$$

де: k_x, b_x - константи тангенціальної взаємодії з ОП за параметрами пружності та демпфування, відповідно. У випадку, якщо фактична сила перевищує максимальну силу тертя, то таке ковзання описується рівнянням:

$$F_{t,max} = \mu_s F_n,$$

де μ_s - коефіцієнт шорсткуватості ОП.

Зазначені підходи до аналітичного та комп'ютерного моделювання АКА описують статичне положення і динамічну поведінку апарата. Застосовані аналітичні методи дають змогу аналізувати результати взаємодії внутрішніх сил і моментів АКА та зовнішніх сил і моментів, які діють на апарат. Комп'ютерні методи моделювання дають змогу застосовувати алгоритм управління апаратом у режимі реального часу, в тому числі з врахуванням взаємодії з ОП.

Водночас, у зв'язку з універсальністю формалізованої моделі, її застосування для управління усталеним рухом апарата є неможливим. Це пояснюється відсутністю формалізованого зв'язку між рельєфністю ОП та моделлю ОП.

Для управління усталеним рухом АКА з врахуванням рельєфності ОП аналітичну та комп'ютерну моделі АКА необхідно реорганізувати. Для цього базова система координат комп'ютерної моделі апарата повинна співпадати з ТЦМ корпусу, а координати точки дотику стоп АКА до ОП визначатися відповідно до рельєфності ОП, що дасть змогу описувати ОП як окрему комп'ютерна модель з змінними характеристиками екстремумів рельєфу.

2. 3. Модель антропоморфного крокуючого апарата з врахуванням розподілу сили реакції опорної поверхні

2. 3. 1. Кінематична модель шести-ланкового антропоморфного крокуючого апарата

Існуючі кінематичні схеми крокуючих апаратів концептуально розробляються за подібними підходами та ідентичними методами. Однак, для побудови кінематичної схеми антропоморфного крокуючого апарата до складу схеми введені обмеження на його рухомість. Ці обмеження описують розташування шарнірів і накладені на них кутові обмеження і є властивими лише для антропоморфних структур. Положення шарнірів та обмеження кутів не завжди є оптимальним з точки зору динамічних чи енергетичних властивостей, проте, їхня наявність виправдовується еволюцією.

До складу антропоморфної моделі крокуючого апарата входять дві три-ланкові опори, які пов'язані з корпусом в кінематичний ланцюг. Кінематичні ланки пов'язуються в пари за допомогою кутових шарнірів з одним, двома та трьома ступенями свободи.

У зв'язку з малими кутовими моментами, що виникають у кінематичних парах ланок апарата, ланки вважаються твердотілими та жорсткими. Шарніри, які зв'язують ланки в кінематичні ланцюги, вважаються найпростішими та таким, що не враховують сили тертя. Модель апарата налічує шість шарнірів, з яких два – три-ступеневі, сферичні, що відповідають тазостегновим суглобам людини; два – одновісні, циліндричні, що відповідають колінним суглобам людини; два – двохосьові, циліндричні, що відповідають гомілковостопним суглобам людини.

Відтак, кінематична схема АКА налічує 12 ступенів рухомості та 6 ступенів свободи, за рахунок власного переміщення та обертання відносно базової системи координат.

Згідно зі структурою кінематичної схеми (рис. 2. 5), переміщення ланки корпусу АКА відбувається внаслідок кутового руху тазостегнових шарнірів, що може супроводжуватися зміною кутів в інших шарнірах ланцюга ланок апарата.

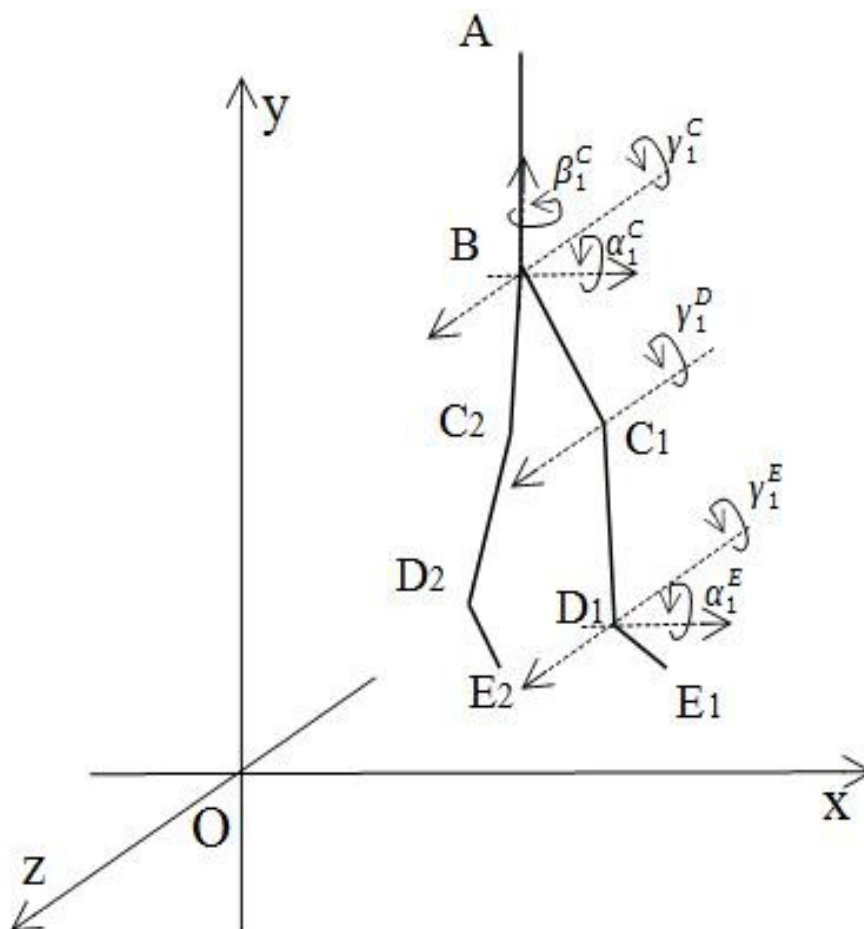


Рисунок 2.5 - Структурна схема кінематичних зв'язків АКА:

x, y, z - базова система координат схеми; O - точка початку координат;
 $AB, BC_1, BC_2, C_1D_1, C_2D_2, D_1E_1, D_2E_2$ - ланки АКА; $\alpha_1^C, \alpha_1^E, \beta_1^C, \gamma_1^C, \gamma_1^D, \gamma_1^E$ - кути кінематичних пар апарата

Загалом, кінематична схема АКА повинна задовольняти таким додатковим вимогам:

1. В залежності від опорної фази, в якій знаходиться АКА, його кінематична схема повинна відрізнятися за поданням (зокрема, за взаємодією з поверхнею);
2. В залежності від опорної фази, модель формує розімкнений або замкнений ланцюг;
3. У разі, якщо АКА перебуває в одноопорній фазі, його структура відповідає двом розімкненим ланцюгам, перший з яких є корпус, а другий – це вільна опора, що не взаємодіє з поверхнею.

Відповідно до кінематичної структури АКА та враховуючи вимоги до її характеристик, які описані вище, побудуємо кінематичну модель АКА, яка придатна для дослідження його усталеного руху, зокрема – вирішення задачі з дотримання стійкого положення апарата на ОП.

Модель апарата складається із семи ланок:

$$AB, BC_1, BC_2, C_1D_1, C_2D_2, D_1E_1, D_2E_2,$$

які мають відповідні довжини:

$$L_{AB}, L_{BC_1}, L_{BC_2}, L_{C_1D_1}, L_{C_2D_2}, L_{D_1E_1}, L_{D_2E_2}$$

і визначають ланки корпуса, стегон, гомілок і стоп АКА, відповідно. Пари ланок, об'єднані шарнірами. Ланки BC_1, BC_2 (рис. 2.5) мають по три ступені свободи відносно ланок AB , заданих кутами $\alpha_1^C, \beta_1^C, \gamma_1^C, \alpha_2^C, \beta_2^C, \gamma_2^C$. Ланки C_1D_1, C_2D_2 мають по одній ступені свободи і задані відносно ланок $BC_i, i=1,2$ кутами γ_i^D . Ланки D_iE_i і мають по дві ступені свободи відносно ланок C_iD_i , задані кутами α_i^E, γ_i^E . Ланка AB зберігає свою просторову орієнтацію в системі координат $OXYZ$.

Початкове положення ланок $AB, BC_1, BC_2, C_1D_1, C_2D_2, D_1E_1, D_2E_2$ АКА в системі координат $OXYZ$ задається положенням відповідних точок A, B_i, C_i, D_i, E_i (Рис. 2. 5.), які належать цим ланкам. Кожна з вказаних точок задається координатами, які обрані згідно з кінематичними особливостями АКА, який досліджується, і відповідають вимогам антропоморфності та формалізації у тримірному просторі в такому форматі:

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 2 & 2 \\ A=10; B=7; C_1= & 4 & ; C_2= & 4 \\ 1 & 1 & -1.5 & 1.5 \end{matrix} \quad (2.31)$$

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 2 & 2 \\ D_1= & 1 & ; D_2= & 1 \\ -2 & 2 & -2 & 2 \end{matrix} \quad E_1= & 1 & ; E_2= & 1.$$

Моделювання переміщення АКА включає на дві складові:

- кутове переміщення. Коли точка рухається радіально;

- лінійне переміщення. Коли точка ланки рухається на задані величини відносно осей системи координат.

Згідно з рис. 2. 5, кутове переміщення ланки стегна АКА BC_1 відносно ланки корпуса AB тотожне переміщенню точки C_1 відносно системи координат з центром у точці B і осями, що співпадають за напрямом з OX, OY, OZ . Розглянута кінематична пара має три кутові ступені свободи, що описані кутами $\alpha_1^C, \beta_1^C, \gamma_1^C$. Переміщення відносно кожного з цих кутів описується так:

$$C_i^{jkz_f^d} = C_i M_{rot}^k(z)_i^d \quad (2.32)$$

де: i – визначник лівого або правого шарніра; j – визначник операції (повороту); k – площина обертання; z – кут повороту; d – ідентифікатор шарніра (1 – тазостегновий; 2 – колінний; 3 – гомілковий шарніри); f – ідентифікатор кута в симетричній парі кутів; M – матриця повороту.

Для опису поворотів лівої ланки стегна АКА використовуємо такі рівняння:

$$\begin{aligned} C_1^{Rx\alpha_1^C} &= C_1 M_{rot}^X(\alpha)_1^C, \\ C_1^{Ry\beta_1^C} &= C_1 M_{rot}^Y(\beta_1^C), \\ C_1^{Rz\gamma_1^C} &= C_1 M_{rot}^Z(\gamma_1^C), \end{aligned} \quad (2.33)$$

в яких параметри C_1 і M характеризуються такими значеннями:

$$C_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ -1.5 \end{pmatrix}; \quad M_{rot}^X(\alpha_1^C) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_1^C) & -\sin(\alpha_1^C) \\ 0 & \sin(\alpha_1^C) & \cos(\alpha_1^C) \end{pmatrix};$$

$$M_{rot}^Y(\beta_1^C) = \begin{pmatrix} \cos(\beta_1^C) & 0 & \sin(\beta_1^C) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta_1^C) & 0 & \cos(\beta_1^C) \end{pmatrix}; \quad M_{rot}^Z(\gamma_1^C) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma_1^C) & -\sin(\gamma_1^C) & 0 \\ \sin(\gamma_1^C) & \cos(\gamma_1^C) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Тоді, поворот ланки стегна у проекціях трьох площин матиме такий вигляд:

$$C_1^{rot} = [(C_1^{Rx\alpha_1^C} M_{rot}^X(\alpha_1^C)) M_{rot}^Y(\beta_1^C) M_{rot}^Z(\gamma_1^C)]. \quad (2.34)$$

Подібно до опису повороту в шарнірі C_1 (рівняння 2.34), поетапний поворот у шарнірі C_2 описується рівнянням 2.33, тоді, як повний поворот у трьох площинах описується так:

$$C_2^{rot} = [M_{rot}^Y(\beta_2^C) M_{rot}^Z(\gamma_2^C) M_{rot}^X(\alpha_2^C) C_2^{Rx\alpha_2^C}]. \quad (2.35)$$

Повний опис кутового переміщення стегнових ланок має такий вигляд:

$$C_i^{rot} = [M_{rot}^Y(\beta_i^C) * M_{rot}^Z(\gamma_i^C) * (M_{rot}^X(\alpha_i^C) * C_i^{Rx\alpha_i^C})], i=[1,2]. \quad (2.36)$$

Кутове переміщення гомілкових ланок АКА $C_i D_i, i=[1,2]$ задається подібно до кутового переміщення ланок BC_i , проте, на відміну від попереднього випадку, дане переміщення характеризується одним ступенем свободи, який заданий у площині Z . Таким чином, опис кутового переміщення ланок $C_i D_i$ формалізується так:

$$D_i^{Rz\gamma_1^D} = M_{rot}^Z(\gamma_1^D) D_{i1}, \quad (2.37)$$

де:

$$D_{i1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}; \quad M_{rot}^Z(\gamma_1^D) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma_1^D) & -\sin(\gamma_1^D) & 0 \\ \sin(\gamma_1^D) & \cos(\gamma_1^D) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.37)$$

де: γ_1^D - кут повороту точки D_1 відносно осі z з центром в точці C_1 . Ідентично

до кутового повороту точки D_1 , переміщення точки D_2 у площині z задається рівнянням:

$$D_2^{Rz\gamma_2^D} = M_{rot}^Z(\gamma_2^D) D_2. \quad (2.38)$$

Опис повного кутового переміщення гомілкових ланок має такий вигляд:

$$D_i^{Rz\gamma_i^D} = M_{rot}^Z \gamma_{rot}^Z(\gamma_i^D). \quad (2.39)$$

Кутове переміщення ланок стопи АКА $D_i E_i$ подібне до кутового переміщення ланок $BC_i, C_i D_i$. Однак розглянуті кінематичні пари ланок мають два ступені свободи, що визначені відносно площин x і z та задані кутами $\alpha_i^E, \gamma_i^E, i=[1,2]$, відповідно (рис. 2. 5.).

Кутове переміщення точки E_1 відносно D_1 в однонаправленій з $OXYZ$ системі координат складається з кутового переміщення у площині x , яке описано рівнянням 2. 40 та кутового переміщення у площині z , яке описане рівнянням 2. 41.

$$E_1^{rx\alpha_1^E} = M_{rot}^X(\alpha_1^E) E_1. \quad (2.40)$$

$$E_1^{rz\gamma_1^E} = M_{rot}^Z(\gamma_1^E) E_1. \quad (2.41)$$

Повний опис кутового переміщення стоп АКА $D_i E_i$ відносно осей x та z має такий вигляд:

$$E_i^{rot} = [M_{rot}^Z(\gamma_i^E) M_{rot}^Y(\beta_i^E) (M_{rot}^X(\alpha_i^E) E_i)], i=[1,2]. \quad (2.42)$$

Відтак, згідно з рівняннями 2. 36, 2. 39 та 2. 42 АКА буде мати дванадцять ступенів свободи в шарнірах. Окрім того, він матиме ще шість ступенів свободи, що визначені рівнянням 2. 36.

Лінійне переміщення ланок АКА базується на результатах кутового переміщення, в результаті чого нове положення апарата визначається координатами точок його ланок $A, B, C_i^{rot}, D_i^{rot}, E_i^{rot}$, відстань між якими різниться від початково заданих. Невідповідність положення точок АКА їхнім початковим положенням потребує коригування. Для цього здійснюється корекція координатних характеристик точок лінійного переміщення ланок на величини похибок позиціювання $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, що задаються у матричному вигляді так:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta X \\ 0 & 1 & 0 & \Delta Y \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

Для виконання операцій над векторами координат точок шарнірів АКА опис цих векторів був доповнений вільним членом

$$A = \begin{pmatrix} 10 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 7 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad E_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.43)$$

Тоді, переміщення точок D_i , яке залежить від кутового переміщення точок C_i , коригується формулою:

$$D_i^{mov} = D_i * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta C_i x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta C_i y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta C_i z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \text{де} \quad \begin{aligned} \Delta C_i x &= [D_i \mp D_i^{rot}][1, 0, 0] \\ \Delta C_i y &= [D_i \mp D_i^{rot}][0, 1, 0] \\ \Delta C_i z &= [D_i \mp D_i^{rot}][0, 0, 1] \end{aligned} \quad (2.44)$$

де D_i – відповідний вектор координат точки.

Переміщення точки E_i виконується подібно до переміщення точки D_i та записується так:

$$E_i^{mov} = E_i * \begin{matrix} & & & \textcolor{red}{i} \\ 1 & 0 & 0 & \Delta E_i x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta E_i y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta E_i z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad de \quad \begin{matrix} \Delta E_i x = [E_i \mp E_i^{rot}][1,0,0] \\ \Delta E_i y = [E_i \mp E_i^{rot}][0,1,0], \\ \Delta E_i z = [E_i \mp E_i^{rot}][0,0,1] \end{matrix} \quad (2.45)$$

де C_i – доповнений вектор координат точки.

Загальне переміщення АКА формалізується за кутовим та лінійним переміщеннями кожної його ланки та кутовим і лінійним переміщеннями зв'язаних ланок, які додаються до моделі для забезпечення цілісності її структури.

Кутове переміщення ланки корпусу AB подано подібно до кутового переміщення точок C_i :

$$\begin{aligned} A^{Rx\alpha^A} &= A M_{rot}^X(\alpha^A), \\ M_{rot}^X(\alpha^A) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha^A) & -\sin(\alpha^A) \\ 0 & \sin(\alpha^A) & \cos(\alpha^A) \end{pmatrix}; \\ A^{Ry\beta^A} &= A M_{rot}^Y(\beta^A), \\ M_{rot}^Y(\beta^A) &= \begin{pmatrix} \cos(\beta^A) & 0 & \sin(\beta^A) \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\sin(\beta^A) & \cos(\beta^A) \end{pmatrix}; \\ A^{Rz\gamma^A} &= A M_{rot}^Z(\gamma^A), \\ M_{rot}^Z(\gamma^A) &= \begin{pmatrix} \cos(\gamma^A) & -\sin(\gamma^A) & 0 \\ \sin(\gamma^A) & \cos(\gamma^A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Тоді поворот ланки AB відносно трьох осей має такий вигляд:

$$A^{rot} = [((A^{Rx\alpha^A} M_{rot}^X(\alpha_{rot}^X)) M_{rot}^Y(\beta_{rot}^Y)) M_{rot}^Z(\gamma_{rot}^Z)]. \quad (2.47)$$

Окрім кутового переміщення, ланка AB має можливість переміщуватися і вздовж осей базової системи координат. Для опису такого переміщення апарата достатньо формалізувати лінійне переміщення точки A , що належить моделі АКА, і

записується так:

$$E_i^{mov} = D_i \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta A x \\ \Delta A y \\ \Delta A z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2.48)$$

де: $\Delta A x, \Delta A y, \Delta A z$ – приріст координат точки A вздовж осей X, Y, Z базової системи координат.

Опис переміщення АКА без врахування його швидкостей, прискорень, маси, інерційності та моментів описується рівняннями 2. 36, 2. 39, 2. 42 та 2. 44 - 2.47, а загальний вигляд подається так:

$$\begin{aligned} C_i^{rot} &= [M_{rot}^Y(\beta_i^C) * M_{rot}^Z(\gamma_i^C) * (M_{rot}^X(\alpha_i^C) * C_i^{Rx \alpha_i^C})], i=[1,2]. \\ D_i^{Rz \gamma_i^D} &= M_{rot}^Z \gamma_{rot}^Z(\gamma_i^D), i=[1,2]. \\ E_i^{rot} &= [M_{rot}^Z(\gamma_i^E) M_{rot}^Y(\beta_i^E) (M_{rot}^X(\alpha_i^E) E_i)], \end{aligned}$$

$$D_i^{mov} = D_i \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta C_i x \\ \Delta C_i y \\ \Delta C_i z \\ 1 \end{pmatrix} \quad \partial e \quad \begin{aligned} \Delta C_i x &= [D_i \mp D_i^{rot}][1,0,0] \\ \Delta C_i y &= [D_i \mp D_i^{rot}][0,1,0], \\ \Delta C_i z &= [D_i \mp D_i^{rot}][0,0,1] \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$E_i^{mov} = E_i \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta E_i x \\ \Delta E_i y \\ \Delta E_i z \\ 1 \end{pmatrix} \quad \partial e \quad \begin{aligned} \Delta E_i x &= [E_i \mp E_i^{rot}][1,0,0] \\ \Delta E_i y &= [E_i \mp E_i^{rot}][0,1,0], \\ \Delta E_i z &= [E_i \mp E_i^{rot}][0,0,1] \end{aligned}$$

$$A^{Rx \alpha_i^A} = A M_{rot}^X(\alpha^A),$$

$$A^{Ry \beta_i^A} = A M_{rot}^Y(\beta^A),$$

$$M_{rot}^X(\alpha^A) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha^A) & -\sin(\alpha^A) \\ 0 & \sin(\alpha^A) & \cos(\alpha^A) \end{pmatrix}; \quad M_{rot}^Y(\beta^A) = \begin{pmatrix} \cos(\beta^A) & 0 & \sin(\beta^A) \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\sin(\beta^A) & \cos(\beta^A) \end{pmatrix}; \quad (2.48)$$

$$A^{Rz\gamma^A} = A M_{rot}^Z(\gamma^A),$$

$$M_{rot}^Z(\gamma^A) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma^A) & -\sin(\gamma^A) & 0 \\ \sin(\gamma^A) & \cos(\gamma^A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$A^{rot} = [((A^{rx\alpha^A} M_{rot}^X(\alpha_{rot}^X)) M_{rot}^Y(\beta_{rot}^Y)) M_{rot}^Z(\gamma_{rot}^Z)].$$

Рівняння 2. 48 задають кінематичні параметри АКА і описують переміщення його ланок відносно базової системи координат. Однак опис взаємодії АКА з ОП обмежений координатами точок стопи E_1, E_2, D_1, D_2 , що призводить до того, що координати ТЦМ, характеристики дотику до ОП та граничні кутові положення в моделі не описані. Таким чином отримана аналітична кінематична модель АКА формалізує лише його положення без урахування відповідних сил, які спричинили це положення.

2. 3. 2. Формування обмежень кінематичної моделі антропоморфного крокуючого апарата

Модель АКА, яку побудовано для дослідження процесів забезпечення стійкості та підтримання його усталеного положення, не містить системи обмежень на кути кінематичних пар. Відтак, дана модель не відповідає конструктивним можливостям сучасних АКА, що призводить до невідповідності між моделлю АКА та реальними їх конструкціями.

Для розв'язання задачі неузгодженості між моделлю та конструкцією апарата, до складу моделі необхідно ввести кутові обмеження, що подані в табл. 2.1. Дані обмеження визначені в результаті спостережень за виконанням кінограми руху людини [105].

У відповідності до табл. 2.1, кінематична модель АКА, може бути описана рівняннями 2. 48 яке приймається з врахуванням таких кутових обмежень:

$$\alpha_i^C = [-10 \dots +10]; \quad \beta_i^C = [-5 \dots 45]; \quad \gamma_i^C = [-5 \dots 110];$$

$$\gamma_i^D = [-160 \dots 0]; \quad \gamma_i^E = [-20 \dots 20]; \quad \alpha_i^C = [30 \dots 100].$$

Таблиця 2.1

Кутові обмеження кінематичних пар ланок

Ланка кінематичної пари №1	Ланка кінематичної пари № 2	Площина повороту	Мінімальне значення кута для кінематичної пари	Максимальне значення кута для кінематичної пари
1	2	3	4	5
AB	$B_1 C_1$	z	-5	110
AB	$B_2 C_2$	z	-5	110
AB	Вісь y	x	-10	10
AB	$B_1 C_1 \vee B_2 C_2$	y	-5	45
$B_1 C_1$	$C_1 D_1$	z	-160	0
$B_2 C_2$	$C_2 D_2$	z	-160	0
$C_1 D_1$	$D_1 E_1$	z	30	100
$C_2 D_2$	$D_2 E_2$	z	30	100
$C_1 D_1$	$D_1 E_1$	x	-20	20
$C_2 D_2$	$D_2 E_2$	x	-20	20

2. 3. 3. Формалізація динамічної моделі антропоморфного крокуючого апарата з врахуванням взаємодії з опорною поверхнею

На основі запропонованої кінематичної моделі АКА (рівняння 2. 48) побудуємо динамічну модель апарата, яка може бути задана рівняннями Лагранжа [20] у такому вигляді:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Su, \quad (2.49)$$

де: $q = [q_1, \dots, q_{12}, \omega_z, \omega_y, \omega_x, T_x, T_y, T_z]^T \in R^{18}$ – вектор узагальнених координат;

$M(q) \in R^{18 \times 18}$ – матриця інерції ланок; $C(q, \dot{q}) \in R^{18 \times 18}$ – матриця Коріолісових та доцентрових прискорень; $G(q) \in R^{18 \times 18}$ – вектор сили тяжіння; $u \in R^{12}$ – вектор

вхідних кутових впливів; $S \in R^{18 \times 12}$ – матриця розподілу кутових моментів у шарнірах.

У разі дотику ланок до ОП, рівняння динаміки для моделі АКА задається так:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Su + J(q)^T \lambda, \quad (2.50)$$

де: λ і $J(q)$ – відповідно, Лагранжеві множники та матриця Якобіанів.

В основу запропонованої динамічної моделі покладено роботу [19], кінематична модель якої має 10 ступенів свободи і складається з 8 ланок, серед яких: ланка *Torso C* задає тулуб апарата, ланка *BK* визначає таз, ланки *KK₁*, *BB₁* задають стегна АКА, а ланки *K₁E*, *B₁B₂* задають його гомілки. Кожна з ланок моделі АКА характеризується масою та довжиною, що задаються параметрами m, l , відповідно. Кінематична взаємодія ланок задається координатами точок, що формують відповідні ланки, а сама модель задається кутами $[\Theta_1 \dots \Theta_{10}]$, де: $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_{10}, \Theta_9$ - кути між стопами та гомілками у площинах z та x правої і лівої опори, відповідно; Θ_3, Θ_8 - кути між гомілками та стегнами правої і лівої опори, відповідно; $\Theta_4, \Theta_5, \Theta_6, \Theta_7$ - кути повороту ланок стегна у площинах z та x правої і лівої опори, відповідно.

Тоді, статичне положення моделі визначається координатами точки центра тазу:

$$\begin{aligned} x_{ca} &= l_1 \sin(\Theta_1) - l_2 \sin(\Theta_3 - \Theta_1); \\ y_{ca} &= l_1 \sin(\Theta_2) + l_2 \cos(\Theta_3 - \Theta_1) \sin(\Theta_2) + \frac{l_3}{2} \cos(\Theta_3 + \Theta_4); \\ z_{ca} &= l_1 \cos(\Theta_1) \cos(\Theta_2) + l_2 \cos(\Theta_3 - \Theta_1) \cos(\Theta_2) - \frac{l_3}{2} \sin(\Theta_2 + \Theta_4), \end{aligned} \quad (2.51)$$

та положенням точки центра мас:

$$\begin{aligned} x_{COM} &= \frac{m_b x_b + m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_c x_c + m_3 x_3 + m_4 x_4 + m_e x_e}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e}; \\ y_{COM} &= \frac{m_b y_b + m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_c y_c + m_3 y_3 + m_4 y_4}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e}; \end{aligned} \quad (2.52)$$

$$z_{COM} = \frac{m_b z_b + m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_c z_c + m_3 z_3 + m_4 z_4}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e},$$

де m – маси, зосереджені в кінематичних парах апарата.

На основі даної моделі побудовано модель динаміки апарата, що в рівняннях Лагранжа буде мати такий вигляд:

$$m \begin{pmatrix} \ddot{x}_{ca} \\ \ddot{y}_{ca} \\ \ddot{z}_{ca} \end{pmatrix} = (J^T) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{pmatrix},$$

де J – матриця Якобіанів, що задана так:

$$J = \frac{dp}{dq} = \begin{pmatrix} 0 & Cr_p & S_p \\ -Cr_r & 0 & -S_r \\ \frac{-Cr_r S_r}{D} & \frac{-Cr_p S_p}{D} & D \end{pmatrix},$$

а рівняння динаміки АКА у площині x подано так:

$$m(-z_{ca} \ddot{y}_{ca} + y_{ca} \ddot{z}_{ca}) = \tau_x - mg * y_{ca}, \quad \tau_x = \frac{D}{C_r} \tau_r.$$

Аналогічно описується рівняння динаміки, що задають рух АКА у площинах y і z .

Для подання взаємодії між ОП та АКА в моделі динаміки АКА запропоновано в якості базової точку кінематичної схеми апарата використати точку стопи, а взаємодію АКА з ОП подати як групу сил, що включають реакції опори, ковзання та відповідних моментів. Для побудови такої динамічної моделі АКА застосовано метод Ньютона-Гауса, що характеризується чутливістю до вибору напрямку прикладання зовнішніх сил.

Тоді в загальному вигляді кінематична схема, що буде застосована для побудови динамічної моделі, матиме структуру, яка показана на рис. 2. 6, а її

динамічна модель описується системою рівнянь:

$$\begin{aligned} ma_{cx} &= \sum (F_j); \\ ma_{cy} &= \sum (F_j); \\ J_c \omega &= \sum (M), \end{aligned} \quad (2.53)$$

де M формується з проєкцій моментів на дві площини x, y такі:

$$\begin{aligned} M_y &= \ddot{\Theta} \left(\sum_{i=1}^{11} m_i (V_i z_i - R_i x_i) \right) + \\ &+ \ddot{\Psi} \left(\sum_{i=1}^{11} m_i (W_i z_i - S_i x_i) + \sum_{i=4}^8 J_{yi} \right) + \\ &+ \sum_{i=1}^{11} m_i (P_i z_i - T_i x_i) - g \sum_{i=1}^{11} m_i x_i + \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$+ J_{y1} \ddot{\beta}_{2L} + J_{y2} \ddot{\beta}_{1L} + J_{y9} \ddot{\beta}_{1R} + J_{y10} \ddot{\beta}_{2R} + J_{y11} \ddot{\beta}_{3R} = 0;$$

$$\begin{aligned} M_x &= \ddot{\Theta} \left(\sum_{i=1}^{11} m_i (R_i y_i - A_i z_i) + J_{x1} + J_{x2} + J_{x9} + J_{x10} + J_{x11} \right) + \\ &+ \ddot{\Psi} \sum_{i=1}^{11} m_i S_i y_i + \sum_{i=1}^{11} m_i (T_i y_i - C_i z_i) + g \sum_{i=1}^{11} m_i y_i = 0, \end{aligned} \quad (2.55)$$

де:

$$\begin{aligned} V_1 &= -\alpha \sin(\Theta) \sin(\beta_{2L}); \quad V_2 = 2V_1 - b \sin(\Theta) \sin(\beta_{1L}); \\ V_3 &= V_2 - b \sin(\Theta) \sin(\beta_{1L}); \quad V_4 = V_3; \quad V_5 = V_3; \quad V_6 = V_3; \\ V_7 &= V_5; \quad V_8 = V_6; \quad V_9 = V_3 - b \sin(\Theta) \sin(\beta_{1R}); \\ V_{10} &= V_3 - (2b \sin(\beta_{1R}) + \alpha \sin(\beta_{2R}) \sin(\Theta)); \\ V_{11} &= V_3 - (2b \sin(\beta_{1R}) + 2\alpha \sin(\beta_{2R}) + h \sin(\beta_{3R}) \sin(\Theta)) \end{aligned}$$

$$W_1=0; \quad W_2=0; \quad W_3=0;$$

$$W_4=c \cos(\vec{\varphi}); W_5=(R-e) \cos(\vec{\psi}); \quad W_6=(R-2e) \cos(\vec{\psi}) - s \cos(\alpha) \sin(\vec{\psi});$$

$$W_7=W_5; \quad W_8=W_6; \quad W_9=0; \quad W_{10}=0; \quad W_{11}=0;$$

$$P_1=-\alpha \dot{\Theta}^2 \cos(\Theta) \sin(\beta_{2L}) - \alpha \dot{\Theta} \dot{\beta}_{2L} \sin(\Theta) \cos(\beta_{2L}) + \alpha \ddot{\beta}_{2L} \cos(\Theta) \cos(\beta_{2L}) - \\ - \alpha \dot{\beta}_{2L} \Theta \sin(\Theta) \cos(\beta_{2L}) - \alpha \dot{\beta}_{2L}^2 \cos(\Theta) \sin(\beta_{2L});$$

$$P_2=2P_1 - b \dot{\Theta}^2 \cos(\Theta) \sin(\beta_{1L}) - b \dot{\Theta} \dot{\beta}_{1L} \sin(\Theta) \cos(\beta_{1L}) + b \ddot{\beta}_{1L} \cos(\Theta) \cos(\beta_{1L}) - \\ - b \dot{\beta}_{1L} \Theta \sin(\Theta) \cos(\beta_{1L}) - b \dot{\beta}_{1L}^2 \cos(\Theta) \sin(\beta_{1L});$$

$$P_3=P_2 - \dot{\Theta}^2 b \cos(\Theta) \sin(\beta_{1L}) - \dot{\Theta} \dot{\beta}_{1L} b \sin(\Theta) \cos(\beta_{1L}) + b \ddot{\beta}_{1L} \cos(\Theta) \cos(\beta_{1L}) - \\ - b \dot{\beta}_{1L} \dot{\Theta} \sin(\Theta) \cos(\beta_{1L}) - b \dot{\beta}_{1L} \cos(\Theta) \sin(\beta_{1L});$$

$$P_4=P_3 - c \vec{\psi}; \quad P_5=P_3 - (R-e) \vec{\psi}^2 \sin \vec{\psi};$$

$$P_6=P_3 - \vec{\psi}^2 (R-2e) \sin(\vec{\psi}) - s \vec{\psi}^2 \cos(\beta) \cos(\vec{\psi});$$

$$P_7=P_5; \quad P_8=P_6;$$

$$P_9=P_3 - b \dot{\Theta}^2 \cos(\Theta) \sin(\beta_{1R}) - 2b \dot{\Theta} \dot{\beta}_{1R} \sin(\Theta) \cos(\beta_{1R}) + \\ + b \ddot{\beta}_{1R} \cos(\Theta) \cos(\beta_{1R}) - b \dot{\beta}_{1R}^2 \cos(\Theta) \sin(\beta_{1R});$$

$$P_1=-\alpha \dot{\Theta}^2 \cos(\Theta) \sin(\beta_{2L}) - \alpha \dot{\Theta} \dot{\beta}_{2L} \sin(\Theta) \cos(\beta_{2L}) + \alpha \ddot{\beta}_{2L} \cos(\Theta) \cos(\beta_{2L}) - \\ - \alpha \dot{\beta}_{2L} \Theta \sin(\Theta) \cos(\beta_{2L}) - \alpha \dot{\beta}_{2L}^2 \cos(\Theta) \sin(\beta_{2L});$$

$$P_{10}=P_3+(2b\ddot{\beta}_{1R}\cos(\beta_{1R})-2b\dot{\beta}_{1R}^2\sin(\beta_{1R})+\alpha\ddot{\beta}_{2R}-\alpha\ddot{\beta}_{2R}\cos(\beta_{2R})-\alpha\dot{\beta}_{2R}^2\sin(\beta_{2R})\cos(\Theta))-$$

$$-2\dot{\Theta}(2b\dot{\beta}_{1R}\cos(\beta_{1R})+\alpha\dot{\beta}_{2R}\cos(\beta_{2R}))\sin(\Theta)-\dot{\Theta}^2(2b\dot{\beta}_{1R}\cos(\beta_{1R})+\alpha\sin(\beta_{2R}))\cos(\Theta);$$

$$P_{11}=P_3+(2b\ddot{\beta}_{1R}-2b\dot{\beta}_{1R}^2\sin(\beta_{1R})+2a\ddot{\beta}_{2R}\cos(\beta_{2R}))\sin(\Theta)+$$

$$+(-2\alpha\dot{\beta}_{2R}\sin(\beta_{2R})+h\ddot{\beta}_{3R}\cos(\beta_{3R})-h\dot{\beta}_{3R}^2\cos(\beta_{3R}))\sin(\Theta)-$$

$$-\dot{\Theta}^2(2b\sin(\beta_{1R})+2a\sin(\beta_{2R})+h\sin(\beta_{3R}))\cos(\Theta);$$

$$A_1=\alpha\cos(\beta_{2R})\cos(\Theta);$$

$$A_2=2A_1+b\cos(\beta_{1L})\cos(\Theta);$$

$$A_3=A_2+b\cos(\beta_{1L})\cos(\Theta);$$

$$A_4=A_3; \quad A_5=A_3; \quad A_6=A_3;$$

$$C_1=-\alpha\ddot{\beta}_{2L}\sin(\Theta)-\alpha\dot{\beta}_{2L}^2\cos(\beta_{2L})\sin(\Theta)-\alpha\dot{\beta}_{2L}\dot{\Theta}\sin(\beta_{2L})\cos(\Theta)-$$

$$-\alpha\dot{\Theta}\dot{\beta}_{2L}\sin(\beta_{2L})\cos(\Theta)-\alpha\dot{\Theta}^2\cos(\beta_{2L})\sin(\Theta);$$

$$C_2=2C_1-d\beta_{1L}\sin(\Theta)-b\dot{\beta}_{1L}^2\cos(\beta_{1L})\sin(\Theta)-$$

$$-2b\dot{\beta}_{1L}\dot{\Theta}\sin(\beta_{1L})\cos(\Theta)-d\dot{\Theta}^2\cos(\beta_{1L})\sin(\Theta);$$

$$C_4=C_3; \quad C_5=C_3; \quad C_6=C_3; \quad C_7=C_3; \quad C_8=C_3;$$

$$C_9=C_3+b\ddot{\beta}_{1R}\sin(\beta_{1R})\sin(\beta)+b\beta^2\cos(\beta_{1R})\sin(\Theta)+$$

$$+2b\dot{\beta}_{1R}\dot{\Theta}\sin(\beta_{1R})\cos(\Theta)+\dot{\Theta}^2\cos\beta_{1R}\sin(\Theta);$$

$$C_{10}=C_3+(2b\ddot{\beta}_{1R}+2b\dot{\beta}_{1R}^2\cos\beta_{1R})\sin(\Theta)+$$

$$+2b\dot{\beta}_{1R}\dot{\Theta}\sin(\beta_{1R})\cos(\beta_b)\dot{\Theta}^2\cos(\beta_{1R})\sin(\Theta)+$$

$$+2\dot{\Theta}(2b\dot{\beta}_{1R}\sin(\beta_{1R})+\alpha\dot{\beta}_{2R}\sin(\beta_{2R})\cos(\Theta))+$$

$$+\dot{\Theta}^2+\dot{\Theta}^2(2b\cos(\beta_{1R})+\alpha\cos(\beta_{2R}))\sin(\Theta)$$

$$\begin{aligned}
C_{11} = & C_3 + (2\alpha\beta_{2R}'' + 2\alpha\beta_{2R}^2 \cos(\beta_{2R}) + 2b\beta_{1R}'' \sin(\beta_{1R})) \sin(\Theta) + \\
& + (2b\beta_{1R}^2 \cos(\beta_{1R}) + h\beta_{3R}'' \sin(\beta_{3R}) + h\beta_{3R}^2 \cos(\beta_{3R})) \sin(\Theta) + \\
& + 2\dot{\Theta}(2\alpha\beta_{2R}' + 2b\beta_{1R}' \sin(\beta_{1R}) + h\beta_{3R}' \sin(\beta_{3R})) \cos(\Theta) + \\
& + \dot{\Theta}^2(2\alpha \cos(\beta_{2R}) + 2b \cos(\beta_{1R}) + h \cos(\beta_{3R})) \sin(\Theta);
\end{aligned}$$

$$R_1 = \alpha \cos(\beta_{2L}) \sin(\Theta); \quad R_2 = -(2\alpha \cos(\beta_{2L}) + b \cos(\beta_{1L})) \sin(\Theta);$$

$$R_3 = R_2 - b \cos(\beta_{1L}) \sin(\beta); \quad R_4 = R_3; \quad R_5 = R_3; \quad R_6 = R_3;$$

$$R_7 = R_5; \quad R_8 = R_6; \quad R_9 = R_3 + b \cos(\beta_{1R}) \sin(\Theta);$$

$$R_{10} = R_9 + (b \cos(\beta_{1R}) + \alpha \cos(\beta_{2R})) \sin(\Theta); \quad R_{11} = R_{10} + \alpha \cos(\beta_{2R}) \sin(\Theta);$$

$$S_1 = 0; \quad S_2 = 0; \quad S_3 = 0;$$

$$S_4 = -C \sin(\vec{\Psi}); \quad S_5 = -(R - e) \sin(\vec{\Psi});$$

$$S_6 = -((R - 2e) \sin(\vec{\Psi}) + s \cos(\alpha) \cos(\vec{\Psi}));$$

$$S_7 = S_5; \quad S_8 = S_6; \quad S_9 = 0;$$

$$S_{10} = 0; \quad S_{11} = 0;$$

$$\begin{aligned}
T_1 = & -\alpha(\beta_{2L}'' \sin(\beta_{2L}) \cos(\Theta) + \beta_{2L}^2 \cos(\beta_{2L}) \cos(\Theta)) - \\
& -\alpha(-2\beta_{2L}' \dot{\Theta} \sin(\beta_{2L}) \cos(\Theta));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_2 = & -\cos(\Theta)(-2\alpha\beta_{2L}'' \sin(\beta_{2L}) + 2\alpha\beta_{2L}' \cos(\beta_{2L})) - \\
& -\cos(\Theta)(b\beta_{1L}'' \sin(\beta_{1L}) + b\beta_{1L}^2 \cos(\beta_{1L})) + \\
& + 2\dot{\Theta}(2\alpha\beta_{2L}' \sin(\beta_{2L}) + b\beta_{1L}' \sin(\beta_{1L}) \sin(\Theta)) - \\
& -\dot{\Theta}^2(2\alpha \cos(\beta_{2L}) + b \cos(\beta_{1L}) \cos(\Theta));
\end{aligned}$$

$$T_3 = T_2 - b\ddot{\beta}_{1L}\sin(\beta_{1L})\cos(\Theta) - b\dot{\beta}_{1L}^2\cos(\beta_{1L})\cos(\Theta) + \\ + 2b\dot{\Theta}\dot{\beta}_{1L}\sin(\beta_{1L})\sin(\Theta) - b\dot{\Theta}^2\cos(\beta_{1L})\cos(\Theta);$$

$$T_4 = T_3 - C\dot{\psi}^2\cos(\psi);$$

$$T_5 = T_3 - \dot{\psi}^2(R - e)\cos(\vec{\psi});$$

$$T_6 = T_3 - \dot{\psi}^2((R - 2e)\cos(\vec{\psi}) - s\cos(\alpha)\sin(\vec{\psi}));$$

$$T_7 = T_5; \quad T_8 = T_6;$$

$$T_9 = T_3 + b\ddot{\beta}_{1R}\sin(\beta_{1R})\cos(\Theta) + b\dot{\beta}_{1R}^2\cos(\beta_{1R})\cos(\Theta);$$

$$T_{10} = T_9 - 2\dot{\Theta}(b\dot{\beta}_{1R}\sin(\beta_{1R}) + \alpha\dot{\beta}_{2R}\sin(\beta_{2R})\sin(\Theta)) + \\ + 2\dot{\Theta}(b\ddot{\beta}_{1R} + b\dot{\beta}_{1R} + \alpha\ddot{\beta}_{2R}\sin(\beta_{2R} - \alpha\dot{\beta}_{2R}^2\cos(\beta_{2R}))\cos(\Theta)) + \\ + \dot{\Theta}^2(b\cos(\beta_{1R}) + \alpha\cos(\beta_{2R})\cos(\Theta));$$

$$T_{11} = T_{10} + \alpha\ddot{\beta}_{2R}\sin(\beta_{2R})\cos(\Theta) + \alpha\dot{\beta}_{2R}^2\cos(\beta_{2R})\cos(\Theta) - \\ - 2\alpha\dot{\Theta}\dot{\beta}_{2R}\sin(\beta_{2R})\sin(\Theta) + \alpha\dot{\Theta}^2\cos(\beta_{2R})\cos(\Theta),$$

де: Θ, R визначають сили реакції ОП та силу тертя, відповідно.

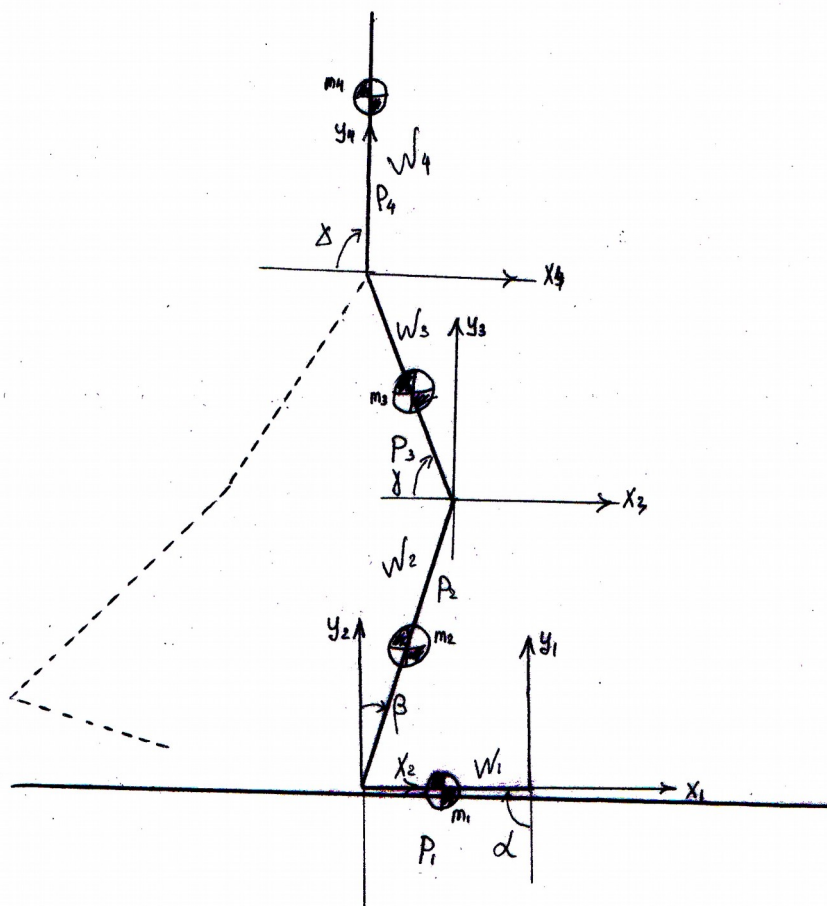


Рисунок 2.6 - Загальний вигляд кінематичної схеми АКА з базовою системою координат, прив'язаної до стопи апарата: W_1, W_2, W_3, W_4 - ланки АКА; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ - кути кінематичних пар ланок $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4$ - координати шарнірів кінематичних пар ланок апарата; m_1, m_2, m_3, m_4 - положення ТЦМ ланок; P_1, P_2, P_3, P_4 - відстані між ТЦМ і шарнірами ланок;

Рівняння 2. 52 і 2. 55 описують загальні властивості АКА при взаємодії з ОП. Для опису динамічних властивостей апарата при різних типах взаємодії з ОП (актуально при переміщенні АКА по ОП) потрібно вводити додаткові корегуючі параметри, таким чином:

- коли АКА контактує з ОП ланкою лівої стопи в одній точці на п'яті, то для відповідності моделі цій ситуації всі параметри залишаються незмінними;
- коли АКА контактує з ОП ланкою лівої стопи у трьох точках, то для корекції моделі до цього стану потрібно всі координати x зменшити на l_1 ;
- коли АКА контактує з ОП ланкою лівої стопи в одній точці, яка розташована на носку ланки лівої стопи, то для корекції моделі до цього стану потрібно всі координати x зменшити на l_2 ;
- коли АКА контактує з ОП ланкою правої стопи в одній точці, яка розташована

на п'яті ланки правої стопи, то для корекції моделі до цього випадку потрібно всі координати x зменшити на d , а параметри y змінювати на d_1 як це показано на рис. 2. 7.

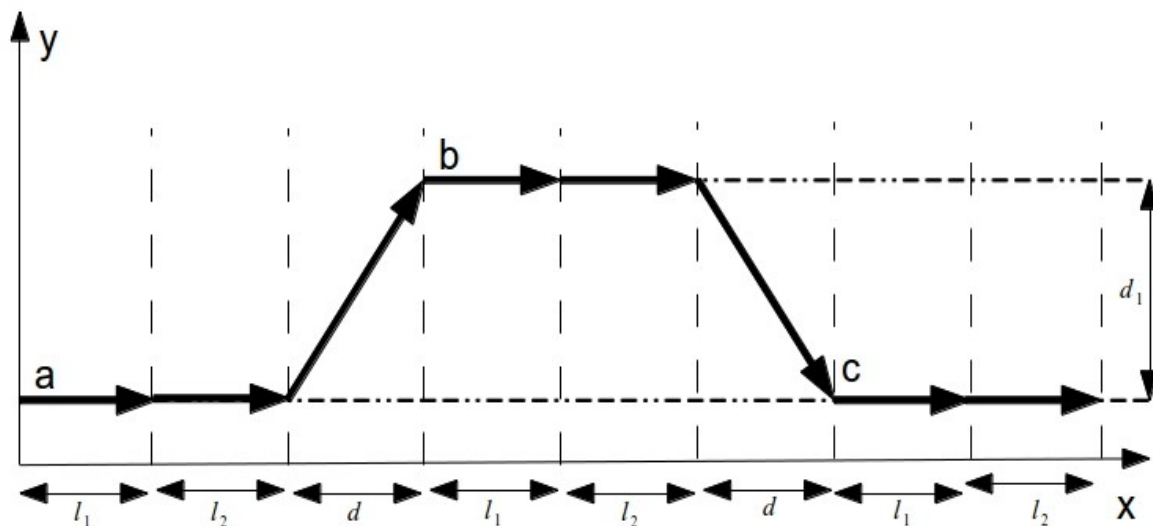


Рисунок 2.7 - Схематичне подання зміни координат точок дотику стоп АКА до ОП:
 l_1, l_2 - довжина ланок стоп лівої та правої опор; d - відрізок переміщення ТЦМ АКА завалом;
 a, b, c - точки зміни опорної фази; d_1 - “ширина” ходи; x, y - осі переміщення ТПЦМ АКА на ОП.

Для формалізації реакції сил у дотичних точках ланок стоп АКА до ОП застосовано таку форму:

$$F_x = \sum_{i=1}^{11} m_i \ddot{x}_i = \ddot{\Theta} \sum_{i=1}^{11} m_i V_i + \ddot{\Psi} \sum_{i=1}^{11} m_i W_i + \sum_{i=1}^{11} m_i P_i; \quad (2.56)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^{11} m_i \ddot{y}_i = \ddot{\Theta} \sum_{i=1}^{11} m_i A_i + \sum_{i=1}^{11} m_i C_i; \quad (2.57)$$

$$F_z = \sum_{i=1}^{11} m_i (\ddot{z}_i + g) = \ddot{\Theta} \sum_{i=1}^{11} m_i R_i + \ddot{\Psi} \sum_{i=1}^{11} m_i S_i + \sum_{i=1}^{11} m_i T_i + \sum_{i=1}^{11} m_i g. \quad (2.58)$$

Рівняння 2. 58 описує складову сили, що відповідає реакції ОП на АКА, тоді як рівняння 2. 56 і 2. 57 описують складові сили тертя.

Формалізована модель динамічної поведінки АКА, що подана рівняннями 2. 52 - 2. 58, відповідає умовам “циклічності” руху, а її фазова діаграма

компенсувальних координат формує складну замкнену криву, яка зображена на рис. 2. 8.

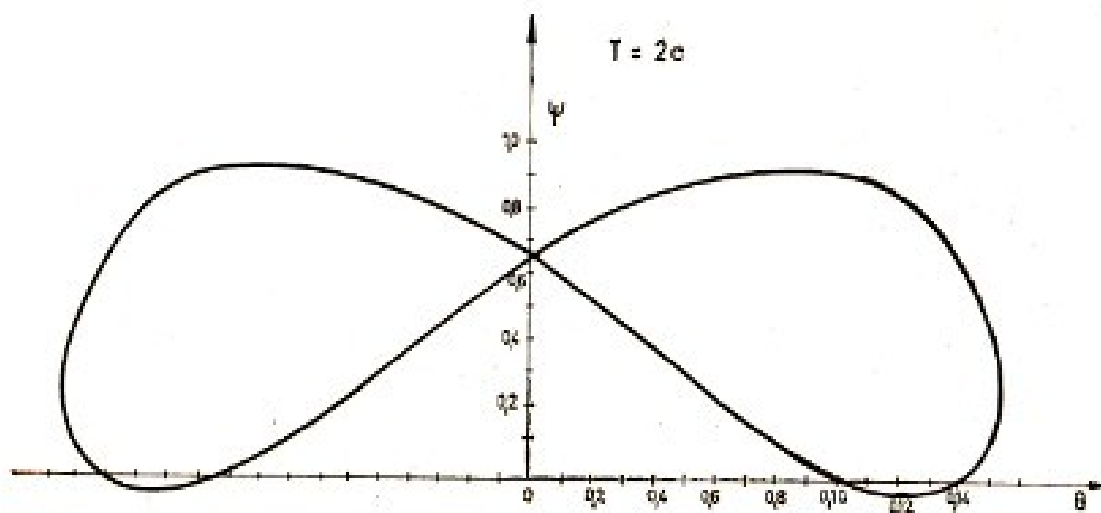


Рисунок 2.8 - Номінальна траєкторія руху компенсаційних координат Ψ, Θ моделі АКА в період $T=2$ секунд: Θ, Ψ -координати положення ТЦМ; T -час

Наведена крива отримана для заданих параметрів АКА, зокрема для: $S=1; T=2\text{ s}$, де S - коефіцієнт, що визначає амплітуду максимальної довжини кроку, T - період кроку, який визначає максимальні моменти переміщення ланок АКА.

2. 3. 4. Формалізація обмежень до застосування аналітичної моделі антропоморфного крокуючого апарата для задач управління його усталеним рухом

Як вже відзначалося, існує дві форми подання технічних моделей: аналітична та комп'ютерна. У класичних роботах, які присвячені моделюванню АКА і способам задання його руху, апарат подається в аналітичній формі з застосуванням рівнянь Лагранжа або кватерніонів. При цьому структура моделі АКА, її положення, стан, поведінка, взаємодія з ОП заздалегідь визначені та формалізовані. Тобто апарат повністю описано у відповідності до умов його застосування. Проте основною проблемою у процесі дотримання усталеного положення АКА за довільних умов є знаходження такої передумови, позиції чи поведінки апарата, при якій його стійке положення не порушене, або відновиться. Зважаючи на це, до складу моделі потрібно включати всі фактори можливої взаємодії між АКА та середовищем. Така розширена модель описується великою кількістю рівнянь з багатьма невідомими.

Спроба описати таку модель аналітичним способом унеможливила б її подальше застосування. Проте використання аналітичних методів подання АКА із застосуванням рекурсивних матричних форм представлення даних, якими оперує комп'ютерна модель, може істотно спростити застосування отриманої моделі для задач управління усталеним рухом АКА на довільній ОП.

Завдяки комп'ютерним засобам аналітичні методи моделювання АКА ефективніше описують кінематику та динаміку апарата і не мають кардинальних відмінностей у порівнянні з аналітичною формою, окрім необхідності перерахунку просторового положення ланок і подачі їх у вигляді тензора.

У зв'язку з цим запропоновано побудову комп'ютерної моделі АКА, яка відповідає таким вимогам:

- апарат повинен мати змогу переміщуватися у тривимірному просторі;
- апарат повинен мати не менше вісімнадцяти ступенів свободи;
- ланки апарата мають характеризуватися інерційністю;
- апарат повинен мати датчики тиску на ОП та враховувати розподіл сили натиску на стопу АКА. Дані, отримані з цих датчиків, мають бути враховані у моделі;
- до складу моделі АКА повинна додаватися модель ОП з можливістю формування рельєфу поверхні;
- модель має бути спостережуваною за такими параметрами:
 - кутовим та лінійним положеннями ТЦМ;
 - лінійним положенням ТПЦМ;
 - кутами та моментами в шарнірах;
- модель повинна бути керованою за наданим вектором стану системи, що налічує кути і моменти у шарнірах АКА.

Блок *Join Initial Condition* (рис. 2. 9) виконує функцію формування початкових умов ланки A відносно нульових координат блоку *Ground*. Аналітичним аналогом цього блоку є матриці $A^{Rx\alpha_1^4}, A^{Ry\beta_1^4}, A^{Rz\gamma_1^4}, E_i^{mov}$ які описані рівняннями 2. 46 - 2.48. Конфігурація блоку *Join Initial Condition* безпосередньо впливає на положення ТЦМ АКА і задає постійні сили, зокрема гравітацію. Натомість блок *Body Sensor* (Рис. 2. 9) зчитує параметри кутів, кутових швидкостей і кутових прискорень переміщення ланок апарата. Після зчитування ці дані передаються у вигляді вектора $\vec{\alpha}[\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}]$ для моніторингу та опрацювання в режимі реального часу засобами СУ АКА. Врахування дії внутрішніх сил та моментів, зокрема зовнішніх сил, здійснюється у моделі функціями блоків шарнірів, відповідно до властивостей ланок апарата (їхніх мас, довжин тощо).

Кінематичний ланцюг ланок $AB_r B_l C_r C_l D_r D_l$, які попарно зв'язаний шарнірами, формує комп'ютерну модель семиланкового АКА, яка показана на рис. 2. 10.

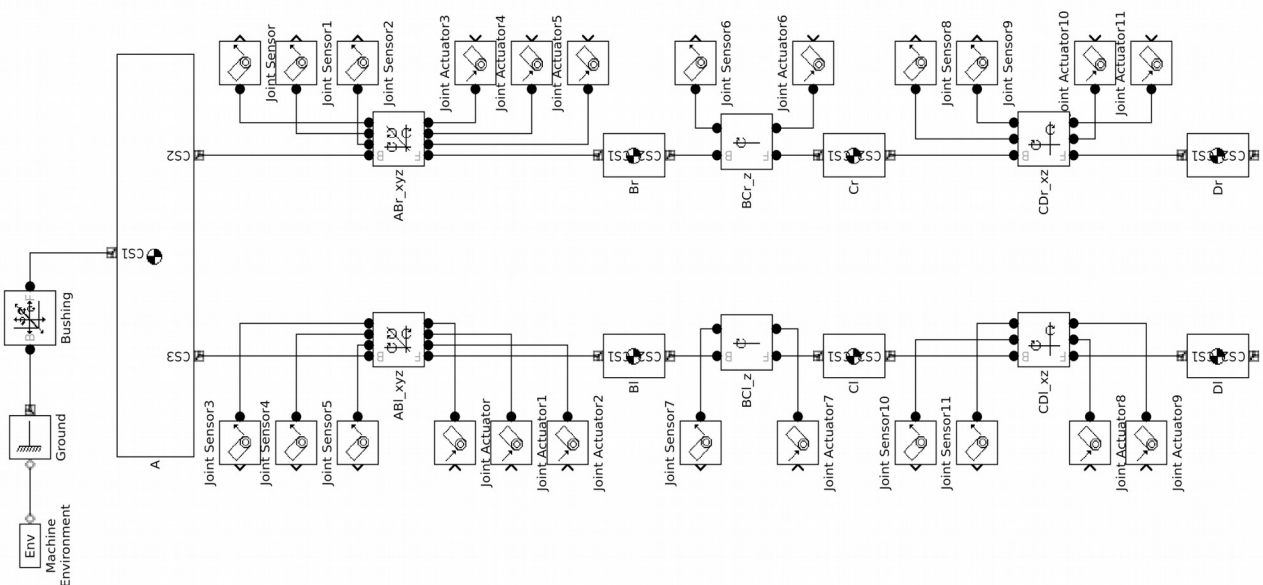


Рисунок 2.10 - Загальний вигляд комп'ютерної моделі семиланкового АКА:
Machine Environment - опис зовнішніх впливів; *Ground* — координати базової точки моделі;
Brushing — шарнір кінематичної апри; *CS1, CS2, CS3* — порти ; *Joint Sensor* — підсистема зчитування поточного кутового положення кінематичної пари; *Joint Actuator* — підсистема формування кутового моменту у парі ланок; *A, Bl, Br, Cl, Cr, Dl, Dr* — ланки АКА;
Abl_xyz, Abr_xyz — триосеві шарніри; *Bcr_z, Bcl_z* — одноосеві шарніри;
Cdl_xz, Cdr_xz -двохосеві шарніри

Динамічні властивості ланки A задані трьома точками кінематичної взаємодії $CS1, CS2, CS3$, а координати положення ТЦМ виражені точкою CG , параметрами маси, інерції та положенням локальних систем координат ланки. Таким чином, дані точки можуть бути задані відповідними координатами, які подаються у вигляді матриці:

	x	y	z
$CS1$	0	0	0
$CS2$	* 0	-0.4	0.15
$CS3$	0	-0.4	-0.15

Кожна з точок $CS1, CS2, CS3$ виконує роль “порту” для опису кінематичних пар, які сформовані між ланкою A та парою ланок Br і Bl , що включені до складу АКА за допомогою відповідних шарнірів. Тоді ТЦМ CG ланки A , визначає відносні координати центру тяжіння даної ланки і задається вектором координат так:

	x	y	z
CG	* 0	0	0.

У моделі АКА координати точок $CS1, CS2, CS3, CG$ визначені відносно точки взаємодії з блоком *Graund* через порт $CS1$. Для опису інерційності ланки A , її маса визначена параметром mas_A , і має значення 30kg . Тоді момент інерції, що діє на ланку A , задається таким чином:

$$I_A = mas_A * len_A^2,$$

де len_A – довжина ланки A , інерційність якої змінюється в залежності від фази руху апарата. Враховуючи змінну конфігурацію ланок АКА, а також його властивість міняти дотичні до ОП ланки, інерційність ланок апарата визначається неоднозначно і залежить від фази руху АКА.

У разі, якщо одна з кінцівок АКА дотикається до ОП і сила взаємного тертя між вказаною ланкою і ОП достатньо висока, то момент інерції ланки A має властивості, подібні до зворотного фізичного маятника змінної конфігурації і

залежить від:

- інерційності розглянутих ланок A, B та їх спільних кутів;
- інерційності ланок стегон, гомілок і стоп, які дотикаються до ОП.

Тоді, у загальному випадку, для переміщення АКА момент інерції описується таким тензором:

$$I'_A = I_A^{позв.} + I_A^{наб.},$$

$$I_A^{позв.} = \frac{1}{12} * \begin{matrix} & x & y & z \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} & \begin{matrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{matrix} \end{matrix},$$

$$I_x = \frac{[[mas_A * len_A^2] * \cos(\alpha^z * \sin(\alpha^z))]}{2} + [mas_B * len_B^2] +$$

$$+ [[mas_C * len_C^2] * \cos(\gamma^x) * \sin(\gamma^z)];$$

$$I_y = \frac{[[mas_A * len_A^2] * \cos(\alpha^y * \sin(\alpha^z))]}{2} + [mas_B * len_B^2 * \sin(\beta^z)] +$$

$$+ [mas_C * len_C^2 * \sin(\gamma^z)];$$

$$I_z = \frac{[mas_A * len_A^2 \cos(\gamma^y) * \sin(\alpha^z)]}{2} + [mas_B * len_B^2 * \sin(\beta^z)] +$$

$$+ [mas_C * len_C^2 * \sin(\gamma^z)];$$

$$I_A^{наб.} = \frac{1}{3} * \begin{matrix} & x & y & z \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} & \begin{matrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{matrix} \end{matrix},$$

$$I_x = I_y = \frac{[mas_A * len_A^2 + len_B^2] * \cos(\beta^z)}{2}.$$

Якщо кути в шарнірах близькі до 0° , або 90° , виникає спотворення тензора інерції, яке пов'язане зі зміною опису моменту інерції до вигляду $I = mr^2$, який не включає складової імпульсу удару. Тоді інерційність ланки A не залежить від тензорів інерції інших ланок і може бути подана у такій формі:

$$I_A = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z \end{matrix} \\ \begin{matrix} [\frac{mas_A}{12} * len_A^2] \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ [\frac{mas_A}{12} * len_A^2] & 0 \\ 0 & 0 & [\frac{mas_A}{12} * len_A^2] \end{bmatrix} \end{matrix},$$

де момент інерції у площині xy задано як інерційність стрижня з малим радіусом E , що пов'язано з початковою орієнтацією цієї ланки у складі АКА. Перерахунок взаємної інерції ланок виконується програмними засобами моделювання автоматично.

У разі дотику обох опор АКА до ОП, момент інерції ланки A залежить від:

- інерційності корпусу і кутів між ланками A і B , до того ж, значення кутів змінюватимуться в залежності від амплітуди коливання ланок A , B ;
- інерції ланок стегон і гомілок з відповідними статичними значеннями кутів.

У розглянутому випадку інерційність АКА має істотні відмінності від систем маятникового типу. Так, під час нахилу АКА, кути $\alpha^x, \alpha^y, \alpha^z$ будуть змінені. Тому, з врахуванням умови наявного контакту опор до ОП, загальний момент інерції ланки A визначено так:

$$I'_A = I^i + A + I_A^{i+1},$$

$$I_A^{poz} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} x & y & z \\ I_x^i + I_x^{i+1} & 0 & 0 \\ 0 & I_y^i + I_y^{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & I_z^i + I_z^{i+1} \end{bmatrix}, \quad (2.49)$$

де:

$$\begin{aligned} I_x^{i,i+1} &= mas_A * [(len_A^2 + len_B^2) \cos(\alpha^{x,i}) + len_C^2 \cos(\gamma^{x,i})] + \\ &\quad + ([mas_B len_B^2] + [mas_C len_C^2]) \cos(\gamma^{x,i}); \\ I_y^{i,i+1} &= (mas_A * len_A^2 + mas_B * len_B^2) * \cos(\alpha^{x,i}) + mas_C * len_C^2; \\ I_z^{i,i+1} &= [mas_A * (len_A^2 + m)], \end{aligned}$$

де i – вказівник на кінцівку АКА.

Засобами комп'ютерного моделювання було показано, що інерційність ланки A формалізується подібно до стрижня і може бути подана ідентично до системи рівнянь 2. 49.

Зважаючи на те, що ланка A визначена у декартовій системі координат і в розрахунках застосовується відповідний математичний апарат, то і значення інерційності ланки будуть подані у вигляді проекцій на задані осі системи координат.

Подібно парі ланок AB (рис. 2.11), пара ланок BC зв'язана в кінематичний ланцюг шарніром, що обмежує п'ять ступенів свободи даної пари.

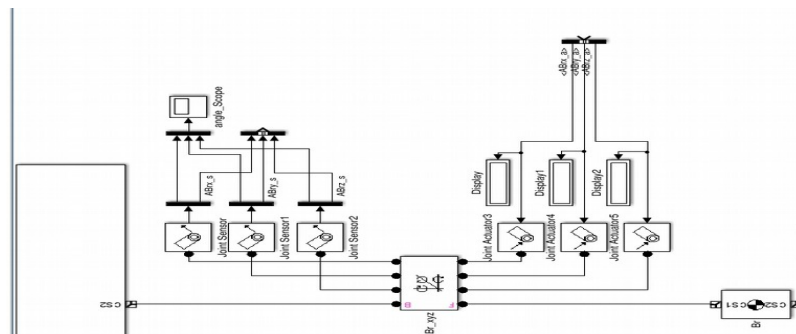


Рисунок 2.11 - Модель кінематичного ланцюга ланок “корпус-стегно” з інтегрованими блоками *Joint Actuator* і *Joint Sensor*: $ABrx_a, ABry_a, ABrz_a$ – тракти передачі даних про поточні моменти від системи управління до *Joint Actuator*; $ABrx_s, ABry_s, ABrz_s$ – тракти передачі даних про кутові швидкості від *Joint Sensor* до *CY*; *Angle Scope, Display* — засоби моніторингу кутів;

Моніторинг взаємодії ланки A з ланками Br, Bl виконується засобами блоку *MatLab Simulink Scope* (зображує дані про поточний кут, кутову швидкість, кутове прискорення або моменти) і блоку *Display*, який показує значення моменту в кінематичній парі. Застосування блоків *Scope* і *Display* у комп'ютерній моделі АКА показано на рис. 2.11.

Кінематична взаємодія ланок Br та Bl з ланками Cr та Cl побудована засобами одно-осьових шарнірів $BrCr_z, BlCl_z$, що задають її рухомість у площині z . Для формування відповідних сил і моментів до кінематичної пари введено блок *Join Actuator*, що задає кутовий момент у шарнірах $BrCr_{z,a}, BlCl_{z,a}$. Тоді поточне положення і динаміка ланок B_l, C_l, B_r, C_r визначається засобами блоку *Joint Sensor*, який зчитує кут, кутову швидкість, кутове прискорення та передає ці дані до системи управління за допомогою каналів зв'язку $BCr_{z,s}, BCl_{z,s}$ (рис. 2.12).

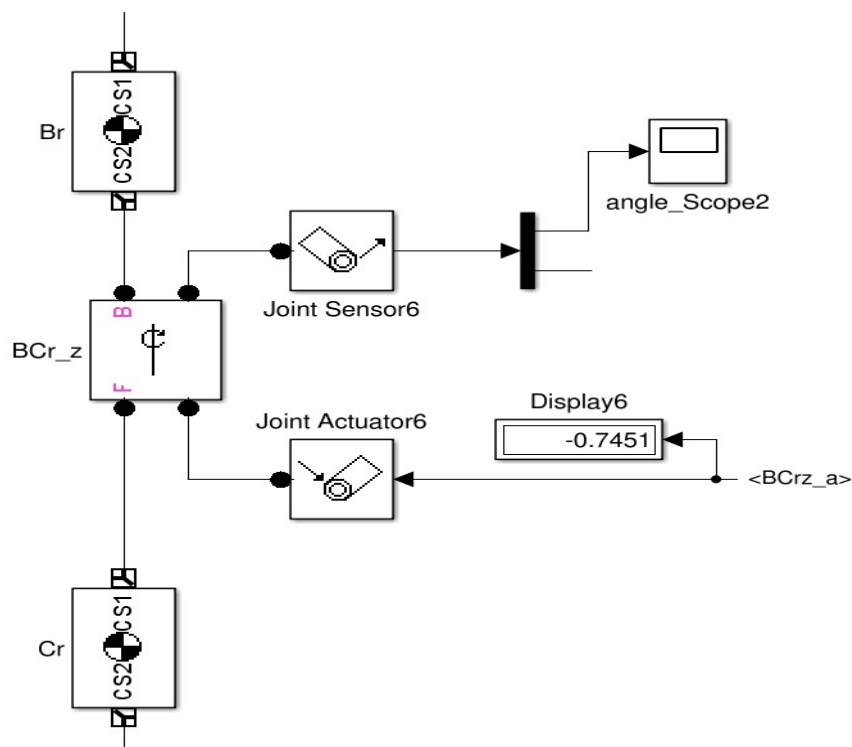


Рисунок 2.12 - Кінематичний ланцюг “стегно-гомилка” у складі комп'ютерної моделі АКА:
 Br, Cr - ланки стегна та гомілки, відповідно; BCr_z - блок одно-осьового шарніра; *Joint Sensor* - блок датчика поточного кута і кутової швидкості в кінематичній парі ланок; *Joint Actuator* - блок актуатора, управління яким відбувається за узагальненим моментом; *angle Scope* - блок графічного зображення зміни кута кінематичної пари ланок; *Display* - блок для моніторингу поточного моменту приводу кінематичної пари ланок; $BCr_{z,a}, BCl_{z,s}$ - тракти передачі даних про керуючі моменти і кутову швидкість, відповідно.

Ланки C_r, C_l , які мають вигляд відповідно до рівняння 2.43 приєднуються до вказаних шарнірів у точках $CS1$:

	x	y	z
CG	0	-0.25	0
$CS1$	0	0	0
$CS2$	-0.5	0	0

Матриця розвороту має такий вигляд:

$$R1 \begin{matrix} x & y & z \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix},$$

де $R1$ – ідентифікатор операції розвороту в площині z .

Аналогічно до формалізованого подання кінематичного ланцюга однієї опори АКА, сформований ланцюг іншої опори апарата. Обидві опори взаємодіють з ланкою корпусу A і об'єднують всі ланки апарата в єдину динамічну систему.

Для розв'язання задачі управління усталеним рухом АКА, до складу комп'ютерної моделі апарата інтегровано модель ОП. Враховуючи фактори взаємного впливу, дана модель повинна володіти групою характеристик, а саме:

- просторовою фіксацією до базової системи координат;
- інваріантом просторової форми рельєфу;
- неоднорідною пружністю;
- положення ланок АКА відносно ОП.

Для визначення цих характеристик до комп'ютерної моделі АКА інтегровано елементи симуляції тензочутливої системи стоп апарата. Ці елементи взаємодіють з ланками стоп апарата без наявних ступенів свободи, що досягається класифікацією елементів як тіл *Multibody dynamics* із застосуванням шарніра типу *Weld* (рис. 2.13).

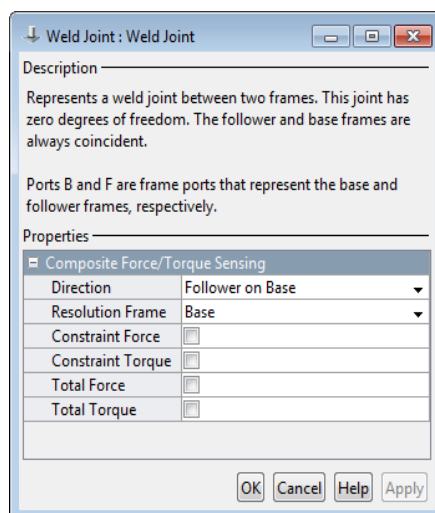


Рисунок 2.13 - Характеристики шарніру *Weld* у складі бібліотеки *SimScupe*

Елементи тензочутливої системи розташовані на стопах АКА таким чином, щоб під час контакту стопи з ОП забезпечити безпосередню взаємодію з ОП (рис. 2. 14).

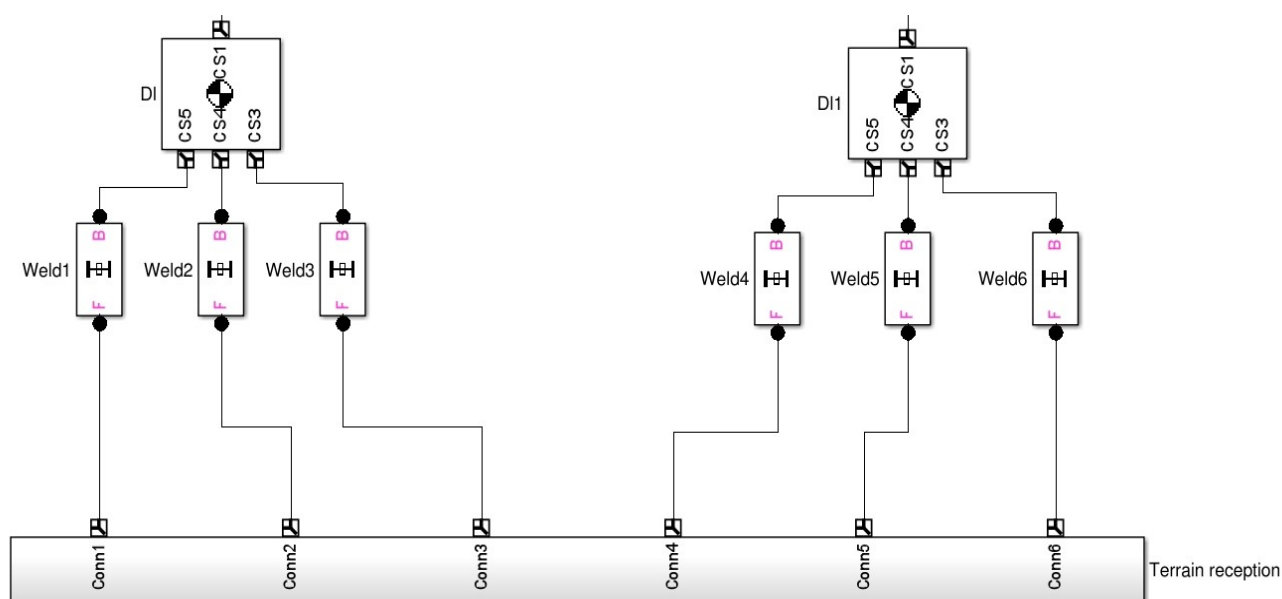


Рисунок 2. 14 - Тензочутливі елементи та модель ОП у складі моделі АКА:
DI, DI1 - ланки тензочутливих елементів; *Weld[1..6]* - шарніри без ступенів свободи;
Terrain reception - блок симуляції рельєфу та пружності ОП.

Для представлення ОП з наведеними вище характеристиками синтезована комп'ютерна модель, що показана на рис. 2. 15. В даній моделі взаємодія ОП і АКА здійснюється засобами шести ланок (три на стопу), які містять сенсорні матриці, що чутливі до взаємного накладання ланок і елементів. Тоді, моніторинг та аналіз взаємного проникнення ланок і тензочутливих елементів АКА (*Body, Body[1–5]*) (Рис. 2. 14) в координатах ОП – *Ground* зображується як дія сили реакції ОП.

Варто відзначити, що між ланками АКА і ОП не існує механічного зв'язку, а формалізація сили реакції ОП описуються на основі двох факторів:

- удар АКА об ОП;
- сила тертя, що діє між стопами АКА та ОП.

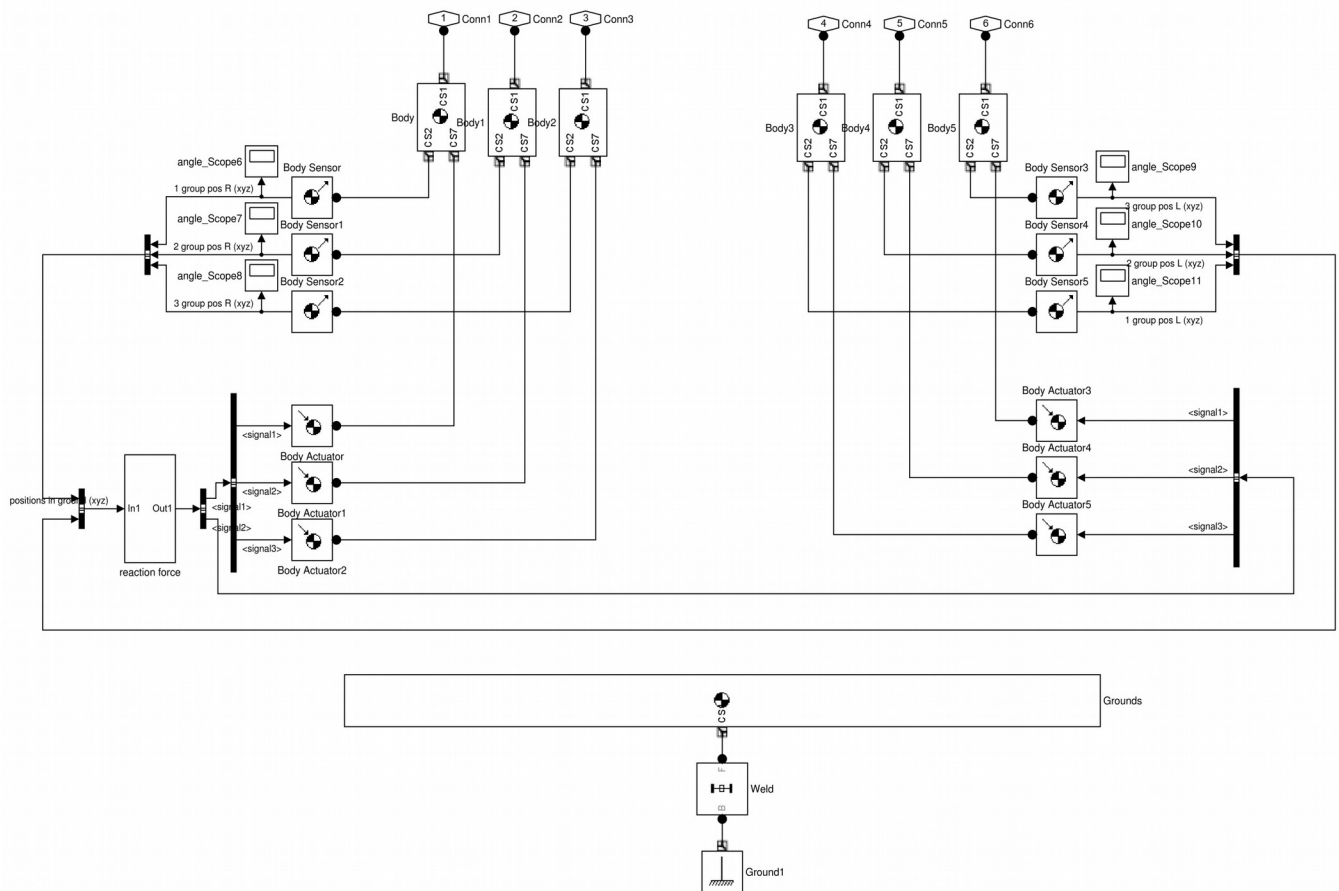


Рисунок 2. 15 - Загальний вигляд моделі ОП та її взаємозв'язок з тензочутливими елементами АКА: *Ground1* — базова точка моделі; *Weld* — жорсткий шарнір; *Grounds* — підсистема імітації довільної ОП; *Body Actuator* — підсистема переміщення ланок апарата; *Reaction Force* — підсистема перерахунку сил реакції ОП; *Body Sensor* — підсистема зчитування поточного положення ланок апарата; *Body* — підсистеми імітації тензочутливих датчиків; *Conn* — порти взаємодії з моделлю АКА

Враховуючи означені фактори, силу реакції ОП в кожній точці на стопі АКА можна описати рівняннями у такому вигляді:

$$N = \frac{K m v^2}{2} + m g, \quad m = m_{as_A} + 2 * (m_{as_B} + m_{as_C} + m_{as_D});$$

$$g=9.81; v=\frac{D*O}{dt}, \quad D=\begin{matrix} f(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f(y) & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & f(z) & 0 & 0 & 0 \end{matrix}, \quad O=\begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix},$$

де $f(x), f(y), f(z)$ – функції, які отримані в результаті перерахунку положення ланки A і визначають поточне положення стоп АКА. Враховуючи те, що параметри $f(y)$ визначають положення екстремумів сили на поверхні тензочутливих елементів $Body, Body[1..5]$, то значення відповідних реакцій N для кожної дискретної комірки тензочутливого елемента визначається за середнім значенням суми екстремумів.

Застосування розробленої комп'ютерної моделі АКА з врахуванням її взаємодії з ОП дає змогу спостерігати та аналізувати поведінку апарата в різних умовах навколишнього середовища при виконанні складних стратегій управління. Інтеграція до складу моделі тензочутливих елементів та моделі ОП дало можливість дослідити процеси взаємодії АКА з ОП, які супроводжуються виникненням таких факторів:

- прямолінійне переміщення стопи дотичною траєкторією до екстремумів рельєфу на ОП;
- кутове переміщення стопи дотичною траєкторією до екстремумів на ОП;
- удар стопи АКА об ОП.

Такі структурні та функціональні особливості побудованої моделі АКА дають змогу застосовувати її для дослідження процесів управління усталеним рухом АКА, його рівновагою тощо. Побудована модель, яка налічує повний антропоморфний набір ланок може бути використана в задачах дослідження руху АКА, в тому числі, на різних типах ОП.

Застосування програмних засобів *MatLab Simulink* для побудови комп'ютерної моделі АКА передбачає її використання для побудови структурних об'єднань *HIL* та *PIL* при вирішенні задач розробки СУ АКА.

2.4. Висновки до розділу

За другим розділом дисертаційної роботи можна зробити такі висновки:

1. Проведено порівняльний аналіз методів синтезу моделей АКА та обраний і обґрунтований для дисертаційних досліджень модифікований метод комп'ютерного моделювання механічної системи твердих тіл, що включає аналітичні методи опису кінематики і динаміки апарата, імітаційні методи опису взаємодії його ланок з довільною ОП та біологічні основи побудови кінематичної схеми апарата. Це дало змогу урахувати сили і моменти, які виникають між АКА та ОП у його статичних і динамічних фазах руху. Виявлено, що для збереження усталеного руху апарата у його статичних фазах достатньо урахувати характер розподілу сил натиску та реакції ОП. Встановлено, що втрата стійкості АКА на довільній ОП супроводжується виникненням моменту між стопою апарата і ОП, до того ж напрям моменту співпадатиме з напрямом утрати стійкості і є пропорційним за величиною прискоренню падіння апарата.
2. З урахуванням біологічних принципів розташування ланок АКА та беручи до уваги обмеження, що накладає на рух апарата його взаємодія з ОП, розроблена узагальнена модель кінематики АКА, яка описує положення його базової точки як точки на стопі. Це дало змогу розрахувати положення кожної з ланок АКА базуючись на характері взаємодії АКА з ОП, а не на положенні його ТЦМ, як це прийнято у класичних підходах до побудови кінематичних систем твердих тіл.
3. З урахуванням взаємодії апарата з ОП за характером розподілу сил натиску і реакції ОП записано рівняння Лагранжа для диференціальних рівнянь другого роду. Це дало змогу сформулювати аналітичну модель динамічної поведінки АКА, яка урахує дві похідні від положення ТЦМ АКА, а також описує його взаємодію з ОП у вигляді матриці Якобі. Це, у свою чергу, дало змогу дослідити чинники взаємодії АКА з ОП і встановити гранично-допустимі значення моментів і сил реакцій ОП, при яких АКА залишається стійким.
4. Проведено структурний синтез комп'ютерної моделі АКА, за результатами

якого побудовано структурно-функціональну модель кінематичних зв'язків і динамічної поведінки АКА, яка дозволяє одночасно враховувати взаємодію ланок апарата з довільною ОП та забезпечувати спостережуваність зміни кутового та лінійного положення ланок апарата.

РОЗДІЛ 3. КРИТЕРІЇ УСТАЛЕНОГО РУХУ ТА ЗАВАЛУ АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТУ НА ДОВІЛЬНІЙ ОПОРНІЙ ПОВЕРХНІ ЗА ДАНИМИ ПРО СИЛУ РЕАКЦІЇ ОПОРИ

У розділі описана взаємозалежність між положенням ланок АКА й ТЦМ, визначена залежність між просторовим положенням ТЦМ і його проекцією на ОП. Вперше описаний процес пошуку ТПЦМ на довільній і нерівній ОП за даними про розподіл сили реакції ОП. Додатково вирішені проблеми: відновлення стійкості апарата після його завалу у результаті виходу ТПЦМ за межі опори; пошуку оптимального стану рівноваги для збереження ним рівноваги.

На основі розроблених методів і математичних описів розроблено структурну схему СУ дотримання стійкості та рівноваги АКА. Основні рішення та математичні описи, що розроблені у розділі апробовані на динамічній комп'ютерній моделі апарата.

3. 1. Опис критеріїв та структури СУ усталеним рухом АКА за даними про розподіл сили реакції ОП

3. 1. 1. Концепція усталеного руху антропоморфного крокуючого апарата за критеріями розподілу сили реакції опорної поверхні

Під час дотримання певного статичного положення, або при його переміщенні відносно опорної поверхні (ОП), крокуючий апарат прикладає до поверхні силу, яка залежить від маси апарата, його швидкості та пружних характеристик ОП [12, 29, 165]. Зважаючи на те, що сила виникає внаслідок контакту АКА до ОП, ефект від контакту спостерігається лише в області спільного дотику, тобто у межах стоп АКА [7, 165]. Відповідно до того, що АКА не проникає у ОП, а залишається на її поверхні, слідує, що ОП діє на стопи АКА тотожними за величиною та протилежними за спрямуванням силами реакції ОП [15].

Так, у випадку, якщо ОП має однорідну пружність, для визначена у вигляді площини, що перпендикулярна до вектора гравітації, то сила реакції ОП у всіх точках дотику до стоп буде рівномірною [57, 59, 62]. Це твердження буде

виконуватись і у випадку, коли просторова позиція ланок апарата проектує його ТПЦМ у точку, яка співпадатиме з геометричним центром стоп апарата, а сам апарат залишається у стані спокою (моменти у ланках апарата дорівнюють нулю) [16, 59, 62, 65]. Такий випадок можна назвати ідеальним станом статичної рівноваги крокуючого апарата [49, 76, 112].

Загалом усталений рух залишатиметься стійким і не потребуватиме управління, доки зберігатимуться відповідні передумови [4, 17, 25, 31, 62, 137, 141]:

- опорна поверхня буде однорідною та плоскою;
- точка центру мас АКА проектується у геометричний центр стоп апарата;
- на апарат і його ланки не діють внутрішні та зовнішні сили, або сума сил, які розглянуті у рівняннях Ньютона-Ейлера [59] дорівнює нулю.

Якщо зазначені передумови не виконуються, то усталений рух апарата буде порушеним [52, 68].

Відповідно до виникнення, чи порушення умов усталеного руху, АКА може знаходитись в одній з чотирьох ситуацій:

- апарат знаходиться у рівновазі;
- апарат знаходиться в усталеній позиції;
- апарат завалюється з можливістю відновлення усталеного положення;
- апарат завалюється без можливості відновлення усталеного положення.

Ситуація, коли апарат знаходиться у рівноваги описана вище. Інша ситуація, коли апарат знаходиться в усталеному положенні, виникає, у випадку коли точка проєкції центру мас (ТПЦМ) АКА знаходиться у межах контура його стоп [11, 67, 136, 137, 172]. В ситуації завалу апарата з подальшою можливістю відновлення стійкості, ТПЦМ АКА знаходиться за межами стоп апарата, але передумови положення ланок апарата дають змогу перемістити ТПЦМ у межі контуру стоп [61, 65, 87, 136, 137, 154, 162]. Натомість, у ситуації завалу апарата без можливості відновлення стійкості, ТПЦМ АКА знаходиться далеко за межами контуру його стоп, а передумови положення ланок і відповідних моментів несприятливі для відновлення його рівноваги. У цій ситуації збереження стійкості можливе лише за рахунок зміни опорної фази АКА [4, 9, 25, 32, 94, 92, 93, 154].

Описані ситуації дотримання рівноваги та стійкості АКА виконуються і для випадку розташування АКА на довільній ОП (характер невизначеності стосується рельєфу та пружності і не стосується проковзування АКА вздовж ОП). Проте використання описаних принципів стійкості та рівноваги АКА для випадку довільної ОП потребує додаткової формалізації процесу моніторингу розподілу сили реакції ОП [2, 48, 86].

3. 1. 2. Умови порушення усталеного руху АКА на довільній ОП у його статичних положеннях

Порушення рівноваги або стійкості АКА на довільній ОП відбувається у результаті дії таких факторів:

1. Наявність рельєфності на ОП у області дотику поверхні до стоп АКА;
2. Неоднорідність пружності ОП у області дотику до стоп АКА;
3. Виникнення проковзування стопи АКА вздовж ОП;
4. Некерована зміна кутових параметрів кінематичних пар АКА;
5. Передумови просторового положення АКА не відповідають умовам стійкості;

Аналіз рельєфу та пружності ОП за даним про силу реакції ОП. Для уникнення негативних наслідків, що можуть бути спричинені факторами (1–2) пропонується виконувати моніторинг та корекцію положення кінематичних пар апарата, таким чином, задаючи нове оптимальне розташування ТЦМ замкненої системи (без врахування зовнішніх чинників) АКА [61 - 65, 136, 137]. Зважаючи на наявний взаємозв'язок між положенням ТЦМ, координатами ТПЦМ, напрямом вектору гравітації та розподілом сили реакції ОП на дотичні стопи АКА вперше запропоновано застосувати моніторинг і аналіз розподілу сили реакції ОП у якості критерію для визначення місцезнаходження ТПЦМ АКА на ОП [136]. Також, аналіз інформації розподілу сили реакції ОП дає змогу визначити наявність та положення на поверхні екстремумів рельєфу (фактор 1) та класифікувати пружність дотичної до ланок АКА поверхні (фактор 2) [5, 6, 62].

Аналіз проковзування стопи АКА по ОП за інформацією з інерційних датчиків. Для уникнення негативних наслідків, що супроводжуються виникненням фактору 3,

у роботі запропоновано відстеження некерованих кутових прискорень ланок стоп АКА. Отримання інформації про такі прискорення можливе із застосуванням інерційних гіроскопічних датчиків [13, 37, 43].

Аналіз самовільного складання ланок АКА за допомогою розподіленої регулюючої системи управління. Для запобігання втрати стійкості АКА внаслідок дії фактору 4 до складу СУ АКА інтегровано систему регуляторів з пропорційною і диференційною складовими та відповідною сенсорною системою, здатною здійснювати моніторинг зміни кутів кінематичних пар [20, 29, 45, 166]. Зважаючи на складну структуру об'єкта управління, вперше застосовано розподілену регулюючу систему положення ТЦМ АКА для досягнення заданої траєкторії її руху. Для вирішення цієї задачі вперше застосовано метод зворотної задачі кінематики із використанням *ANFIS*.

Аналіз передумов стійкості АКА за початковими значеннями його просторового положення. Антропоморфний крокуючий апарат втрачає стійке положення за фактором 5, якщо на момент початку управління не виконуються умови його стійкості. У роботі вперше запропоновано використання таких умов:

- Розподіл сили реакції ОП на всю поверхню стопи АКА – однорідний. При цьому кутові швидкості кінематичних пар прямують до нуля.
- Розподіл сили реакції ОП однорідно зосереджений у групі точок-екстремумів. При цьому кутові швидкості кінематичних пар прямують до нуля.
- Розподіл сили реакції ОП зосереджено вздовж однієї лінії по контуру стоп (стопи). При цьому кутова швидкість кінематичних пар не нульова і ТЦМ АКА переміщується до протилежної лінії на контурі стоп (стопи) АКА.

3. 1. 3. Умови дотримання оптимального положення АКА для забезпечення його стійкості на ОП

Положення АКА на ОП з найбільшим запасом стійкості – це таке положення апарата, яке забезпечує збереження його рухомої фази при однорідному розподілі сили реакції ОП по всій області дотику ланок АКА до ОП [4, 25, 62, 142].

Тоді стійке положення АКА зберігатиметься у випадку, якщо сила реакції

задовольнятиме умові $R_{Ay} > 0$, де значення R_{Ay} визначається рівнянням:

$$R_{Ay} = a\ddot{\psi} \cos(\psi) - B\ddot{\varphi}_1 \sin(\varphi_1) - \\ - C\ddot{\varphi}_2 \sin(\varphi_2) - a\dot{\psi} \sin(\psi) - B\dot{\varphi}_1^2 \cos(\varphi_1) - C\dot{\varphi}_2^2 \cos(\varphi_2) + (m_1 + m_2)g.$$

А положення ТЦМ АКА задається його прискоренням:

$$a_{sx} = -a\ddot{\psi} \sin(\psi) - B\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1) - C\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2) - a\dot{\psi} \cos(\psi) + B\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1) + C\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2),$$

де:

$$B = \frac{m_1 r_1 + m_2 l_1}{m_1 + m_2}; \quad C = \frac{m_2 r_2}{m_1 + m_2},$$

і виконується у випадку, якщо $a_{sx} > 0$.

Тоді контур стійкого положення АКА на ОП може бути визначений областю стопи:

$$\begin{matrix} a_{sx} \\ R_{Ay} \end{matrix} = \begin{pmatrix} -a & -B & -C \\ a & -B & -C \end{pmatrix} M^{-1} (b + UT)$$

де a_{sx} і R_{Ay} подані лінеаризованою формою параметрів T_1, T_2 , які задають відповідні крутні моменти стопи (рис. 3. 1.):

$$Me = b + UT; \quad e = \begin{pmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{pmatrix}; \quad UT = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix}$$

Якщо положення ТЦМ не задовольняють зазначених умов, АКА втрачає усталеність свого руху.

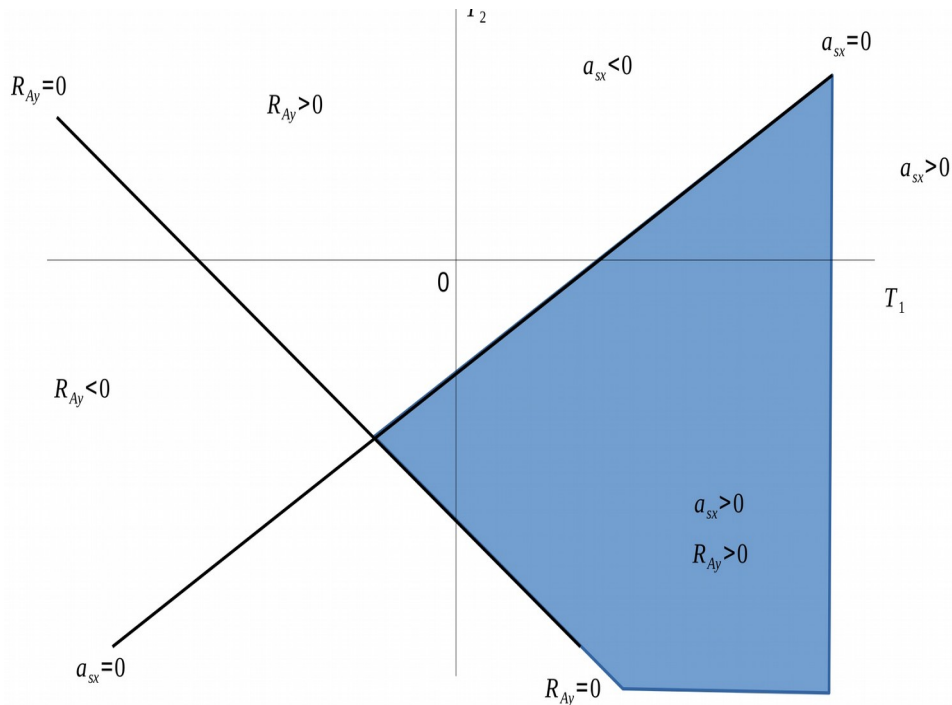


Рисунок 3. 1 - Рівномірний розподіл сили реакції ОП на дотичні ланки АКА:
 R_{Ay} – сила реакції ОП; a_{sx} – лінія розмежування чутливих зон стопи; T_1, T_2 – осьові лінії

3. 1. 4. Структурна схема СУ дотримання стійкості АКА з застосуванням запропонованих критеріїв стійкості

Для дотримання усталеного руху АКА на довільній ОП використовується системний підхід до моніторингу впливу факторів “втрати стійкості” та формування відповідного керуючого впливу на кінематичні пари апарата. У основу даного підходу покладено ієрархічну та розподілену структури системи управління АКА (СУ АКА).

Забезпечення ієрархічності структури СУ АКА полягає у необхідності виконання системою таких етапів:

1. Встановлення закономірності виникнення факторів “втрати стійкості” апарата один від одного;
2. Виконання умов позиціювання ТЦМ АКА для уникнення “втрати стійкості” шляхом виключення менш залежних факторів управління усталеним рухом апарата;
3. Забезпечення можливості порушення факторів, якщо надходять відповідні директиви з СУ.

Забезпечення розподіленості структури СУ АКА полягає у необхідності

одночасного виконання таких етапів [31, 46]:

1. Дотримання самодостатніх (простих) факторів “втрати рівноваги”;
2. Поруху умов втрати стійкості АКА, якщо такі умови санкційовані системою управління.

Стійкість апарата забезпечується шляхом роботи розподіленої ієрархічної СУ, а його рух у статичних та динамічних режимах забезпечується одночасним аналізом та контролем над виникненням всіх перерахованих факторів “втрати стійкості” [27, 46, 121, 110]. Для забезпечення контролю за цими факторами розроблена багат шарова модель апарата і відповідна СУ дотриманням усталеного руху.

Зокрема система є активною, якщо вона контролювана та дає змогу змінювати положення АКА шляхом зміни значень параметрів вектора-стану апарата [4, 55, 75, 129]. Натомість система є пасивною, якщо вона входить до складу СУ АКА, формалізована подана у його моделі та виконує задачу підтримання заданого положення АКА із врахуванням [4, 55, 130] :

1. Зовнішніх факторів впливу на апарат;
2. Дії інших внутрішніх факторів, які не спричинені зміною параметрів у векторі-стану АКА.

У загальному вигляді чинники впливу та залежності блоків систем активного та пасивного характерів показані на рис 3. 2. Також на даному рисунку показані канали взаємодії між блоками систем АКА. Так, блоки “Зміна кута кінематичної схеми 1-12” формують значення обертових моментів $c11$ для управління “виконавчими органами АКА”. Вхідними параметрами блоків $c10$ є значення різниці кутів між поточними та новим положеннями ланок АКА. Значення різниці кутів $C10$ надходять до блоку “Зміна кута кінематичної пари”. Вхідні параметри до блоків “Зміна кута кінематичної пари” надходять з блоку “Пошук відхилення векторів-станів”. Різниця між кутами визначається шляхом порівняння пар параметрів у різні моменти часу. Блоки “Формування вектора-стану” та “Формування нового вектора-стану” задають два вектори-станів АКА, які визначаються у два моменти часу – поточний та новий. Вектори станів складаються з дванадцяти кутових параметрів кінематичних пар та трьох координат ТЦМ АКА.

Для формування нового вектора-стану до відповідного блоку надходять координати нового положення ТЦМ $C1$ з блоку “ТЦМ” та параметри кутів у кінематичних пар $C9$, що надходять з блоку “Перерахунок кінематичних пар АКА”. Натомість блок “Формування вектора стану” містить поточні параметри стану АКА і формується за рахунок даних про кути кінематичних пар $C2$, які надходять до нього з блоку “Кінематичні пари” і даних про положення ТЦМ на поточний момент часу $C3$, які надходять з блоку “Пошук ТЦМ АКА”. У свою чергу блок “Перерахунок кінематичних пар” отримує вхідні параметри у вигляді координат положення ТПЦМ на ОП $C7$, які надходять до нього з блоку “Пошук ТПЦМ та екстремумів”.

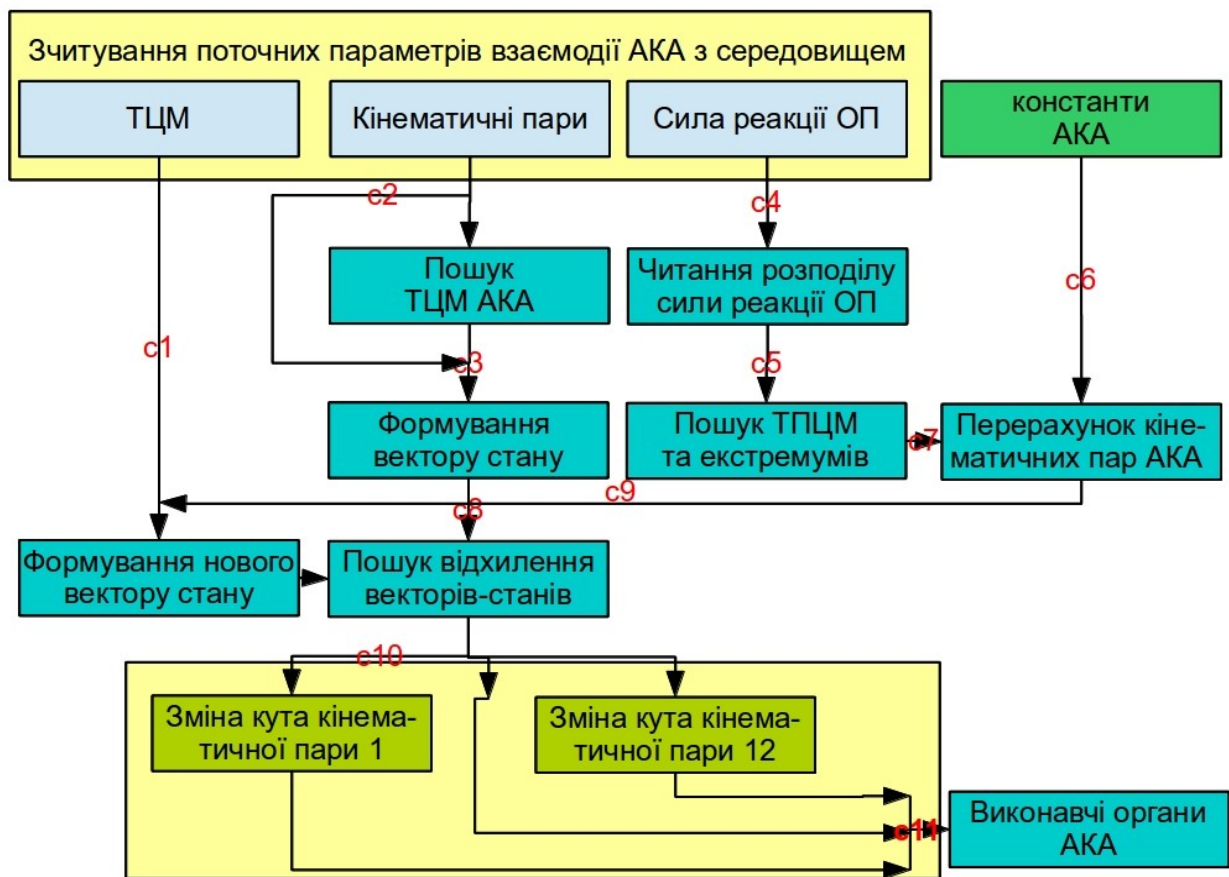


Рисунок 3.2 - Структурна схема інформаційних потоків СУ стійкості АКА:
 $C1-C11$ — інформаційні канали між блоками підсистем АКА.

Тоді, блок “Пошук ТЦМ АКА” отримує на вхід параметри кутового положення ланок АКА $C2$ з блоку “Кінематичні пари”. Формування вхідних параметрів до блоку “Пошук ТПЦМ та екстремумів” здійснюється у блоці “Читання розподілу сили реакції ОП”, який містить підсистеми взаємодії з сенсорною системою стопи

АКА. Блок “Константи АКА” містить параметри довжин ланок апарата застосовується у всіх блоках СУ АКА.

Робота блоків “Зміна кута кінематичної пари”, “Формування відхилення векторів-стану”, “Формування нового вектору-стану” та “Формування вектору-стану” передбачає надання їм вхідних параметрів, які нагромаджуються поступово у процесі функціонування АКА, зокрема під час його взаємодії з ОП. Тож нагромадження цих даних, задекларовано в інформаційних каналах *C1-C11*.

Згідно з факторами порушення усталеного руху АКА процес дотримання стійкого положення АКА потребує одночасної роботи всіх блоків СУ, загальна структура якої показана на рис. 3. 2 [63, 138]. Беручи до уваги той факт, що деякі з описаних блоків використовують параметри, які визначені у різних часових проміжках роботи системи, то стає очевидним, що поведінка системи характеризується математичним запізнюванням управління, а її будова потребує ієрархічності та розподільності [136, 137, 174].

3. 2. Формалізація процесу управління антропоморфним крокуючим апаратом за критеріями розподілу сили реакції опорної поверхні

У відповідності до структури СУ, яку подано на рис. 3. 2, процес дотримання усталеного руху, як один з функціоналів загальної СУ АКА на ОП із застосуванням описаних критеріїв передбачає вирішення ряду додаткових задач, а саме:

- формалізації процесу пошуку місцезнаходження ТЦМ АКА в залежності від стану кінематичних пар апарата, який реалізується блоком “Пошук ТЦМ АКА” (рис. 3.2) [61, 65];
- формалізації процесу визначення місцезнаходження ТПЦМ АКА в залежності від положення його ТЦМ, що забезпечує блок “Пошук ТПЦМ та екстремумів” [61, 62, 64, 65, 71];
- формалізації процесу визначення місцезнаходження ТПЦМ АКА в залежності від розподілу сили реакції ОП, що реалізується блоками “Пошук ТПЦМ та екстремумів”, “Пошук відхилення вектору-стану” та “Читання розподілу сили реакції ОП” [65, 172];

- визначенню та формалізовано граничного положення ТПЦМ АКА, при якому збігається стійкість апарата, що реалізується у блоці: “Формування нового вектору-стану” [64, 172];
- формалізація процесу пошуку параметрів АКА, при яких його стійкість буде найвищою та матиме максимальний запас, що реалізується блоками: “Формування нового вектору-стану” і “Перерахунок кінематичних пар АКА” [64, 65, 172];
- формалізації передумов, при яких АКА здатний відновити стійкий стан, що застосовується блоками: “Формування нового вектору-стану” і “Перерахунок кінематичних пар АКА” [64, 65].

Вирішення цих задач дасть змогу синтезувати відповідну СУ, яка забезпечує дотримання усталеного руху апарата і базується на розроблених критеріях [61 65, 172].

3. 2. 1. Формалізація процесу визначення місцезнаходження поточної ТЦМ замкненої механічної системи АКА

Формалізація процесу управління усталеним рухом АКА передбачає формування його поточного вектору-стану з метою його подальшого порівняння з новим – оптимальним вектором-стану [29, 161, 172]. Такий поточний вектор містить базові параметри АКА, які однозначно зображають його просторове положення, а саме – кути кінематичних пар [29, 63, 136]. Інші параметри, що описують просторове положення апарата визначаються з кутів шляхом математичних перетворень [4, 25, 152, 178]. Тоді, у загальному випадку, вектор стану апарата задається так: $y_t = [\alpha_r^x, \alpha_r^y, \alpha_r^z, \alpha_l^x, \alpha_l^y, \alpha_l^z, \beta_r^z, \beta_l^z, \gamma_r^y, \gamma_r^z, \gamma_l^y, \gamma_l^z]$, де $\alpha_{[r,l]}$ – кути між корпусом та бедрами; $\beta_{[r,l]}$ – кути між бедрами та гомілками; $\gamma_{[r,l]}$ – кути між гомілками та стопами. Вектор y_t не описує характеристики взаємодії АКА з середовищем бо є виключно вектором стану самого апарата. Також цей вектор не містить динамічних параметрів, тому що є величиною визначеною у часі і характеризує АКА лише у певний момент часу t , як це показано на рис. 3. 3 [61, 63, 137].

Параметри кутів кінематичних пар, що входять до поточного вектору-стану задаються до СУ усталеним рухом АКА із СУ АКА. Ці параметри змінюватимуться у процесі роботи СУ і надходитимуть до вектору-стану АКА за допомогою системи зворотнього зв'язку апарата [29, 101, 136, 172].

Базуючись на описаних критеріях усталеного руху АКА, важливою характеристикою стійкості АКА є розташування ТЦМ апарата, що залежить від кінематичного його стану і масо-габаритних характеристик ланок [138].

Зважаючи на конструктивні особливості АКА, до складу якого входить низка ланок пов'язаних шарнірами з відповідними актуаторами та сенсорами поточного кута та кутової швидкості, на них накладені обмеження по руху (рис. 3. 3) [172].

Згідно з рис. 3. 3, для визначення місцезнаходження ТЦМ АКА задається базова система координат АКА з точкою початку координат, що співпадає з вершиною ланки A . У випадку, якщо маса корпусу значно перевищує маси ланок опор АКА, ТЦМ АКА співпадає з координатами точки m_A , проте, в даному випадку з важкими ланками опор (мають масову характеристику) положення ТЦМ описується виходячи з кутів кінематичних пар АКА, у що задані у кінематичній моделі апарата та формалізовані рівняннями 2. 3 - 2. 22.

На прикладі кінематичної моделі семиланкового АКА, зображеної на рис. 2. 5. точки центрів мас ланок розташовані на відстанях d_i від перших шарнірів цих ланок (подібно до того, як це подано у рівнянні (2. 12)). Тоді положення ТЦМ кожної з ланок відносно перших шарнірів буде описано із застосування методу направляючих косинусів так:

$$\begin{aligned}x &= d * \cos(\delta_x); \\ y &= d * \sin(\delta_y); \\ z &= d * \sin(\delta_z),\end{aligned}\tag{3.1}$$

де: $[x, y, z]$ – координати ТЦМ розглянутої ланки; d – відстань від першого шарніра ланки до її ТЦМ; δ – кут між ортом системи координат і ланкою, яка розглядається [65, 136]. Отже, координати ТЦМ ланок $A, B_i, C_i, D_i, i=[1..2]$, що

наведені на рис. 3. 2 задаються так:

$$\begin{aligned}
 mass\ x_A &= d_A * \cos(\alpha_x); \\
 mass\ y_A &= d_A * \sin(\alpha_x); \\
 mass\ z_A &= d_A * \sin(\alpha_z); \\
 mass\ x_B &= [l_A * \cos(\alpha_x)] + [d_{B_i} * \cos(\beta_x + \alpha_x)]; \\
 mass\ y_B &= [l_A * \sin(\alpha_x)] + [d_{B_i} * \sin(\beta_x + \alpha_x)]; \\
 mass\ z_B &= [l_A * \sin(\alpha_z)] + [d_{B_i} * \sin(\gamma_z + \alpha_z)]; \\
 mass\ x_C &= [l_A * \cos(\alpha_x)] + [l_B * \cos(\beta_x + \alpha_x)] + [d_C * \cos(\gamma_x)]; \\
 mass\ y_C &= [l_A * \sin(\alpha_x)] + [l_B * \sin(\beta_x + \alpha_x)] + [d_C * \sin(\gamma_x)]; \\
 mass\ z_C &= [l_A * \sin(\alpha_z)] + [l_B * \sin(\beta_z + \alpha_z)] + [d_C * \sin(\gamma_z)]; \\
 mass\ x_D &= [l_A * \cos(\alpha_x)] + \\
 &+ [l_B * \cos(\beta_x + \alpha_x)] + [l_C * \cos(\gamma_x + \beta_x + \alpha_x)] + [d_D * \cos(\eta_x)]; \\
 mass\ y_D &= [l_A * \sin(\alpha_x)] + \\
 &+ [l_B * \sin(\beta_x + \alpha_x)] + [l_C * \sin(\gamma_x + \beta_x + \alpha_x)] + \\
 &+ [d_D * \cos(\eta_x)]; \\
 mass\ z_D &= [l_A * \sin(\alpha_z)] + [l_B * \sin(\beta_z + \alpha_z)] + \\
 &+ [l_C * \sin(\gamma_z + \beta_z + \alpha_z)] + [d_D * \sin(\eta_z)],
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

де позначення кутів та довжин відповідають тим, що застосовувалися у рівняннях 3. 2.

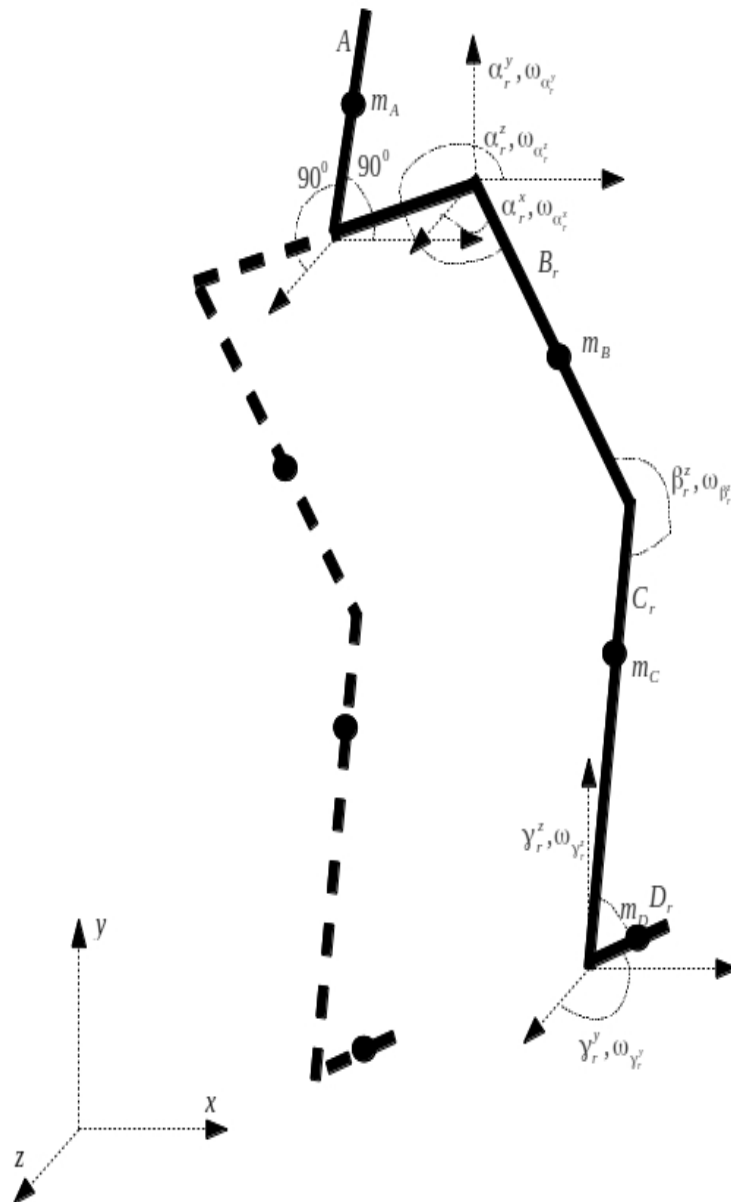


Рисунок 3.3 - Загальна система зв'язків семиланкового АКА у тримірному просторі: A, B, C, D - ланки; $\alpha_r^x, \alpha_r^y, \alpha_r^z$ - кути пульпового шарніру у площинах X, Y, Z ; β_r^z - кут у колінному шарнірі; γ_r^y, γ_r^z - кути гомілки у площинах Y, Z ; m_A, m_B, m_C, m_D - маси ланок АКА; $\omega_{\alpha_r^x}, \omega_{\alpha_r^y}, \omega_{\alpha_r^z}$ - моменти у пульповому шарнірі; $\omega_{\beta_r^z}$ - момент у колінному шарнірі; $\omega_{\gamma_r^y}, \omega_{\gamma_r^z}$ - моменти у гомілковому шарнірі

Тоді положення ТЦМ АКА задається відповідно до розташування ТЦМ його ланок та їх масами і буде мати такий вигляд:

$$M_{A, B, C, D} = \frac{\sum_j m_j \vec{r}_j}{\sum_j m_j}, \quad (3.3)$$

де: m_j – маса ланки j , ($j=[A, B, C, D]$); \vec{r}_j – відстань від точки початку координат до ТЦМ ланки j . Опис положення ТЦМ АКА відповідно до положення його ланок, які задані рівняннями 3.2 може бути представлений у вигляді параметрів m_j, \vec{r}_j (табл. 3.1), де параметри \vec{r}_j формуються трійками координат $[x, y, z]$ визначеними у рівняннях 3.2 [17, 29, 61, 138].

Таблиця 3.1.

Положення ТЦМ АКА відповідно до положення ланок апарата

ID ланки параметри	m_j	
A	m_A	$\vec{r}_A = [mass\ x_A, mass\ y_A, mass\ z_A]$
B_1	m_B	$\vec{r}_B = [mass\ x_{B1}, mass\ y_{B1}, mass\ z_{B1}]$
B_2	m_B	$\vec{r}_B = [mass\ x_{B2}, mass\ y_{B2}, mass\ z_{B2}]$
C_1	m_C	$\vec{r}_C = [mass\ x_{C1}, mass\ y_{C1}, mass\ z_{C1}]$
C_2	m_C	$\vec{r}_C = [mass\ x_{C2}, mass\ y_{C2}, mass\ z_{C2}]$
D_1	m_D	$\vec{r}_D = [mass\ x_{D1}, mass\ y_{D1}, mass\ z_{D1}]$
D_2	m_D	$\vec{r}_D = [mass\ x_{D2}, mass\ y_{D2}, mass\ z_{D2}]$

Положення ТЦМ АКА подається у вигляді трьох проекцій на відповідні площини x, y, z :

$$\begin{aligned}
 M_{A, B_1, C_1, D_1}^{\vec{x}} &= \frac{\sum_j m_j [\vec{r}_j \times [1, 0, 0]^T]}{\sum_j m_j}, \\
 M_{A, B_1, C_1, D_1}^{\vec{y}} &= \frac{\sum_j m_j [\vec{r}_j \times [0, 1, 0]^T]}{\sum_j m_j}, \\
 M_{A, B_1, C_1, D_1}^{\vec{z}} &= \frac{\sum_j m_j [\vec{r}_j \times [0, 0, 1]^T]}{\sum_j m_j}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

в загальному вигляді представляється так:

$$M_{A,B_i,C_i,D_i}^{\rightarrow} = [M_{A,B_i,C_i,D_i}^{\rightarrow x}, M_{A,B_i,C_i,D_i}^{\rightarrow y}, M_{A,B_i,C_i,D_i}^{\rightarrow z}]. \quad (3.5)$$

Розрахунок положення ТЦМ АКА за допомогою рівнянь 3.2 - 3.5 визначає його положення відносно початково заданої точки простору – базової точки АКА. Для визначення положення базової точки АКА застосовується інерційна система зворотнього зв'язку, що формується шляхом застосуванням гіроскопів та акселерометрів [29, 61, 82, 136, 137, 171, 172].

Слід відмітити, що практичне положення ТЦМ АКА на основі базової точки АКА (рівняння 3.2 - 3.5) можна отримати лише під час розгляду руху апарата прямою та однорідною ОП, без наявних екстремумів та без динамічної складової руху апарата [61, 62].

Натомість, для визначення положення ТЦМ АКА на довільній ОП, базову точку з координатами (0,0,0) обирають на одній з дотичних до поверхні ланок апарата і описують згідно з положенням ТЦМ кожної ланки відносно дотичної до ОП точки та положенням ТЦМ АКА, що визначено рівняннями 3.4 та 3.5:

$$\begin{aligned} mass\ x_D &= x_0 + ((l_D - d_D) * \cos(\delta_x)); \\ mass\ y_D &= y_0 - ((l_D - d_D) * \sin(\delta_x)); \\ mass\ z_D &= z_0 + ((l_D - d_D) * \sin(\delta_z)); \\ \\ mass\ x_C &= x_D - ((l_C - d_C) * \cos(\delta_x - \eta_x)); \\ mass\ y_C &= y_D - ((l_C - d_C) * \sin(\delta_x - \eta_x)); \\ mass\ z_C &= z_D - ((l_C - d_C) * \sin(\delta_z - \eta_z)); \\ \\ mass\ x_B &= x_C + ((l_B - d_B) * \cos(\delta_x - \eta_x - \beta_x)); \\ mass\ y_B &= y_C + ((l_B - d_B) * \sin(\delta_x - \eta_x - \beta_x)); \\ mass\ z_B &= z_C + ((l_B - d_B) * \sin(\delta_z - \eta_z - \beta_z)); \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$mass\ x_A = x_B + ((l_A - d_A) * \cos(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x));$$

$$mass\ y_A = y_B + ((l_A - d_A) * \sin(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x));$$

$$mass\ z_A = z_B + ((l_A - d_A) * \sin(\delta_z - \eta_z - \beta_z - \alpha_z));$$

де: s_D – довжина відрізка від кінця стопи до дотичної з ОП точкою; x_0, y_0, z_0 – координати дотичної точки ланки D до ОП.

Всі інші параметри кутів, ланок, ТЦМ ланок і АКА наведені на рис. 3. 1. В той же час положення шарнірів ланок апарата задається рівняннями:

$$x_D = x_0 + (l_D * \cos(\delta_x));$$

$$y_D = y_0 - (l_D * \sin(\delta_x));$$

$$z_D = z_0 + (l_D * \sin(\delta_z));$$

$$x_C = x_D - (l_C * \cos(\delta_x - \eta_x));$$

$$y_C = y_D - (l_C * \sin(\delta_x - \eta_x));$$

$$z_C = z_D - (l_C * \sin(\delta_z - \eta_z));$$

$$x_B = x_C + (l_B * \cos(\delta_x - \eta_x - \beta_x));$$

$$y_B = y_C + (l_B * \sin(\delta_x - \eta_x - \beta_x)); \quad (3.7)$$

$$z_B = z_C + (l_B * \sin(\delta_z - \eta_z - \beta_z));$$

$$x_A = x_B + (l_A * \cos(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x));$$

$$y_A = y_B + (l_A * \sin(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x));$$

$$z_A = z_B + (l_A * \sin(\delta_z - \eta_z - \beta_z - \alpha_z));$$

Особливістю залежності розташування ТЦМ АКА від його базової точки є її нелінійна поведінка та вироджуваність, зокрема у певних критичних станах. Так, рівняння 3. 1 - 3. 7 характеризуються нестійкою поведінкою при переміщенні ланок АКА на кути кратні $\frac{\pi}{2}$. Тож для вирішення цієї проблеми вказані рівняння

необхідно представити у вигляді матриць повороту [8, 36, 59, 69, 122, 166]:

$$\begin{aligned}
 x_D &= x_0 r_X(\delta_x), \quad y_D = y_0 r_Y(\delta_x), \quad z_D = z_C r_Z(\delta_z), \\
 x_C &= x_D - r_X(\delta_x - \eta_x), \quad y_C = y_D - r_Y(\delta_x - \eta_x), \quad z_C = z_D - r_Z(\delta_z - \eta_z), \\
 x_B &= x_C + l_B * r_x(\delta_x - \eta_x - \beta_x), \quad y_B = y_C + l_B * r_y(\delta_x - \eta_x - \beta_x), \\
 z_B &= z_C + l_B * r_z(\delta_z - \eta_z - \beta_z), \\
 x_A &= x_B + l_A * r_x(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x), \quad y_A = y_B + l_A * r_y(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x), \\
 z_A &= z_B + l_A * r_z(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x),
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

де:

$$\begin{aligned}
 r_X(a) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(a) & -\sin(a) \\ 0 & \sin(a) & \cos(a) \end{pmatrix}, & r_Y(a) &= \begin{pmatrix} \cos(a) & 0 & \sin(a) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(a) & 0 & \cos(a) \end{pmatrix}, \\
 r_Z(a) &= \begin{pmatrix} \cos(a) & -\sin(a) & 0 \\ \sin(a) & \cos(a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

Для опису положення ТЦМ ланок АКА на рис. 3. 4 показані фазові траєкторії руху ТЦМ ланок АКА у площині x, y . Графік побудовано зі зміною кутових параметрів на крок 0.1 радіан, як це подано у табл. 3.2. Фазові траєкторію руху ТЦМ з кроком 0.01 радіан та відповідний математичний блок рівнянь 3.7 та 3.8 виконаних мовою M і показаних у додатку А у вигляді програмного коду та таблиці.

На рис. 3.4 траєкторії A, B, C, D зображують можливе положення перших шарнірів ланок апарата ($mass\ of(A, B, C, D)$ – показує положення ТЦМ ланок, а $Center\ of\ mass$ вказує на можливе положення ТЦМ АКА).

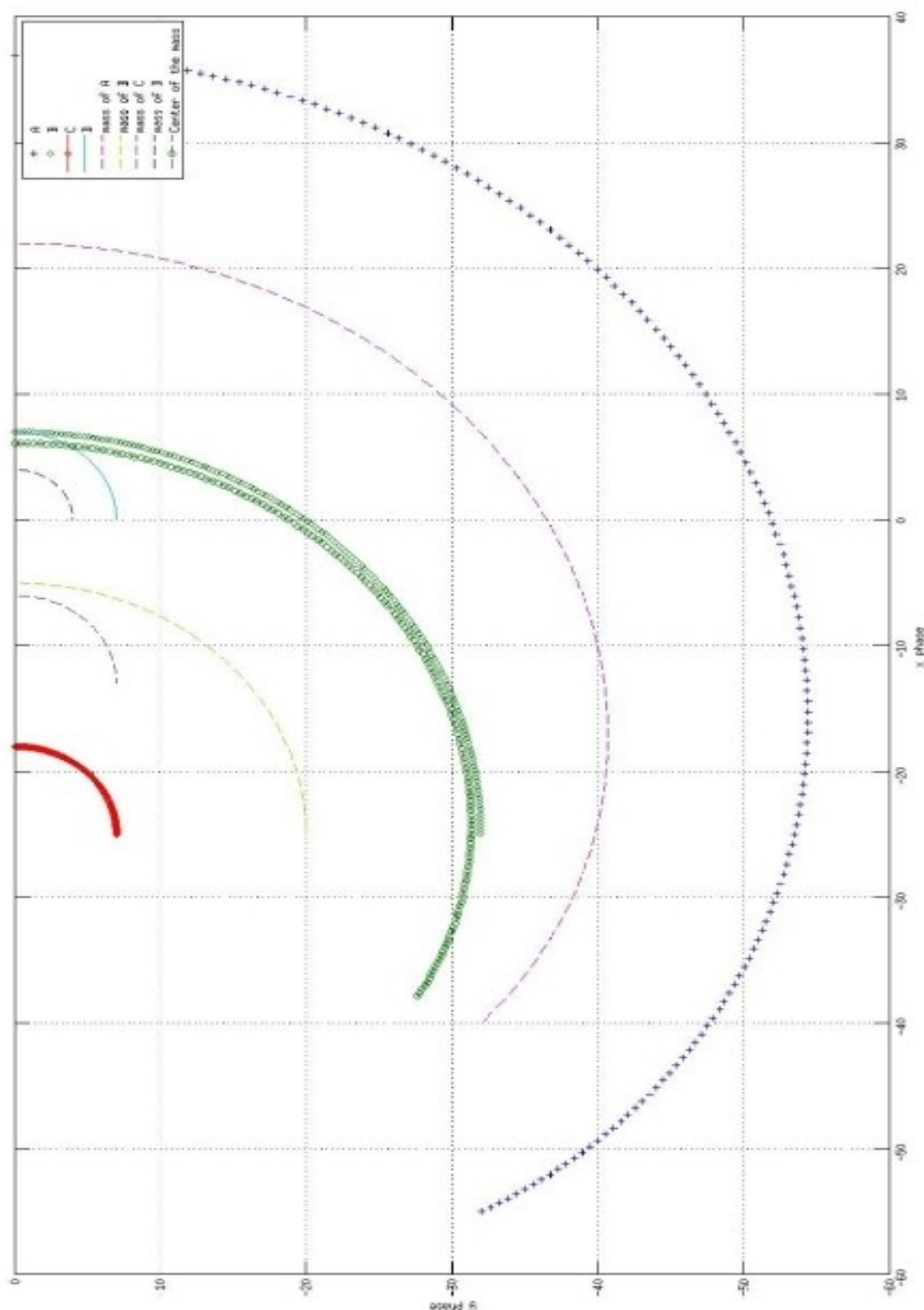


Рисунок 3.4 - Положення ТЦМ АКА у залежності від положення ланок АКА та їх точок центрів мас визначених на двовимірній площині фазового простору: A, B, C, D - траєкторії переміщення ланок АКА; *mass of A, B, C, D* - траєкторії переміщення ТЦМ ланок; *center of mas* — траєкторія переміщення ТЦМ АКА

Залежність розташування ТЦМ АКА від положення його ланок

xA	37	36.992	36.97	36.932	36.878
yA	0	-0.91995	-1.8396	-2.7588	-3.6771
zA	0	-0.77996	-1.5597	-2.3388	-3.1172
xB	7	6.9984	6.9936	6.9856	6.9744
yB	0	-0.31999	-0.63996	-0.95986	-1.2797
zB	0	-0.18	-0.35998	-0.53992	-0.71981
xC	-18	-18	-18.001	-18.003	-18.006
yC	0	-0.069999	-0.13999	-0.20997	-0.27993
zC	0	0.069999	0.13999	0.20997	0.27993
xD	7	6.9997	6.9986	6.9969	6.9944
yD	0	-0.069999	-0.13999	-0.20997	-0.27993
zD	0	0.069999	0.13999	0.20997	0.27993
mass_xA	22	21.995	21.982	21.959	21.926
mass_yA	0	-0.61997	-1.2398	-1.8593	-2.4784
mass_zA	0	-0.47998	-0.95982	-1.4394	-1.9185
mass_xB	-5	-5.001	-5.004	-5.009	-5.016
mass_yB	0	-0.2	-0.39997	-0.59991	-0.79979
mass_zB	0	-0.059999	-0.11999	-0.17997	-0.23994
mass_xC	-6	-6.0003	-6.0014	-6.0031	-6.0056
mass_yC	0	-0.069999	-0.13999	-0.20997	-0.27993
mass_zC	0	0.069999	0.13999	0.20997	0.27993
mass_xD	4	3.9998	3.9992	3.9982	3.9968
mass_yD	0	-0.039999	-0.079995	-0.11998	-0.15996
mass_zD	0	0.039999	0.079995	0.11998	0.15996
comX	6.1273	6.1243	6.1152	6.1001	6.079
comY	0	-0.44017	-0.88024	-1.3201	-1.7597

З рівнянь 3.1-3.8 слідує, що положення ТЦМ не залежить від інших внутрішніх сил, які породжені рухом АКА і може змінюватися лише завдяки виникненню зовнішніх чинників, які мають динамічну складову.

Для забезпечення стійкості АКА на ОП довільного рельєфу запропоновано застосування інформації про положення точки проекції центру мас (ТПЦМ) апарата на ОП. На відміну від інформації про положення ТЦМ, положення ТПЦМ характеризує стан стійкості апарата на анапріорній ОП [25, 38, 59].

Згідно з даними табл. 3.2, додатку А та рис. 3.4, положення ТЦМ АКА знаходиться в області, яка залежить від положення ланок апарата та може бути побудована на основі масиву координат $[comX, comZ]$ ТЦМ АКА.

3. 2. 2. Формалізація процесу визначення координат ТПЦМ на площині стопи АКА за даними про розподіл сили реакції ОП

Проекціювання ТЦМ на ОП спостерігається внаслідок дії на багатоланкову систему АКА групи зовнішніх сил, зокрема – гравітації [29, 62]. Під дією цих сил маса АКА діє на дотичну поверхню через свою вагу. Під впливом ваги апарата дотичні ланки стоп розташовуються у дотичній до екстремумів на ОП площині (Рис. 3. 6) [22]. Тоді, як маса АКА під дією гравітації проєкціюється у межі дотику ланок апарата й поверхні [29]. Внаслідок власної пружності ОП також діє на дотичні ланки АКА силою рівною за значенням та протилежною за напрямом – силі реакції ОП (рис. 3. 6 (а)). У результаті такої взаємодії на поверхні стоп апарата розподіляється сила реакції ОП, кількісту характеристику впливу якої можна подати у вигляді проєкції маси апарата [65, 136].

У випадку, коли орієнтація ОП по відношенню до вектора гравітації має великий кут розбіжності, маса АКА проєкціюється на ОП в область, яка розташована за межами дотику стоп апарата до поверхні [62]. У результаті цього, сумарна сила реакції ОП є меншою за силу тяжіння, що діє на АКА. Таким чином, виникає некомпенсована сила, яка не співпадає з контуром стоп і тому формує крутні моменти між дотичною ланок АКА та ОП (Рис. 3. 5 (b)), що, у свою чергу, призводить до порушення стійкості апарата.

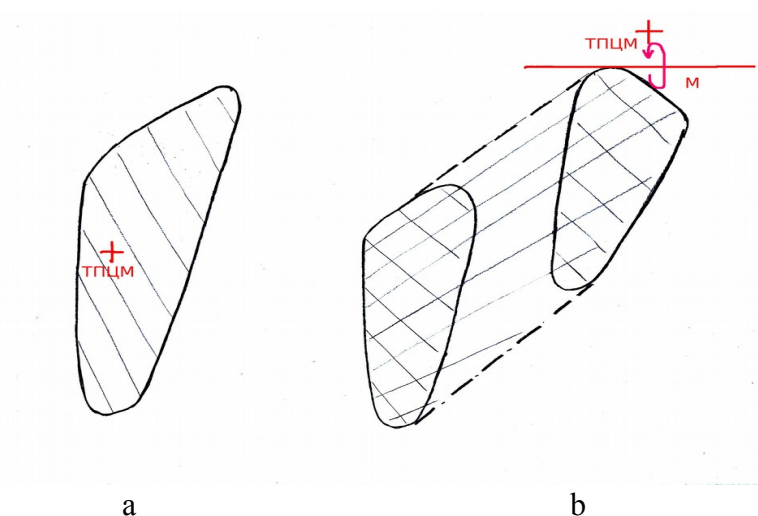


Рисунок 3.5 - Проекція ТПЦМ АКА на ОП: *a* - у межах контуру стопи АКА; *b* - за межами контуру; *М* - крутний момент стопи

Для обох випадків місцезнаходження ТПЦМ АКА та її координати визначаються по відхиленням вектора сили тяжіння відносно базової $d\theta$ точки АКА (місцезнаходження $d\theta$ співпадає з положенням шарніра стопи апарата) [136, 172]. Так, для зчитування сили взаємодії між АКА та ОП побудовано і застосовано сенсорну матрицю тактильних елементів з цифровим блоком управління, як показано на рис. 3. 6.

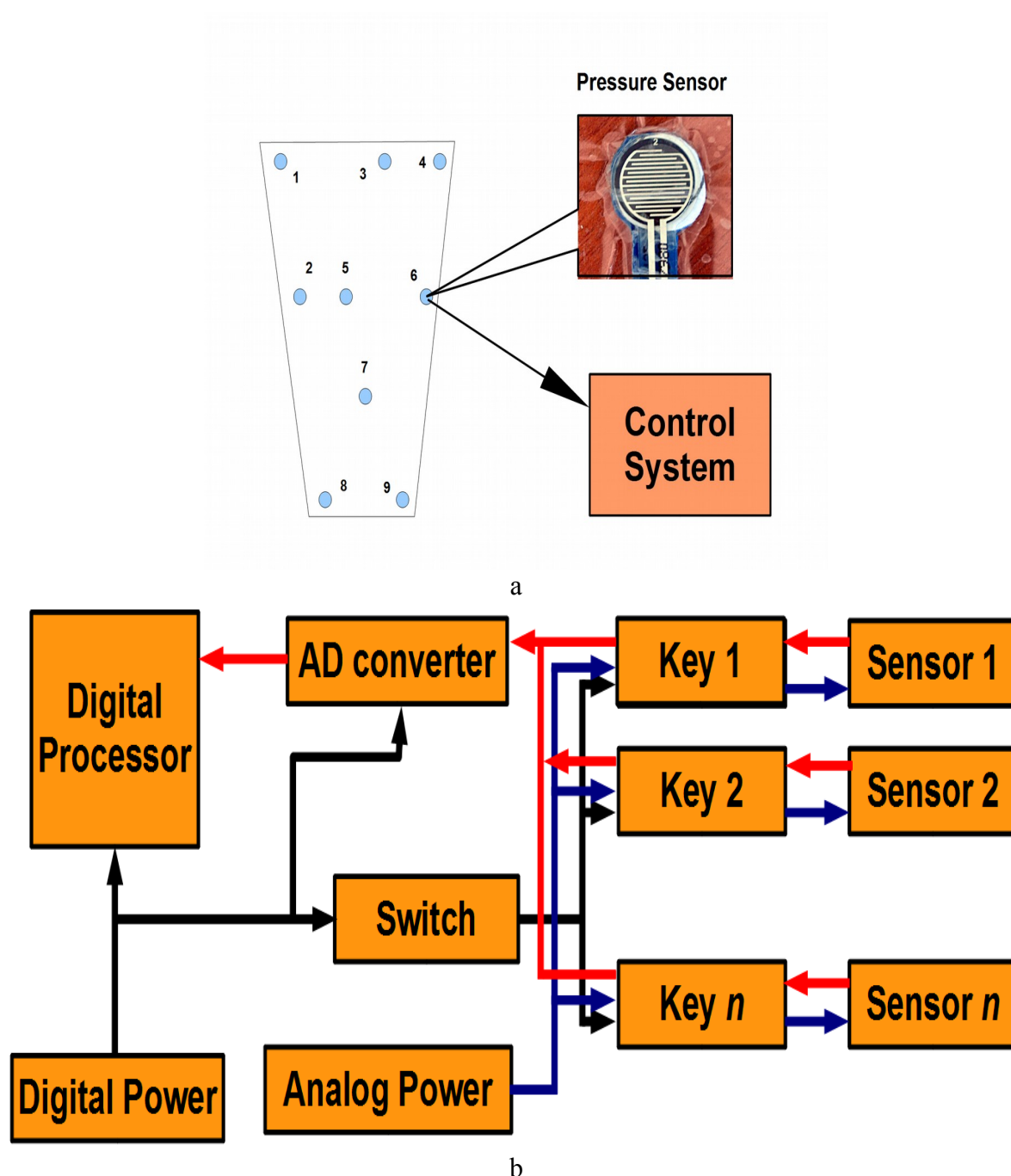
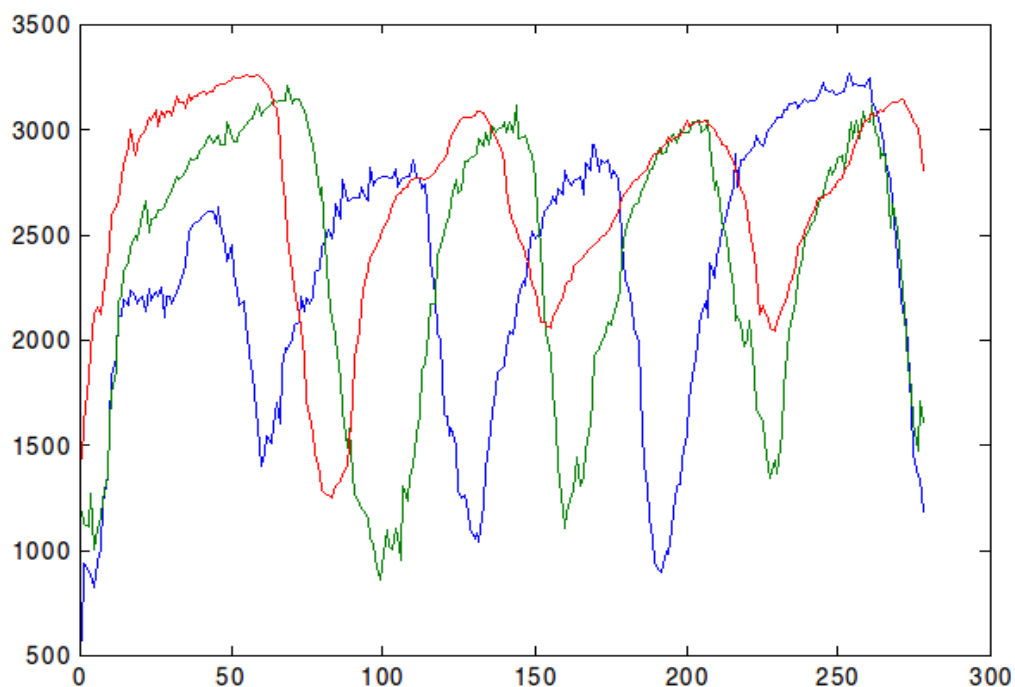
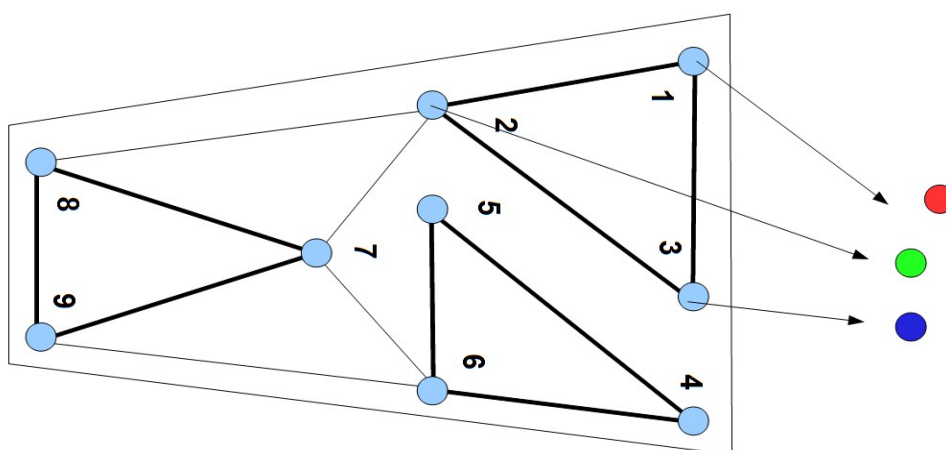


Рисунок 3.6 - Пристрій зчитування розподілу сили реакції на ОП АКА:
 а - загальний вигляд; б - структурна схема.

Під час дотику ланки стопи АКА до ОП (рис. 3. 6 (1-9)) зчитується сила натиску апарата на поверхню у вигляді масиву параметрів, які залежать від часу (рис. 3. 7).



a



b

Рисунок 3.7 - Графіки залежності сили натиску на опорну точку стопи: а - у залежності від часу; б - відносно чутливих зон на стопі АКА

На основі аналізу цих даних формується область дотику (рис. 3. 8).

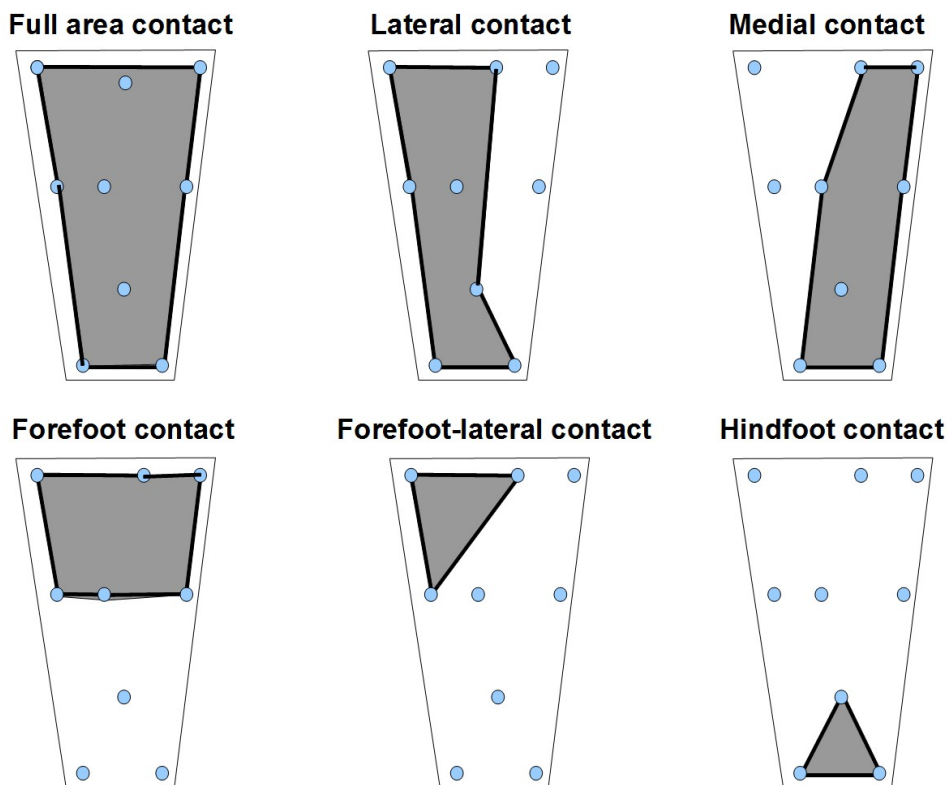


Рисунок 3.8 - Область дотику стопи АКА до ОП, зчитана сенсорною системою дотику ланок апарата

Після формування областей дотику АКА до ОП визначаються координати положення ТПЦМ апарата (рис. 3. 9):

$$\begin{aligned} x_c &= N_{\Sigma}^{-1} \int \int_{\Omega} y N(x, y) dx dy ; \\ y_c &= -N_{\Sigma}^{-1} \int \int_{\Omega} x N(x, y) dx dy , \end{aligned} \quad (3.9)$$

де:

$$N_{\Sigma} = \int \int_{\Omega} N(x, y) dx dy ,$$

Де:

$$N_{(x,y)} = a_5 x^2 + a_4 x^2 + a_3 xy + a_2 x + a_1 y + a_0;$$

$$N_{(x_i, y_i)} = N_i; \quad N_i > 0; \quad i = [1 \dots K, 6].$$

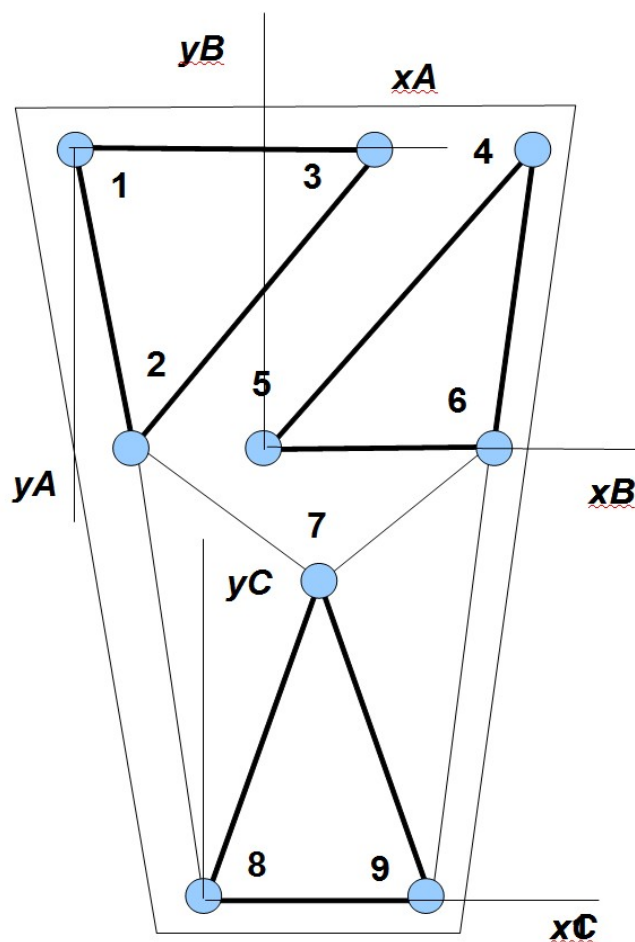


Рисунок 3.9 - Положення ТПЦМ АКА за даним про розподіл сили реакції ОП:
 $x_A, x_B, x_C, y_A, y_B, y_C$ — координати сенсорних зон стопи; 1..9 — тактильні датчики

Окремим випадком положення ТПЦМ АКА є проєкціювання цієї точки за межі контура стоп АКА (рис. 3. 7 (b)), що спостерігається під час втрати стійкості апарата [134, 137, 138, 142].

3. 2. 3. Формалізація взаємозв'язку між координатами ТПЦМ і положенням ТЦМ АКА

Важливою умовою збереження стійкого положення АКА на ОП є дотримання ним “комфортності” руху [5-10, 29, 37, 43, 52, 61-65]. Забезпечення цієї умови передбачає мінімізацію відхилення положення ТЦМ апарата від заданого закону руху [64].

Траєкторія переміщення ТЦМ АКА і траєкторія руху АКА пов'язані між собою лише визначеністю ОП [65]. Так, у випадку однорідної заданої ОП, комфортність руху забезпечується шляхом перерахунку кінематики положення ланок апарата та його ТЦМ відносно точки контакту АКА з ОП. Натомість, у випадку не заданого рельєфу ОП, перерахунок кінематики при незмінних параметрах ланок не вирішує проблему комфортності руху, що пов'язано з ймовірною наявністю екстремумів на ОП.

Так, математична формалізація забезпечення комфортності руху АКА на не заданій ОП буде подана так:

$$\begin{aligned} com_x &\in traj_{x,t} \pm \sigma; \\ com_y &\in traj_{y,t} \pm \sigma; \\ com_z &\in traj_{z,t} \pm \sigma, \end{aligned} \tag{3.10}$$

де: $traj_{[x,y,z],t}$ – вектор, що задає траєкторію руху ТЦМ і залежить від часу t ; σ – допуск до відхилення від траєкторії по кожній з координат x, y, z параметра $com_{[x,y,z]}$.

Тоді, положення ланок АКА і їх ТЦМ, що задовольняють умові (3.10) задаються таким чином:

$$x_D = x_0, \quad y_D = y_0, \quad z_D = z_0,$$

$$x_C = x_D - r_X(\delta_x - \eta_x) * l_C, \quad y_C = y_D - r_Y(\delta_x - \eta_x) * l_C, \quad z_C = z_D - r_Z(\delta_z - \eta_z) * l_C,$$

$$x_B = x_C + r_x(\delta_x - \eta_x - \beta_x) * l_B, \quad y_B = y_C + r_y(\delta_x - \eta_x - \beta_x) * l_B,$$

$$z_B = z_C + r_z(\delta_z - \eta_z - \beta_z) * l_B,$$

$$x_A = x_B + l_A * r_x(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x), \quad y_A = y_B + l_A * r_y(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x),$$

$$z_A = z_B + l_A * r_z(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x), \quad (3.11)$$

$$mass \ x_D = x_0 r_X(\delta_x), \quad mass \ y_D = y_0 r_Y(\delta_x), \quad mass \ z_D = z_0 r_Z(\delta_z),$$

$$mass \ x_C = x_D - r_X(\delta_x - \eta_x), \quad mass \ y_C = y_D - r_Y(\delta_x - \eta_x), \quad mass \ z_C = z_D - r_Z(\delta_z - \eta_z),$$

$$mass \ x_B = x_C + m_B * r_x(\delta_x - \eta_x - \beta_x), \quad mass \ y_B = y_C + m_B * r_y(\delta_x - \eta_x - \beta_x),$$

$$mass \ z_B = z_C + m_B * r_z(\delta_z - \eta_z - \beta_z),$$

$$mass \ x_A = x_B + l_B + l_A * r_x(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x), \quad mass \ y_A = y_B + m_B + l_A * r_y(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x),$$

$$mass \ z_A = z_B + m_B + l_A * r_z(\delta_x - \eta_x - \beta_x - \alpha_x),$$

де:

$$r_X(a) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(a) & -\sin(a) \\ 0 & \sin(a) & \cos(a) \end{pmatrix}, \quad r_Y(a) = \begin{pmatrix} \cos(a) & 0 & \sin(a) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(a) & 0 & \cos(a) \end{pmatrix},$$

$$r_Z(a) = \begin{pmatrix} \cos(a) & -\sin(a) & 0 \\ \sin(a) & \cos(a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta$ – кути повороту ланок; $m_{[A,B,C,D]}, l_{[A,B,C,D]}$ – положення ТЦМ і довжини ланок відповідно; x_0, y_0, z_0 – координати положення верхнього шарніра ланки-стопи АКА, а вектор-стану АКА матиме такий вигляд:

$$y_i = (A, B_i, C_i, D_i, MA_i, MB_i, MC_i, MD_i, \alpha_j, \beta_j, \delta_j, \eta_j)_i, \quad (3.12)$$

де:

$$A \equiv [x_A, y_A, z_A];$$

$$B_i \equiv [x_{B,i}, y_{B,i}, z_{B,i}];$$

$$C_i \equiv [x_{C,i}, y_{C,i}, z_{C,i}];$$

$$D_i \equiv [x_{D,i}, y_{D,i}, z_{D,i}], \quad i = [1, 2]$$

$$MA \equiv [mass\ x_A, mass\ y_A, mass\ z_A];$$

$$MB_i \equiv [mass\ x_{B,i}, mass\ y_{B,i}, mass\ z_{B,i}];$$

$$MC_i \equiv [mass\ x_{C,i}, mass\ y_{C,i}, mass\ z_{C,i}];$$

$$MD_i \equiv [mass\ x_{D,i}, mass\ y_{D,i}, mass\ z_{D,i}], \quad i = [1, 2]$$

$$\alpha_j \equiv [\alpha_x]; \quad \beta_j \equiv [\beta_x, \beta_z]; \quad \delta_j \equiv [\delta_x, \delta_z]; \quad \eta_j \equiv [\eta_x, \eta_z].$$

Рівняння 3.10 і 3.11 задають положення ланок апарата та формують його вектор-стану (рівняння 3.12) відносно базової точки на ОП $d0$, яка співпадає з верхнім шарніром ланки-стопи АКА. Тоді, для опису положення ТЦМ АКА відносно розподілу сили реакції ОП, розташування екстремумів рельєфу на ОП відносно точки $d0$ задається матрицю $A_{[i,j]}, i = [1..m], j = [1..n]$, елементи якої характеризують силу натиску в точці на стопі апарата. Кожен з елементів $a_{n/2,1}$ співпадає з точкою $d0$ і не містить значення натиску на ОП та описує положення шарніра кінематичної пари CD . Тоді, розташування екстремумів на ОП визначається

відповідно до найбільших елементів матриці A , що описується так:

$$\begin{aligned}
 ext_k &= \max(a_{i_k, j_k}) \in A \wedge i_k = [1..m], \quad j_k = [1..n], \quad k = [1..m*n]; \\
 &\dots \\
 ext_{k+h} &= \max(a_{i_{k+h}, j_{k+h}}) \in A \wedge i_{k+h} = [1..m], \quad j_{k+h} = [1..n] \wedge i_k \neq i_{k+h}, \\
 &j_k \neq j_{k+h}; \quad h = [0..m*n-1],
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

де: m, n - кількість елементів тактильно-чутливої матриці по осях x та z стопи апарата. При цьому кожному чутливому елементу з положенням $a[i, j], i = [1..m], j = [1..n]$ відповідає реальний тактильний датчик з фіксованими розмірами та діапазоном чутливості за натиском [136].

Відповідно до форми матриці тактильно-чутливих елементів, яка співрозмірна зі стопою апарата, відстань від екстремумів ОП до базової точки також співрозмірна з відстанню між шарніром $a_{n/2, 1}$ та екстремумами ext_{k+h} сенсорної матриці A . У відповідності до цього, відстань між $d0$ та ext_{k+h} описується відносними положеннями так:

$$\begin{aligned}
 d0^x &= 0; \\
 d0^z &= 0; \\
 ext_{k+h}^x &= d0^x + i * SLen, i \in a_{i_k+h, j_k+h}; \\
 a_{i_k+h, j_k+h} &\in A; \\
 \wedge a_{i_k+h, j_k+h} &equiv man a_{i, j}, i = [1..m], j = [1..n]; \\
 a_{i_k+h, j_k+h} &\neq a_{i_k+h-1, j_k+h-1}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$ext_{k+h}^z = d0^y + j * SLen, j \in a_{i_k+h, j_k+h};$$

$$a_{i_k+h, j_k+h} \in A;$$

$$\wedge a_{i_k+h, j_k+h} \equiv \max a_{i,j}, i=[1..m], j=[1..n];$$

$$a_{i_k+h, j_k+h} \neq a_{i_k+h-1, j_k+h-1},$$

де: $d0^x, d0^z$ – координати шарніра CD у площині стопи АКА; ext_{k+h}^x, ext_{k+h}^z – положення екстремума h на ОП у контурі стопи апарата; $SLen$ – габарити чутливого (тактильного) елемента ($h-1$ – індекс, що вказує на попередній екстремум ОП).

Таким чином, АКА взаємодіє з ОП у точках дотику, які співпадають з групою екстремумів сили реакції ОП, що у формалізованому вигляді задаються значеннями коефіцієнтів $a_{i,j}$ матриці A . Зважаючи на умови 3.13 та 3.14 ефективною довжиною при взаємодії стопи апарата з ОП є відстань від шарніра ланки BD до максимально віддаленого екстремума на сенсорній поверхні стопи апарата (рис. 3.10), яке визначається рівнянням:

$$Len_D = \sqrt{i^2 + j^2}, \quad de [i, j] \quad (3.15)$$

$$такі, що [a_{i,j} \in A] \rightarrow max.$$

Беручи до уваги те, що АКА здатний взаємодіяти з ОП однією або двома стопами, то для формалізації загальної картини взаємодії АКА з ОП запропоновано визначати екстремуми на обох ланах апарата одночасно [63, 65]. Для цього задано матрицею A_{lr} , яка містить значення сил реакцій дотичної області ОП. Матриця A_{lr} складається з двох матриць, які містять значення сил реакцій лівої стопи (A_l) і правої стопи (A_r) АКА. Подібним чином базові точки матриць визначені елементами відповідних матриць лівої і правої стоп апарата ($d0_l$ і $d0_r$).

Матриця A_{lr} задана відповідно до:

- положення $d0_l, d0_r$ (рис. 3.11);

- розташування найвіддаленішого екстремума на передній стопі апарата (рис. 3. 11);
- розташування крайніх екстремумів на стопах (рис. 3.11)

і побудована шляхом інтеграції матриць A_l, A_r з перерахунком розташування базових точок $d\theta_l, d\theta_r$ згідно положення ланок АКА (рис. 3. 12) та розташування спільної точки ланок B_l, B_r, A .

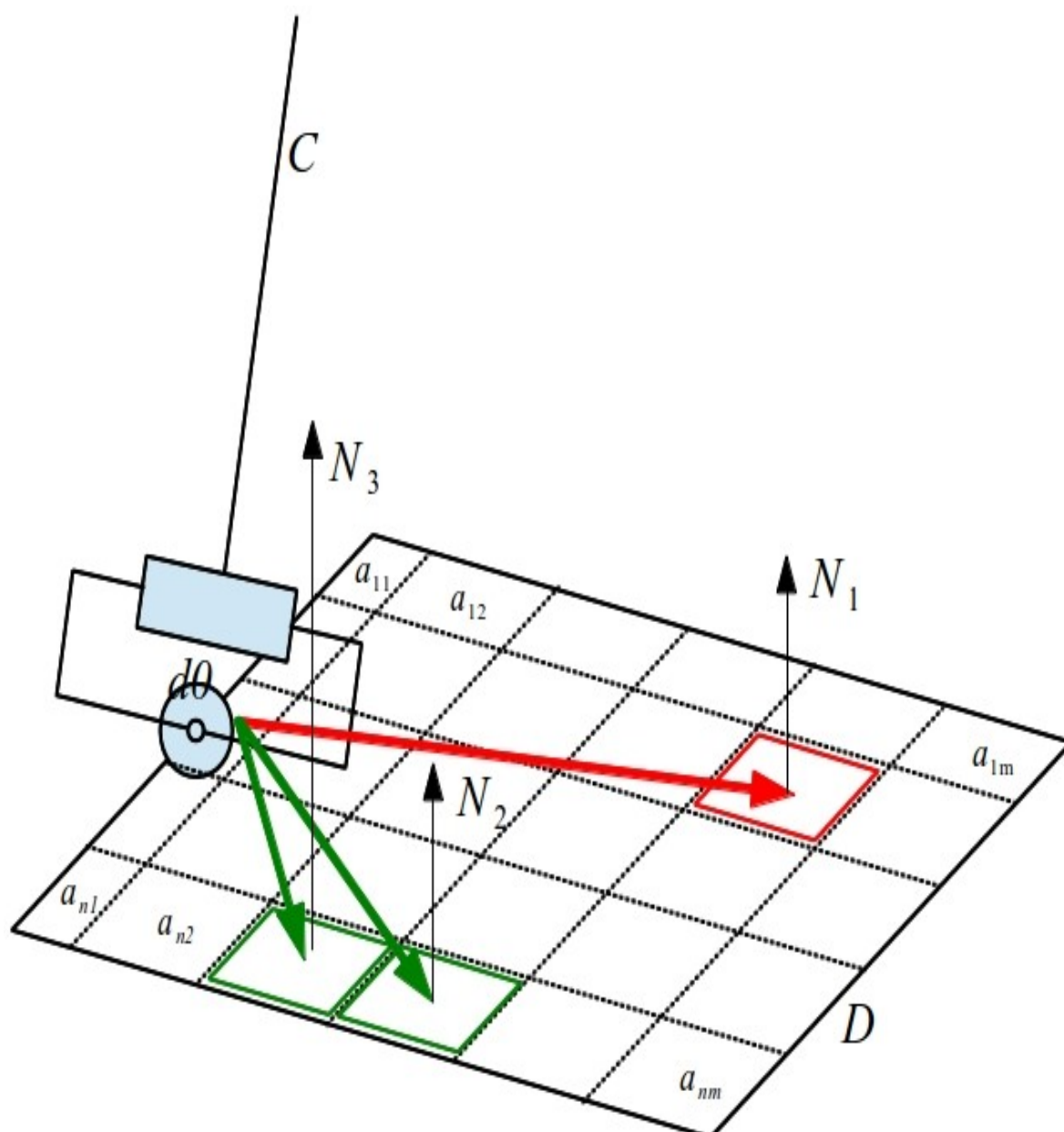


Рисунок 3.10 - Ефективна довжина ланки стопи АКА під час взаємодії з ОП:

C, D - ланки АКА; a_{nm} - асоціативний елемент матриці A ; $N_{1..3}$ - сила натиску в точці, що визначає екстремум; N_1 - найвіддаленіший екстремум на стопі апарата; $d\theta$ - базова точка ланки D

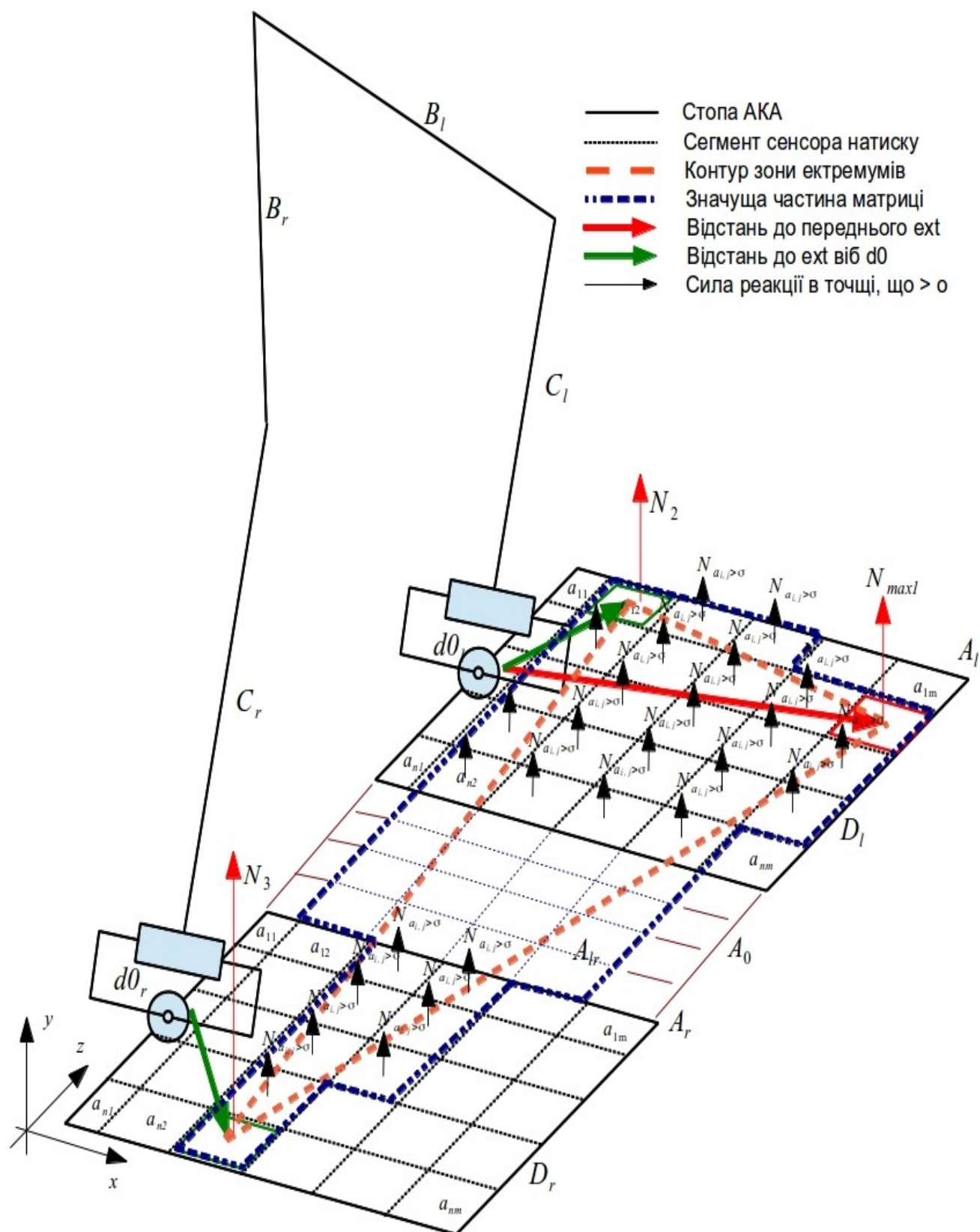


Рисунок 3.11 - Формування матриці A_{ij}

за даними матриць тактильно-чутливих елементів A_l, A_r : де: A_l, A_r - тактильно-чутливі матриці лівої та правної стоп АКА; B, C, D_l, B, C, D_r - ланки апарата; A_{lr} - значуща частина актуальної тактильно-чутливої матриці; $d0_l, d0_r$ - базові точки лівої та правної стоп; N_{maxl} - найвіддаленіший екстремум; $N_{2,3}$ - екстремуми стоп; $a_{11} - a_{nm}$ - тактильно-чутливі елементи матриць A_l, A_r, A_{lr}

$$\begin{aligned}
xC_l &= xD_l + (L_c * \cos(\delta_{x_l} - \eta_{x_l})); \\
yC_l &= yD_l + (L_c * \sin(\delta_{x_l} - \eta_{x_l})); \\
zC_l &= zD_l + (L_c * \sin(\delta_{z_l} - \eta_{z_l})); \\
xB &= xC_l + (L_b * \cos(\delta_{x_l} - \eta_{x_l} - \beta_{x_l})); \\
yB &= yC_l + (L_b * \sin(\delta_{x_l} - \eta_{x_l} - \beta_{x_l})); \\
zB &= zC_l + (L_b * \sin(\delta_{z_l} - \eta_{z_l} - \beta_{z_l})); \\
xC_r &= xB - (L_c * \cos(\delta_{x_r} - \eta_{x_r})); \\
yC_r &= yB - (L_c * \sin(\delta_{x_r} - \eta_{x_r})); \\
zC_r &= zB - (L_c * \sin(\delta_{z_r} - \eta_{z_r})); \\
xD_r &= xC_r; \quad yD_r = yC_r; \quad zD_r = zC_r.
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Виходячи з положення базових точок (рівняння 3.17), ефективних довжин стоп АКА (рівняння 3.16) та габаритів чутливого елемента (рівняння 3.14) матриця A_{lr} задається з габаритами m, n :

$$\begin{aligned}
m &= \frac{\min(xD_r, xD_l)}{SLen} \dots \frac{\max(xD_r, xD_l)}{SLen} + LenD_i, i \in \max(xD_r, xD_l); \\
n &= \frac{\min(zD_r, zD_l)}{SLen} \dots \frac{\max(zD_r, zD_l) + WgtD}{SLen},
\end{aligned} \tag{3.18}$$

де $SLen$ – лінійні розміри сенсора.

Формування матриці A_{lr} відбувається шляхом заміщення її елементів елементами матриць $A_l A_r$, так:

$$A_{lr}[m, n] \leftarrow A_l[k, f], k = [1..LenD_i], f = [1..\frac{WgtD}{SLen}], \tag{3.19}$$

$$m = [1 \dots \frac{LenD_i}{SLen}], n = [1 \dots \frac{2 * WgtD}{Slen}],$$

$$i = l, \text{ якщо } [k \in A_l[k, f]] < (k \in A_r[k, f])$$

$$i = r, \text{ у протилежному випадку.}$$

$$A_{lr}[m, n] \leftarrow A_j[k, f], k = [1 \dots LenD_j], f = [1 \dots \frac{WgtD}{SLen}],$$

$$m = [B - LenD_j \dots B], B = \max \frac{(xD_r, xD_l)}{SLen} + LenD_j,$$

$$n = [1 \dots \frac{WgtD}{SLen}], \text{ якщо } i = l; n = [zD_r - 1/2 \frac{WgtD}{SLen} \dots zD_r + 1/2 \frac{WgtD}{SLen}], \text{ якщо } i = r.$$

У результаті перетворень, що виконані у рівняннях 3.16-3.19 елементи матриці $A_{lr}[m, n]$ описують розподіл сили реакції ОП на двох стоп АКА одночасно.

На основі даних про розподіл сили реакції ОП на область контакту з АКА, положення екстремальних точок рельєфу може бути отримано з рівняння 3. 13 для матриці A_{lr} . При цьому параметри рівняння $ext_k, k = [1 \dots h], h \in \mathbb{Z}$ описують екстремальні елементи матриці a_{i_k, j_k} на ОП.

У свою чергу, на основі множини екстремальних елементів ext_k біномні елементами i_k, j_k , що вказують на власне розташування елемента ext_k у матриці A_{lr}) визначається область максимальної сили реакції ОП на АКА та положення його ТПЦМ на цій поверхні. Для цього сили реакції ОП у точках, що відповідають ext_k , асоціюються з силами тисків на поверхню у цих точках, а ТПЦМ асоціюється з точкою центру прикладення тиску на ОП, що визначається з рівняння 3.4 і має такий вигляд:

$$COMp^x = \frac{\sum_k m_{ext_k} [r_{ext_k} \times [1, 0, 0]^T]}{\sum_k m_{ext_k}}; \quad (3.20)$$

$$COMp^z = \frac{\sum_k m_{ext_k} [r_{ext_k}^{\rightarrow} \times [0, 0, 1]^T]}{\sum_k m_{ext_k}},$$

де: m_{ext_k} – сила реакції ОП у точці ext_k ; $r_{ext_k}^{\rightarrow}$ – відстань від $d0$ до екстремума ext_k ; k – індекс екстремума на ОП.

З рівняння 3.20 видно, що положення точки $COMp[COM_p^x, COM_p^z]$ визначає розташування положення ТПЦМ АКА відносно точки $d0$ стопи АКА.

Таким чином, базуючись на рівняннях 3.10 - 3.20 місцезнаходження ТЦМ АКА, а отже і формування умови збереження комфортності руху апарата, може бути визначено за даними про розподіл сили реакції ОП. Застосування такого підходу дає можливість управляти рухом АКА з забезпечуючи його комфортність переміщення на довільній ОП. Проте у випадку, коли сила реакції розподілена вздовж прямої контуру стопи, а положення ТЦМ апарата набуває невизначеності [138, 172], то для формалізації залежності положення ТЦМ АКА від розподілу сили реакції ОП необхідно розглянути граничні умови положення ТПЦМ АКА, при яких розташування ТЦМ буде визначене та кероване.

3. 2. 4. Граничне та оптимальне положення ТПЦМ АКА на ОП при яких зберігається стійкість апарата

У відповідності з роботами [4, 6, 37, 48, 63, 95, 136, 167], стійке положення АКА буде дотримано, якщо ТПЦМ АКА знаходитиметься у певному околі стійкості, яке сформоване на основі проекції контура стоп апарата на ОП (рис. 3.13). У випадку лінеаризованого подання контуру стоп апарата умова дотримання усталеного руху зводиться до вирішення задачі оптимізації, що показана рівняннями 3.21.

Застосування методів лінійного та нелінійного програмування для вирішення задачі пошуку стійкого стану апарата дає змогу твердити що оптимальне положення стійкості — це таке оптимальне положення, що характеризується найбільшим запасом стійкості на довільній ОП в може бути представлено так:

$$\max \left[\sum_{z=1}^{z=\text{border}_f^z} \sum_{x=1}^{x=\text{border}_f^x} \hat{N}_{y,x,z} \right]$$

$$f^{\text{foot}}(x_i, z_j, \hat{N}_y) \leq \text{border}_1$$

$$f^{\text{foot}}(x_i, z_j, \hat{N}_y) \geq \text{border}_2 \quad (3.21)$$

$$f^{\text{foot}}(x_i, z_j, \hat{N}_y) \geq \text{border}_3$$

$$f^{\text{foot}}(x_i, z_j, \hat{N}_y) \leq \text{border}_4$$

$$i, j \in R,$$

де: $\text{border}_{[1..4]}$ – лінійна функція, що описує границю стопи АКА зліва, справа, ззаду, спереду – відповідно (рис. 3. 13); $f^{\text{foot}}([x, y, z])$ – лінійна функція, що описує контур стопи у фронтальній або латеральній площинах; $\text{border}_{l(f)}^{x(z)}$ – граничне значення сили реакції опори у площині x або z ; $\hat{N}_{x,y,z}$ – значення сили реакції опори у точці; x, z – відповідні координати точки, з якої здійснюється зчитування розподілу сили реакції опори; y – значення сили реакції опори в точці, яка визначається координатами x, z .

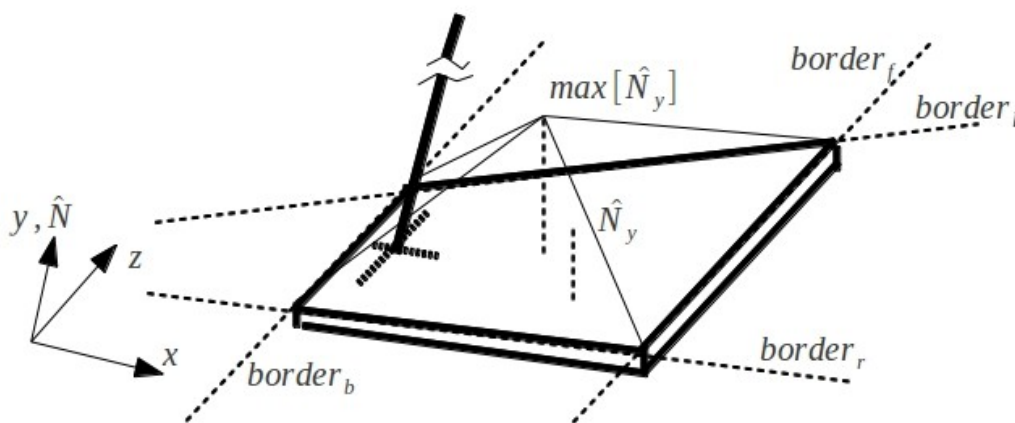


Рисунок 3.13 - Лінеаризована границя проекції ланки стопи АКА на ОП з вказанням сили реакції ОП: x, y, z — орієнтація системи координат стопи; N — сила реакції ОП у точці на стопі АКА ; $\max [N_y]$ — екстремум сили реакції ОП на стопі АКА; border — контур стопи

Застосування рівнянь 3.21 для успішного синтезу блоку “Формування нового вектору-стану” потребує представлення задачі оптимізації, як механізму для аналізу дійсної сили реакції опори на стопі апарата [29, 172]. Для цього запропоновано подання даних, отриманих з датчиків сили реакції опори у функцію розподілу маси апарата за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{i,j} * k; [i=1..x, j..z], k \in \mathbb{Z}$$

$$M = m_A + 2(m_B + m_C + m_D) \quad (3.22)$$

$$m_{x,z} = N_{x,z} * k$$

де: N – зчитана з сенсорів натиску матриця розподілу сили реакції опори;
 k – коефіцієнт перетворення сили натиску в точці на масу АКА;
 M – загальна маса АКА; m_A, m_B, m_C, m_D – маси ланок АКА; $m_{x,z}$ – маса, яка зведена в точку на стопі з координатами x,z дотичної області ОП до АКА.

Границі дотичної поверхні змінюються у відповідності до фази руху (рис. 3.11, рис. 3.13), що зумовлено кутами в шарнірах АКА. Форма поточної дотичної поверхні визначається наявністю в кожній з її точок сили реакції опори, яка відповідає умові (3.25) у межах зовнішнього контуру обох стоп апарата. Просторове положення стоп по відношенню до корпусу АКА визначається з координат точок їх підвісу до гомілок $d\theta_{[l,r]}$ (рівняннях 3.23) розмірів стопи АКА, які задані в моделі АКА рівнянням 2.21, та дискретизованої матриці розподілу маси апарата (рівняннях 3.25). Значення кутів просторового положення не входять до рівнянь визначення розподілу сили реакції ОП [29, 62-64], тому що їх виведено з рівнянь 3.23-3.26.

$$d\theta_r^z = z_A^r + (L_B + L_C) \cos(\alpha_r^x)$$

$$d\theta_r^x = x_A^r + L_B \cos(\alpha_r^y) + L_C \cos(\beta_r^y)$$

$$d\theta_l^z = z_A^l + (L_B + L_C) \cos(\alpha_l^x)$$

$$d\theta_l^x = x_A^l + L_B \cos(\alpha_l^y) + L_C \cos(\beta_l^y) \quad (3.23)$$

де: $d\theta_r^z, d\theta_r^x, d\theta_l^z, d\theta_l^x$ – координати точок підвісу стоп (ланок $D_{[l,r]}$) до гомілок (ланок $C_{[l,r]}$) АКА; L_A, L_B, L_C , – константні довжини ланок; $x_A^r, y_A^r, x_A^l, y_A^l$ – координати точок підвісу бедер до корпусу; $\alpha_r^x, \alpha_r^z, \alpha_l^x, \alpha_l^z, \beta_r^z, \alpha_l^z$ – кути визначені (рис. 3. 3).

Контур стоп АКА можна записати у виді функцій:

$$\begin{aligned}
 x_0^r \cos(\alpha_r^x) + z_0^r \sin(\alpha_r^x) - \frac{wdt_D}{2} &= 0 \\
 x_0^r \cos(\alpha_r^x) + z_0^r \sin(\alpha_r^x) + \frac{wdt_D}{2} &= 0 \\
 x_0^r \cos(\alpha_r^x + 90) + z_0^r \sin(\alpha_r^x + 90) &= 0 \\
 x_0^r \cos(\alpha_r^x + 90) + z_0^r \sin(\alpha_r^x + 90) - len_D &= 0 \\
 x_0^l \cos(\alpha_l^x) + z_0^l \sin(\alpha_l^x) - \frac{wdt_D}{2} &= 0 \\
 x_0^l \cos(\alpha_l^x) + z_0^l \sin(\alpha_l^x) + \frac{wdt_D}{2} &= 0 \\
 x_0^l \cos(\alpha_l^x + 90) + z_0^l \sin(\alpha_l^x + 90) &= 0 \\
 x_0^l \cos(\alpha_l^x + 90) + z_0^l \sin(\alpha_l^x + 90) - len_D &= 0
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

а перехід від координат точки на стопі до сили натиску на точку здійснюється наступним чином:

$$\begin{aligned}
 N^g(x, z) &= S_{n,m}, \\
 i \frac{len_D}{k} \geq n \geq [i+1] \frac{len_D}{k} \\
 j \frac{wdt_D}{l} \geq m \geq [j+1] \frac{wdt_D}{l} \\
 i &= [1..k-1], j = [1..l-1], g = [1,2]
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

де: len_D, wdt_D – константні довжина та ширина стопи АКА; k, l – кількість датчиків натиску по осях x та z ; $S_{n,m}$ – значення сили натиску, отримане з комірки сенсорної

матриці; g – ідентифікатор опори.

$$\begin{aligned} N_{x,y} &> \sigma \\ \sigma &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (3.26)$$

Беручи до уваги залежність границь рівноваги АКА від фази руху, визначимо фазу з умов 3.24, 3.26:

$$\begin{aligned} [f_r=1], \\ x_0^r \cos(\alpha_r^x + 90) + z_0^r \sin(\alpha_r^x + 90) > x > x_0^r \cos(\alpha_r^x + 90) + z_0^r \sin(\alpha_r^x + 90) - len_D \wedge \dot{z} \\ \exists(x, z), ([N_{x,z} > \sigma] \wedge [\dot{z} \wedge x_0^r \cos(\alpha_r^x) + z_0^r \sin(\alpha_r^x) + \frac{wdt_D}{2} > z > x_0^r \cos(\alpha_r^x) + z_0^r \sin(\alpha_r^x) - \frac{wdt_D}{2}]) \\ [f_l=2], \\ x_0^l \cos(\alpha_l^x + 90) + z_0^l \sin(\alpha_l^x + 90) > x > x_0^l \cos(\alpha_l^x + 90) + z_0^l \sin(\alpha_l^x + 90) - len_D \\ \exists(x, z), ([N_{x,z} > \sigma] \wedge [\dot{z} \wedge x_0^l \cos(\alpha_l^x) + z_0^l \sin(\alpha_l^x) + \frac{wdt_D}{2} > z > x_0^l \cos(\alpha_l^x) + z_0^l \sin(\alpha_l^x) - \frac{wdt_D}{2}]). \\ f_l + f_r = 1 \end{aligned}$$

де $f_l + f_r = 1..3$ - класифікатор одноопорної та двоопорної фаз руху. У випадку одноопорної фази руху, коли $f_l + f_r < 3$ крайні точки стопи, що формують контур стійкої області АКА та на які діє сила реакції опори, визначається із рівнянь 3.27:

$$\begin{aligned} x_1 &= i, N_g(\min(i), j) > \sigma \\ z_1 &= j, N_g(\min(i), j) > \sigma \\ x_2 &= i, N_g(\max(i), j) > \sigma \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned}
z_2 &= j, N_g(\max(i), j) > \sigma \\
x_3 &= i, N_g(i, \min(j)) > \sigma \\
z_3 &= j, N_g(i, \min(j)) > \sigma \\
x_4 &= i, N_g(i, \max(j)) > \sigma \\
z_4 &= j, N_g(i, \max(j)) > \sigma \\
i &= 1..n, j = 1..m
\end{aligned}
\tag{3.27}$$

де: n, m – розрядність сенсорної матриці стопи у площинах x та z – відповідно; g – ідентифікатор кінцівки.

Тоді прямі, що побудовані через ці точки за принципом обходу контуру, сформуують дотичну поверхню на стопі і можуть бути описані таким чином:

$$\begin{aligned}
\frac{y-y_1}{y_2-y_1} - \frac{x-x_1}{x_2-x_1} &= 0; \\
\frac{y-y_2}{y_3-y_2} - \frac{x-x_2}{x_3-x_2} &= 0; \\
\frac{y-y_3}{y_4-y_3} - \frac{x-x_3}{x_4-x_3} &= 0; \\
\frac{y-y_4}{y_1-y_4} - \frac{x-x_4}{x_1-x_4} &= 0.
\end{aligned}$$

Перетворивши рівняння прямих контуру (рис. 3. 3) через кутове положення у площині z , запишемо рівняння прямих контуру наступним чином:

$$\begin{aligned}
tg(\alpha_i^y)[x-x_1] + z_1 - z &= 0; \\
tg(\alpha_i^y)[x-x_2] + z_2 - z &= 0; \\
tg(\alpha_i^y)[x-x_3] + z_3 - z &= 0; \\
tg(\alpha_i^y)[x-x_4] + z_4 - z &= 0.
\end{aligned}$$

Перетворення координат точок до виду абсолютних координат ланки D здійснюється з використанням формули 3.25, подання прямих у системі координат відносно точок підвісу опор задано перетворенням над рівняннями прямих. Тоді, для збереження наочності, ідентифікатори координат залишаються незмінними і отримаємо:

$$\begin{aligned}
 border_1 &\equiv tg(\alpha_i^z)[x-x_1]+(z_1+[z_0^i-\frac{wdt_D}{2}])-z=0 \\
 border_2 &\equiv tg(\alpha_i^z)[x-x_2]+(z_2+[z_0^i-\frac{wdt_D}{2}])-z=0 \\
 border_3 &\equiv tg(\alpha_i^z)[x-x_3]+(z_3+[z_0^i-\frac{wdt_D}{2}])-z=0 \\
 border_4 &\equiv tg(\alpha_i^z)[x-x_4]+(z_4+[z_0^i-\frac{wdt_D}{2}])-z=0
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

$$[x, z] \in \mathbb{N}$$

$$i = f_r + f_l$$

де: wdt_D – ширина (по осі z) стопи АКА; x_0^i, z_0^i – координати шарніра на стопі апарата, що визначені у рівняннях 3. 24; l, r – ідентифікатори лівої та правої стоп;

f_l, f_r – ідентифікатори наявності сили реакції опори, що визначені у рівнянні (3.26).

Для випадку двоопорної фази руху, (коли $f_l + f_r = 3$) граничні, точки побудови прямих повинні відповідати умовам 3.29:

$$x_1 = \min(x) \Leftarrow \begin{cases} [N_l(x, z) > \sigma, x = x_0^l \dots [x_0^l + i]; z = [z_0^l - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^l + 1/2 wdt_D]] \\ [N_r(x, z) > \sigma, x = x_0^r \dots [x_0^r + i]; z = [z_0^r - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^r + 1/2 wdt_D]] \end{cases} \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}
z_1 &= z, [N_r(x_{1,z}) > \sigma, z = [z_0^r - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^r + 1/2 wdt_D]] \\
x_2 &= \max(x) \Leftarrow [N_l(x, z) > \sigma, x = x_0^l \dots [x_0^l + i]; z = [z_0^l - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^l + 1/2 wdt_D]] \\
&\quad [N_r(x, z) > \sigma, x = x_0^r \dots [x_0^r + i]; z = [y_0^l - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^r + 1/2 wdt_D]] \\
z_2 &= z, [N_r(x_{2,z}) > \sigma, z = [z_0^r - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^r + 1/2 wdt_D]] \\
z_3 &= \min(z) \Leftarrow [N_l(x, z) > \sigma, x = x_0^r \dots [x_0^r + i]; z = [z_0^r - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^r + 1/2 wdt_D]] \\
&\quad [N_r(x, z) > \sigma, x = x_0^r \dots [x_0^r + i]; z = [z_0^r - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^r + 1/2 wdt_D]] \\
x_3 &= x, [N_r(x, z_3) > \sigma, z = [z_0^r - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^r + 1/2 wdt_D]] \\
z_4 &= \max(z) \Leftarrow [N_l(x, z) > \sigma, x = x_0^r \dots [x_0^r + i]; z = [z_0^r - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^r + 1/2 wdt_D]] \\
&\quad [N_r(x, z) > \sigma, x = x_0^r \dots [x_0^r + i]; z = [z_0^r - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^r + 1/2 wdt_D]] \\
x_4 &= x, [N_r(x, z_4) > \sigma, z = [z_0^r - 1/2 wdt_D] \dots [z_0^r + 1/2 wdt_D]] \\
i &= [1..k]
\end{aligned}$$

а контур області дотримання рівноваги прямими, які сформовані точками і описується рівнянням 3.28.

Тоді поточна позиція ТПЦМ АКА для одноопорної та двоопорної фаз руху визначатиметься з розв'язку умови 3.21 з урахуванням системи обмежень 3.28, 3.30 та критерію оптимальності 3.22. У загальному вигляді позиція поточної ТПЦМ визначається методом Гоморі з наступної постановки задачі:

$$\begin{aligned}
&\max \left[\sum_{r=1}^k N_{x_i + (r^2 - z^2), z_j + (r^2 - x^2)} \right] \\
&tg(\alpha_i^z)[x - x_1] + (z_1 + [z_0^i - \frac{wdt_D}{2}]) - z \geq \sigma; \quad tg(\alpha_i^z)[x - x_2] + (z_2 + [z_0^i - \frac{wdt_D}{2}]) - z \geq \sigma; \\
&tg(\alpha_i^z)[x - x_3] + (z_3 + [z_0^i - \frac{wdt_D}{2}]) - z \leq \sigma; \quad tg(\alpha_i^z)[x - x_4] + (z_4 + [z_0^i - \frac{wdt_D}{2}]) - z \leq \sigma;
\end{aligned} \tag{3.30}$$

$$[x, z] \in \mathbb{Z}; \quad i = f_r + f_l; \quad x_i, z_j, r \in \mathbb{Z} \geq 0; \quad x_{rea}^{dof} = x; z_{rea}^{dof} = z.$$

На відміну від поточної ТПЦМ, оптимальне положення ТПЦМ визначається за критерієм усередненого розподілу маси АКА по всій поверхні стоп. Зауважуючи на

існування поточного розподілу сили реакції опори, задача пошуку оптимального положення ТПЦМ перетворюється в задачу перерозподілу сили реакції опори. Ця задача вирішується шляхом застосування угорського методу розв'язання задач лінійного програмування для випадку розподілу ресурсів [2]. Так, початкова матриця розподілу C складатиметься з елементів, що характеризують відносну завантаженість точки на стопі у порівнянні зі всіма іншими її точками. Завантаженість кожної з точок визначається з чисельного значення кожного елемента матриці C :

$$C = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1i} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{j1} & c_{j2} & \dots & c_{ji} \end{vmatrix}; \quad i=1..k, \quad j=1..l \quad (3.31)$$

$$\hat{s} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l N_{ij}}{ij},$$

Критерієм оптимального положення ТПЦМ є досягнення умови:

$$C = \begin{vmatrix} \hat{s} + \hat{\sigma} & \hat{s} + \hat{\sigma} & \dots & \hat{s} + \hat{\sigma} \\ \hat{s} + \hat{\sigma} & \hat{s} + \hat{\sigma} & \dots & \hat{s} + \hat{\sigma} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{s} + \hat{\sigma} & \hat{s} + \hat{\sigma} & \dots & \hat{s} + \hat{\sigma} \end{vmatrix} \quad (3.32)$$

$$\hat{\sigma} \rightarrow 0$$

яке виконається за умови переміщення ТПЦМ співвідношенням:

$$C = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1i} & A_1 \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2i} & A_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{j1} & c_{j2} & \dots & c_{ji} & A_j \\ B_1 & B_2 & \dots & B_i & \end{vmatrix};$$

$$A_j = \sum_{i=1}^{i=k} c_{ij}; B_i = \sum_{j=1}^{j=l} c_{ij}$$

$$x_{opt}^{dof} = x_{rea}^{dof} + \left[\frac{\max[A_j] - \min[A_j]}{\sum_{i=1}^{i=k} A_j} \right] k \quad (3.33)$$

$$z_{opt}^{dof} = z_{rea}^{dof} + \left[\frac{\max[B_i] - \min[B_i]}{\sum_{j=1}^{j=k} B_i} \right] l.$$

Вихідним значенням блоку “Формування нового вектору-стану” (рис. 3. 2) є координати поточної та оптимальної ТПЦМ, що передаються у вигляді вектора стану:

$$y^{DOF} = [x_{rea}^{dof}, z_{rea}^{dof}, x_{opt}^{dof}, z_{opt}^{dof}] \quad (3.34)$$

Для перерахунку кутів у шарнірах АКА, у відповідності до знайденого оптимального положення ТПЦМ, застосовано метод вирішення зворотної задачі кінематики, який реалізований у блоці “Зміна кута кінематичної пари [1..12]” (рис. 3. 2).

3. 2. 5. Перерахунок кінематичного стану АКА за даними про відхилення положень ТПЦМ

Вихідними значеннями рівнянь 3.32, 3.33 є координати оптимальної ТПЦМ АКА на ОП (критерій оптимальності є однорідний запас стійкості апарата у всіх напрямках ймовірного завалу) за даними про загальний розподіл сили реакції обох стоп апарата, які були отримані з рівняння 3. 19.

Загалом у результаті перерахунку рівнянь 3. 20, 3. 33 отримані координати поточної і оптимальної ТПЦМ АКА на ОП відповідно. Векторна різниця між

координатами точок характеризує величину відхилення стану рівноваги АКА від її максимального значення. Кількісна характеристика цього відхилення описується так:

$$\begin{aligned}\delta COM^x &= \vec{COM}^x - x_{rea}^{dof}, \\ \delta COM^y &= \vec{COM}^y - y_{rea}^{dof},\end{aligned}\tag{3.35}$$

де \vec{COM}^x, \vec{COM}^y описані у рівнянні 3. 20, а $x_{rea}^{dof}, y_{rea}^{dof}$ визначені з рівняння 3. 33.

Поточний вектор стану АКА, що характеризує положення ланок апарата і місцезнаходження його ТЦМ, подається у вигляді рівняння 3. 12 і задається системою рівнянь 3. 11.

Для переміщення ТПЦМ АКА у нову оптимальну точку, вектор стану АКА змінюється, а положення ланок відповідає кінематичному стану апарата, при якому ТЦМ проектується у координати визначеної оптимальної ТПЦМ.

Розташування ТЦМ і шарнірів АКА визначається з розв'язку зворотної задачі кінематики.

3. 2. 6. Умови дотримання рівноваги АКА на ОП за даними про розподіл сили реакції ОП

Перебування АКА у стані рівноваги, на відміну від його стійкого стану, супроводжується можливістю збереження поточної опорної фази [29] в умовах, коли на апарат діють зовнішні впливи силою F_{ext} [137, 172].

Для моніторингу виникнення стану рівноваги, на основі даних про розподіл сили реакції ОП, можуть бути застосовані умови 3.31 - 3.33.

У випадку поступової втрати рівноваги, її відновлення здійснюється шляхом корекції просторового положення кінематичних пар апарата до виконання умови співпадіння положення поточної (рівняння 3.30) та оптимальної (рівняння 3.32, 3.33) ТПЦМ.

Для корекції положення ТПЦМ запропоновано застосування методу зворотної

задачі кінематики. Для випадку семиланкої кінематичної моделі АКА задача кінематики описується методом матриці повороту (рівняння 2.3), що для ланок $A, B_{l,r}, C_{l,r}, D_{l,r}$ має вигляд, який показано на рис. 2.5 та описано рівняннями 2.31, 2.48. Тоді перерахунок нових кутів кінематичних пар, які забезпечують переміщення ТПЦМ виконується вирішенням зворотної задачі кінематики, що застосовується для синтезу блоку “Зміна кута кінематичної пари [1..12]” СУ дотриманням стійкості АКА.

3.2.7. Передумови відновлення стійкості апарата після факту виходу ТПЦМ за контур стопи за даними про розподіл сил реакції ОП

Окрім випадків оптимального та стійкого положення на АКА ОП, апарат здатний перебувати у стані завалу [4, 25, 37, 50, 62, 141, 167]. Під час такого стану його ТПЦМ знаходиться за межами контуру стоп [62, 172, 167]. Якщо завал був викликаний програмою управління, то апарат змінює опорну фазу руху та переміщується відносно попереднього розташування. У випадку, коли стан завалу був викликаний відповідними початковими умовами або виник у наслідок дії непередбачених зовнішніх сил, виникає потреба у відновленні його стійкого положення [108, 137]. Зважаючи на те, що стан завалу супроводжується розподілом сили реакції ОП вздовж контурної лінії стопи (в напрямку завалу) [37, 63, 152, 167], то фіксувати таке явище можливо лише шляхом аналізу розподілу сили реакції (відсування положення трьох екстремумів, що не лежали б на одній прямій p опорної поверхні) (рис. 3.9).

Якщо точки екстремумів розташовані на одній прямій вздовж контуру стопи виникає крутячий момент у площині, яка побудована на перетині ОП і вектора гравітації, як це показано на рис. 3.14.

Саме завдяки дії крутного моменту ТПЦМ АКА переміщується радіально до ОП з центром кривизни у p і прискоренням, яке залежить від mg .

Наявність прискорення при падінні АКА ускладнює задачу його виводу з завалу, так як накладає обмеження на динамічні характеристики СУ. Відновлення стійкості апарата в цьому випадку реалізується так:

1. Пошук напрямку падіння АКА;
2. Визначення прискорення падіння;
3. Обрахунок динаміки ланок АКА для пошуку ефективного плану виводу з завалу;
4. Формування зворотнього крутного моменту, величина і напрям якого здатні компенсувати завал апарата;
5. Обрахунок кутів і крутних моментів у кінематичних парах ланок для формування зворотнього крутного моменту;
6. Відпрацювання крутних моментів у кінематичних парах ланок апарата.

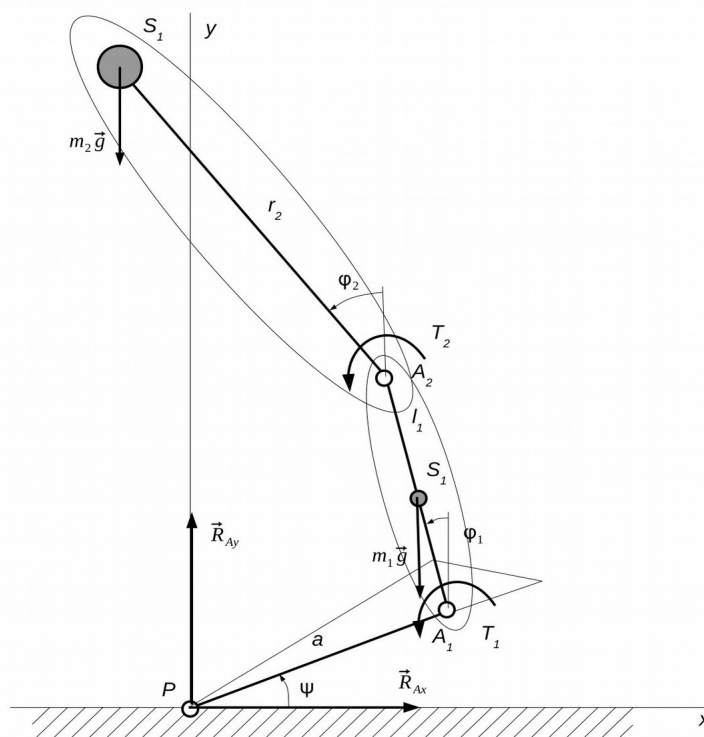


Рисунок 3.14 - Виникнення крутного моменту на стопі АКА, що спричинений розташуванням ТПЦМ за межами стопи його опори: P — базова точка моделі; R_{Ay}, R_{Ax} — проекції сил і орієнтація базової системи координат; a — довжина ланки стопи; $A_{1,2,3}$ — керовані кути; $T_{1,2,3}$ — положення шарнірів на моделі АКА; $r_{1,2}$ — довжини ланок; $S_{1,2}$ — ТЦМ ланок; $m_{1,2,3}$ — маси ланок; g — напрям прикладання сили тяжіння

Динамічна поведінка показаної на рис. 3. 14 моделі апарата для вирішення задачі виводу його зі стану завалу описується таким чином:

$(m_1+m_2)a^2$	$-(m_1r_1+m_2l_1)a\sin(\varphi_1-\psi)$	$-(m_1r_1+m_2l_1)a\sin(\varphi_1-\psi)$	$\ddot{\psi}$	$(m_1r_1+m_2l_1)a\omega_1^2\cos(\varphi_1-\psi)+$ $m_2ar_2\omega_2^2\cos(\varphi_2-\psi)-$ $(m_1+m_2)ga\cos\psi-T_1$
$-(m_1r_1+m_2l_1)a\sin(\varphi_1-\psi)$	$J_{s1}+m_1r_1^2+m_2l_1^2$	$m_2l_1r_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)$	$\ddot{\varphi}_1$	$-(m_1r_1+m_2l_1)a\dot{\psi}^2\cos(\varphi_1-\psi)+$ $m_2ar_2\omega_2^2\sin(\varphi_2-\varphi_1)+$ $(m_1r_1+m_2l_1)g\sin\varphi_1+T_1-T_2$
$-(m_1r_1+m_2l_1)a\sin(\varphi_1-\psi)$	$m_2l_1r_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)$	$J_{s2}+m_2r_2^2$	$\ddot{\varphi}_2$	$-m_2ar_2\dot{\psi}^2\cos(\varphi_2-\psi)-$ $m_2l_1r_2\omega_2^2\sin(\varphi_2-\varphi_1)+$ $m_2r_2g\sin\varphi_2+T_2$

або у матричній формі:

$$M\epsilon = b + UT;$$

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \\ \ddot{\varphi}_3 \end{pmatrix}; \quad UT = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix}; \quad (3.38)$$

де a_{sx}, R_{Ay} відповідають лінеаризованій формі для T_1, T_2 , які задовольняють таким умовам:

$$\begin{pmatrix} a_{sx} \\ R_{Ay} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a & -B & -C \\ a & -B & -C \end{pmatrix} M^{-1} (b + UT).$$

Тоді, ТЦМ АКА описується так:

$$a_{sx} = -a\ddot{\psi}\sin\psi - B\ddot{\varphi}_1\cos\varphi_1 - C\ddot{\varphi}_2\cos\varphi_2 - a\dot{\psi}\cos\psi + B\dot{\varphi}_1^2\sin\varphi_1 + C\dot{\varphi}_2^2\sin\varphi_2;$$

$$B = \frac{m_1r_1+m_2l_1}{m_1+m_2}; \quad C = \frac{m_2r_2}{m_1+m_2}.$$

Таким чином, для ефективного виводу з завалу необхідно виконання умови $a_{xs} > 0$. Тоді вертикальна сила реакції ОП становитиме:

$$R_{Ay} = a\ddot{\psi}\cos\psi - B\ddot{\varphi}_1\sin\varphi_1 - C\ddot{\varphi}_2\sin\varphi_2 - a\dot{\psi}\sin\psi - B\dot{\varphi}_1^2\cos\varphi_1 - C\dot{\varphi}_2^2\cos\varphi_2 + (m_1+m_2)g,$$

а АКА зберігатиме стале положення, якщо $R_{Ay} > 0$.

Застосування описаної у рівнянні 3.38 поведінки АКА на прикладі комп'ютерної моделі апарата демонструє відновлення його стійкості і для наглядності умовно розмежоване на три етапи (Рис. 3.15):

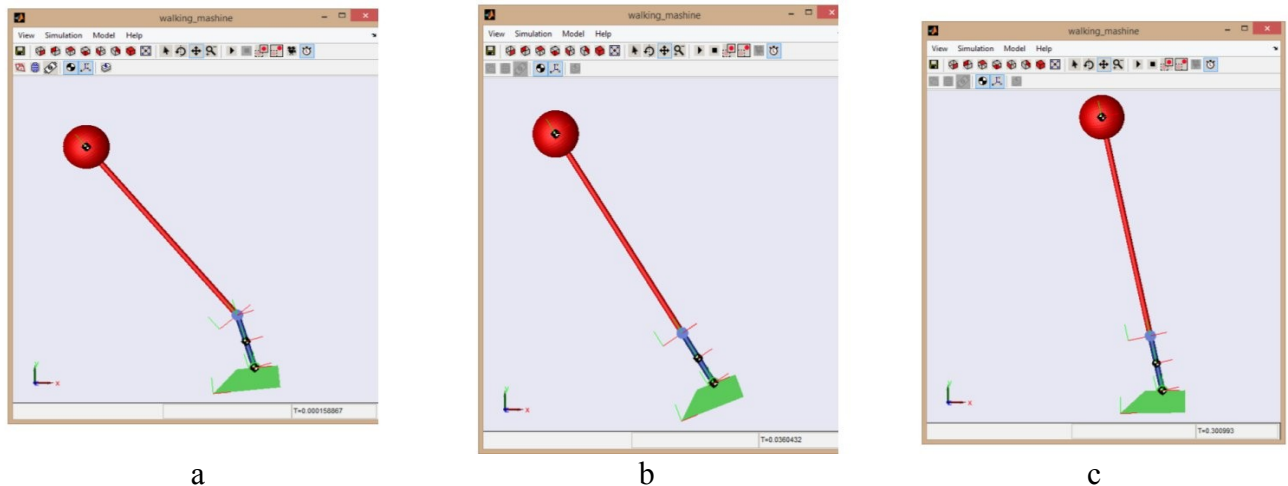


Рисунок 3.15 - Моделювання процесу відновлення стійкості АКА після його завалу: а - етап початкової ініціалізації; б - завершення відпрацювання кутового переміщення ланок; с - переміщення ТПЦМ АКА у межі стопи апарата.

1. Початкової ініціалізації (рис. 3. 15 а). Кінематичні пари АКА зігнуті у шарнірах і положення його ТЦМ проектується за межі опори. Моделлю поведінки розпочато формування зворотних крутних моментів у шарнірах $A1$ й $A2$;
2. Переміщення ланок у нову позицію (рис. 3. 15 б). Позиція АКА є нестійкою, всі ланки апарат характеризуються прискореннями. Моделлю поведінки завершилося переміщення ланок у нову позицію і апарат рухається за інерцією (пройшло 0.03с.);
3. Переміщення ланок у наступну позицію (рис. 3. 15 с). Стійке положення апарата відновлено за рахунок переміщення його ТПЦМ у межі опори. Подальше підтримання стійкого положення потребує мінімальної затрати кінетичної енергії (пройшло 0.30с.).

3. 3. Висновок до розділу

По даному розділу дисертаційної роботи можна зробити такі висновки:

1. Виконаний математичний аналіз причин порушення усталеного руху АКА на довільній ОП. Визначено, що збереження усталеного руху апарата у значній мірі залежить від характеру його взаємодії з ОП за силами натиску і реакції та моментами, які виникають між стопою АКА та ОП. Встановлено, що характер взаємодії АКА з ОП у малій степені залежить від сил тертя і ковзання, що можуть виникати при динамічних фазах руху АКА, але є несуттєвими у статичних фазах його руху.
2. Удосконалений математичний метод для розрахунку місцезнаходження ТПЦМ АКА і його ланок у залежності від положення ТПЦМ АКА на ОП. Удосконалення стосуються підходу до розрахунку положення ТПЦМ апарата і ґрунтуються на моніторингу і аналізі розподілу сил реакції ОП, яка виникає у наслідок динамічних властивостей апарата і дії на нього зовнішніх чинників. Це дало можливість визначати положення ТЦМ апарата і його ланок базуючись лише на кінематичній схемі АКА і на характері розподілу сил реакції ОП, що дало можливість дослідити граничні умови стійкості АКА на довільній ОП і дозволило визначити умови, коли АКА має найбільший запас стійкості.
3. Розроблено критерії стійкості АКА на довільній ОП, які враховують прийняті методи управління положенням ТПЦМ апарата і дають змогу виконати пошук оптимальних розв'язків задачі збереження усталеного руху АКА з найбільшим запасом його стійкості в умовах довільної ОП. Для пошуку оптимальних розв'язків задачі збереження усталеного руху АКА запропонована формалізована постановка задачі нелінійного програмування з пошуку положення ТПЦМ апарата для забезпечення однорідного розподілу сил реакції ОП.
4. Розроблено стратегію управління усталеним рухом АКА на довільній ОП, яка ґрунтується на використанні критеріїв стійкості апарата і ураховує динамічні

характеристики АКА для формування параметрів кутів його нового вектора-стану. Це дало змогу змінювати поточне положення ТЦМ АКА і тим самим забезпечувати його усталений рух на довільній ОП з найбільшим запасом його стійкості. Для цього запропонована процедура оцінювання відхилення між поточним і оптимальним положеннями ТПЦМ АКА на ОП і процедура переміщення ТПЦМ АКА за рахунок зміни кутового положення ланок апарата.

РОЗДІЛ 4. УПРАВЛІННЯ СТІЙКІСТЮ АНТРОПОМОРФНОГО АПАРАТА ЗА ДАНИМИ ПРО РОЗПОДІЛ СИЛИ РЕАКЦІЇ ОПОРНОЇ ПОВЕРХНІ

У цьому розділі показано розробку системи управління стійкістю АКА, яка базується на нових критеріях рівноваги а також під'єднання СУ до комп'ютерної та фізичної моделі апарата.

Результати управління стійкістю АКА та супровідні процеси отримані з його комп'ютерної моделі. Взаємодія опор апарата з поверхнею показана табличним та графічним чином.

Управління моделлю АКА побудовано на основі розподіленої ієрархічної СУ з виконавчими складовими, які побудовані на основі *PID*-регуляторів. Моніторинг розподілу сили реакції ОП показаний у вигляді складової СУ, яка під'єднана до стоп АКА і ОП. Модель рельєфу ОП задається окремо моделлю. Опис моделей ОП і АКА, їх побудова, застосування і функції наведені у другому розділі.

4. 1. Структурна формалізація системи управління стійкістю АКА на ОП

Для керування положенням АКА для забезпечення його стійкого стану СУ базується на описаних у розділі 3 рівняннях, які формують систему критеріїв і методів дотримання стійкості та рівноваги апарата.

Відповідно до нових критеріїв, дотримання усталеного руху АКА забезпечуються розташуванням ТПЦМ в області, яка описується дотиком стоп апарата на ОП. Місцезнаходження ТПЦМ АКА визначається з даних про розподіл сили реакції ОП. Розташування ТЦМ АКА визначається відносно його ТПЦМ, параметрів ланок і кінематичного положення апарата.

Втрата стійкого положення апарата, як було описано вище, супроводжується виходом ТПЦМ за межі контура дотику стоп до ОП. Окремим випадком керування рівновагою є вивід АКА із стану початкового глибокого завалу [167]. Цей випадок характеризується незадовільними початковими умовами, коли ТПЦМ АКА знаходиться за межами його стоп.

Незалежно від початкового положення АКА керування положенням його

ТПЦМ відбувається шляхом переміщення ТЦМ за рахунок руху ланок апарата.

При переміщенні ланок АКА, його ТЦМ зміщується у відповідності до декількох факторів, а саме:

1. Переміщення маси ланки. Цей фактор є ефективним під час переміщення ланки АКА і здійснюється завдяки дії приводів і системи зворотнього зв'язку та регуляторів низького рівня;
2. Перерозподілу сили реакції ОП. Цей фактор слугує засобом зворотнього зв'язку і забезпечує моніторинг переміщення ТПЦМ;
3. Динамічності системи. Даний фактор не враховується у роботі бо його вплив нівелюється за рахунок мінімізації швидкості переміщення ланок апарата.

Основним методом відслідковувати положення ТПЦМ АКА є аналіз розподілу сили реакції ОП на стопу АКА. Для зчитування цих даних стопи АКА оснащені відповідними датчиками натиску (тактильними датчиками), що розмежовані у групи і розташовані вздовж траєкторії переміщення ТПЦМ при прямолінійному русі апарата. Зчитування даних з датчиків відбувається циклічно. Після зчитування дані оцифровуються, формуються у матриці і передаються до СУ. Елементи матриці відповідають силі натиску у точці, а їх індекси — відносному положенню датчика на стопі.

Дані про розподіл сили реакції ОП надходять до блоку 4 разом з даними кінематичного стану АКА і його масо-габаритними параметрами (рис. 4. 1).

На загальній схемі системи управління (додаток Б) показані блоки 1-3, які містять передатні функції для даних сили натиску, масо-габаритні характеристики і кінематику апарата відповідно. Вхідними параметрами блоку 1 є дані з сенсорів розподілу сили натиску АКА на ОП. Вхідними даними блоку 3 є дані кутового положення апарата, які отримані з комп'ютерної моделі АКА (подана у блоці 6). Блок 2 не містить вхідних параметрів, так як його значення є константами і залежать лише від особливостей АКА. Блок 4 задає кінематичні параметри АКА, при яких апарат зберігатиме стійке просторове положення без зміни опорної фази руху. Блок 5 містить регулюючу підсистему зміни кінематичного стану АКА шляхом формування керуючого впливу на актуатори. У структурі блоку містяться система *PID*-

регуляторів для кожної ступені свободи АКА. Структура регуляторів подана у додатку Б.

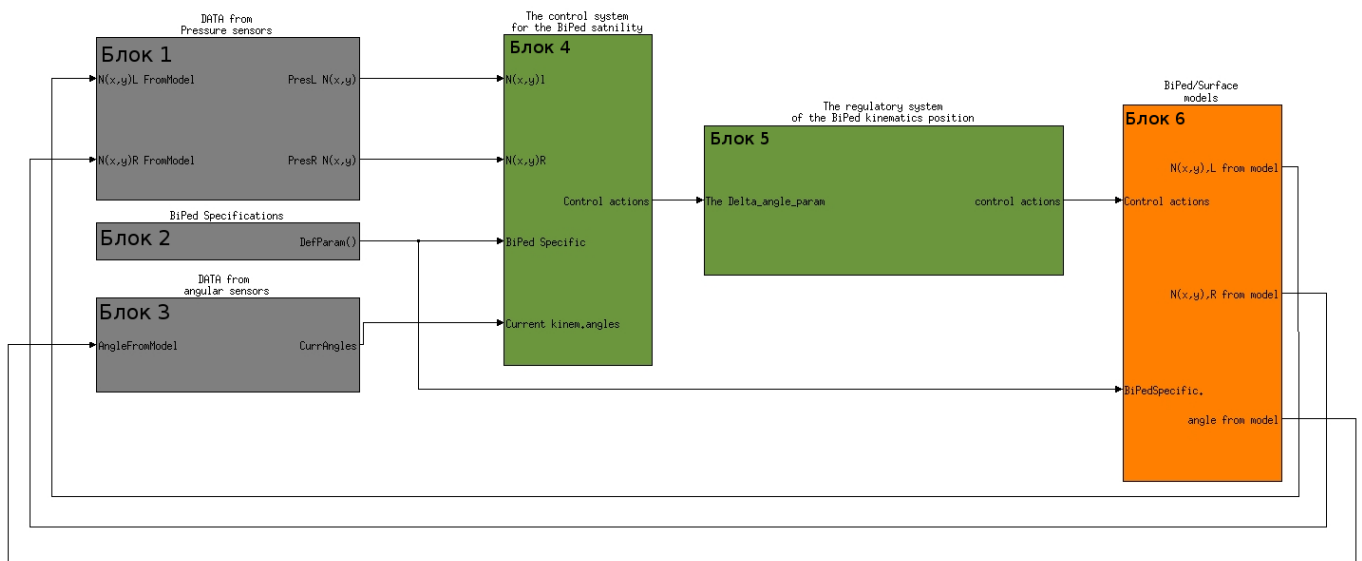


Рисунок 4.1 - Структурна схема СУ стійкістю АКА на ОП: блоки 1..3 — формують передаткові формування входних даних; блоки 4, 5 — обчислюють нове положення АКА; блок 6 — містить модель апарата

У свою чергу, блок 4 складається з таких підсистем:

- підсистема формування поточного вектору стану АКА (ПС1);
- підсистема пошуку найкращого за стійкістю положення апарат (ПС2);
- підсистема обчислення положення ТЦМ і вектору стану АКА, при якому він залишатиметься стійким (ПС3);
- підсистема формування декомпозованого вектору стану з відхиленнями кінематичного положення ланок (ПС4).

Підсистема формування поточного вектору стану АКА вирішує дві задачі. По-перше, формування поточного вектору стану АКА. По-друге, обрахунок відстані від базової точками $d\theta$ лівої і правої ніг апарата.

Структурна схема ПС1 має вигляд, зображений на рис. 4.1.

Пошук вектору стану АКА виконується у відповідності до рівнянь 3.11, 3.12 і 3.17. Пошук різниці позицій базових точок ($\delta^{d_{0l}, d_{0r}}$) розрахунком системи рівнянь 3.17.

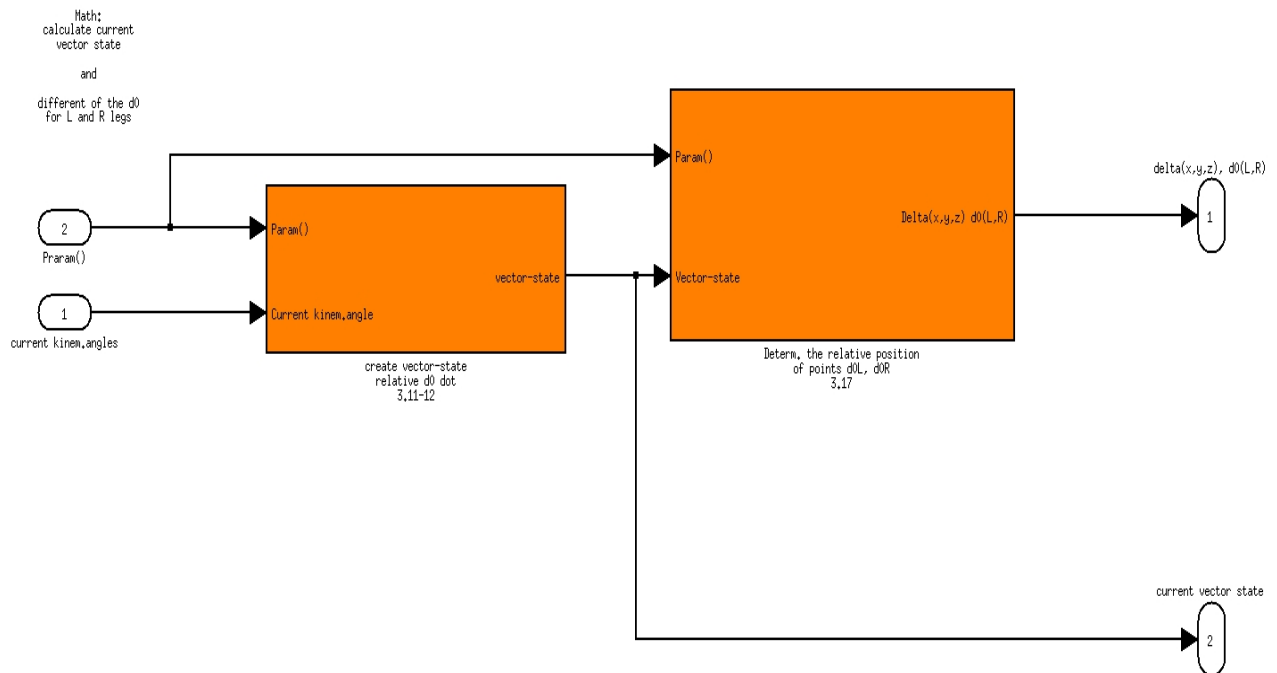


Рисунок 4.2 - Структурна схема ПС1 для пошуку поточного вектору стану АКА

Підсистема пошуку найкращого за стійкістю положення апарат обраховує положення ТЦМ АКА при якому апарат буде знаходитися у стані найбільшого запасу стійкості на ОП. Структурна схема даної підсистеми наведена у додатку Б. і базується на формалізації рівнянь 3.13-3.16, 3.18-3.19, 3.31 і 3.35. До ПС2 надходять матриці сил реакції ОП - $N(x, y)l, r$, вектор масо-габаритних характеристик АКА — *BiPed Specific*, та координати базових точок $d0_l, d0_r$. Вихідним параметром підсистеми є різниця положення ТПЦМ АКА для його поточного стану та стану з найбільшим запасом стійкості.

Підсистема пошуку найкращого за стійкістю положення апарат обраховує новий вектор стану, кінематична характеристика якого і задає положення АКА. Структурна схема підсистеми показана на рис. 4.3.

Робота ПС3. Формалізується рівняннями 3.1 і 3.36.

Вхідними параметрами даної підсистеми є:

- *delivation of CoM* $(x, z), LR$ - різниця положення поточної ТПЦМ і ТПЦМ, яка характерна для найбільшого запасу стійкості АКА;
- *current vector — state* - поточний вектор стану АКА.

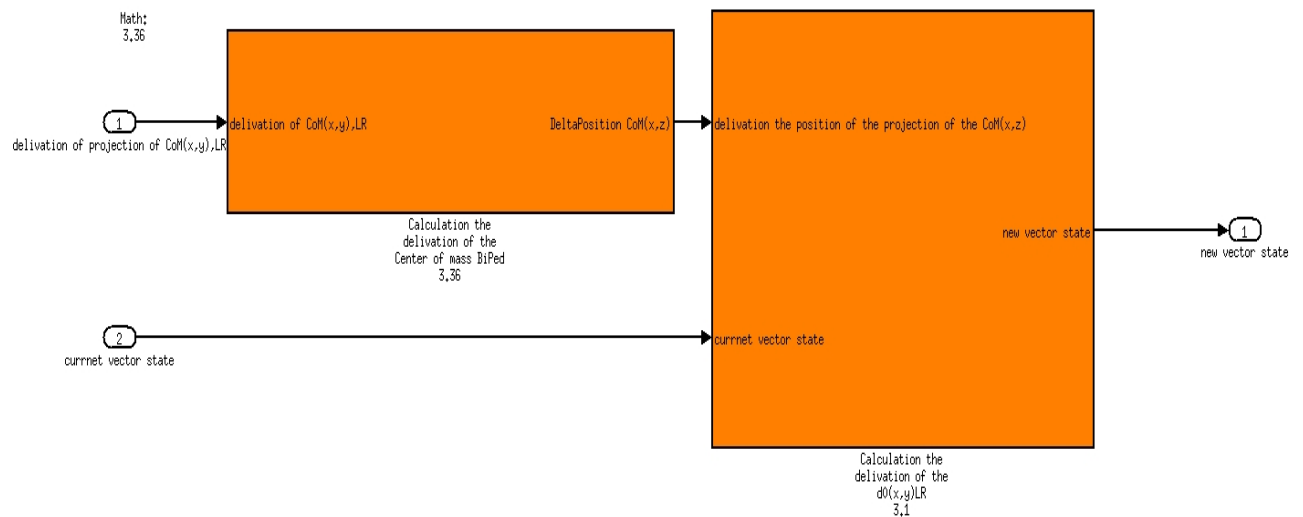


Рисунок 4.3 - Структурна схема ПСЗ для обрахунку вектору стану АКА з найбільшим запасом стійкості

Вихідною групою параметрів підсистеми є новий вектор стану (*new vector state*), при якому АКА характеризується найбільшим запасом стійкості на ОП.

Вихідні параметри ПСЗ є вихідними параметрами блоку 4. Ці параметри попарно характеризують відхилення кінематичного стану апарата від його нового стану, що характеризується найбільшим запасом стійкості. Відхилення кінематичного стану задається відхиленнями значень кутів у шарнірах апарата. Ці відхилення у вигляді парного вектору стану надходять до блоку 5, який виконує задачу регулювання взаємного положення ланок АКА. Даний блок складається з груп *PID*—регуляторів, які розгруповані за індексом ноги та індексом шарніра. Загальна схема застосування регуляторів показана на рис. 4. 4.

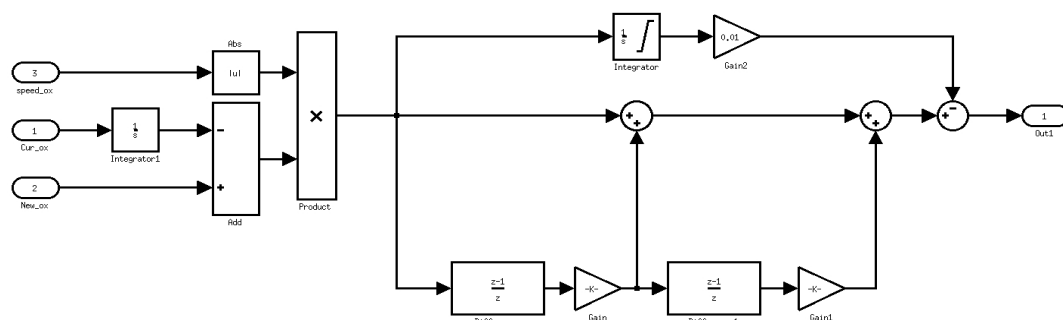


Рисунок 4.4 - Структурна схема регулятора кінематичного положення АКА у складі блоку 5 СУ стійкістю АКА

Блок 5 реалізується функцією

$$y = [[P\delta\alpha] + [D_1 \frac{d\delta_{alpha}}{dt}] + [\frac{d\delta_{alpha}}{dt}]] - [I \int_{t=t-1}^{t=1} \delta\alpha dt], \quad (4.1)$$

де $\delta\alpha = [\alpha_{new} - \int \%v_{cur} dt]$; α_{new} – заданий кут кінематичної пари ланок; v_{cur} – поточний кут кінематичної пари ланок; u – швидкість сходження кутів; t – час; P, D_1, D_2, I – коефіцієнти складових регулятора.

На основі регулятора різниці кута (рис. 4. 4), формується передатна функція, вихідним значенням якої є крутний момент. Значення крутних моментів подаються у блок 6.

Блок 6 містить комп'ютерні моделі АКА і ОП, що описані за допомогою системи твердих тіл (кінематичні ланцюги ланок), шарнірів, актуаторів та датчиків кутів. Модель ОП, яка реалізована у блоці 6, задана структурною схемою, яка наведена на рис. 4. 5. Структурну схему всього блоку показано на рис. 4.6.

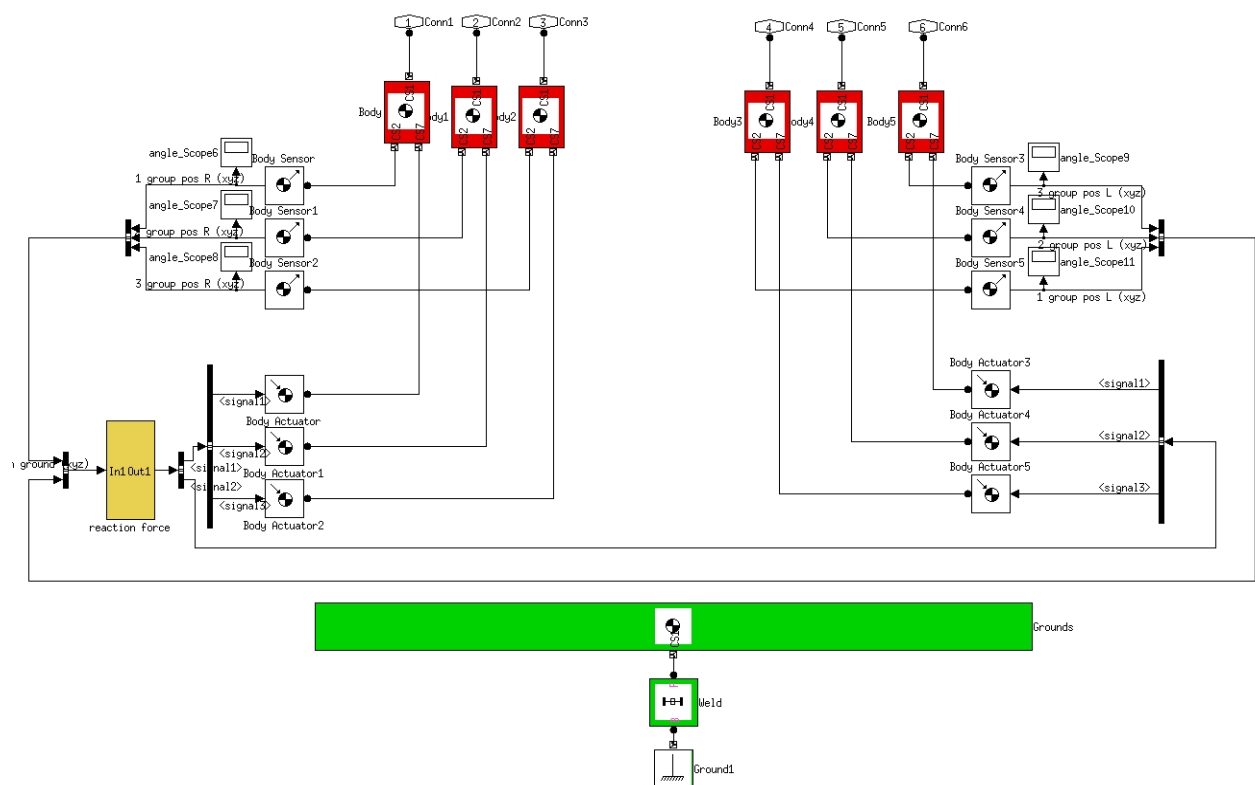


Рисунок 4.5 - Структурна схема комп'ютерної моделі ОП

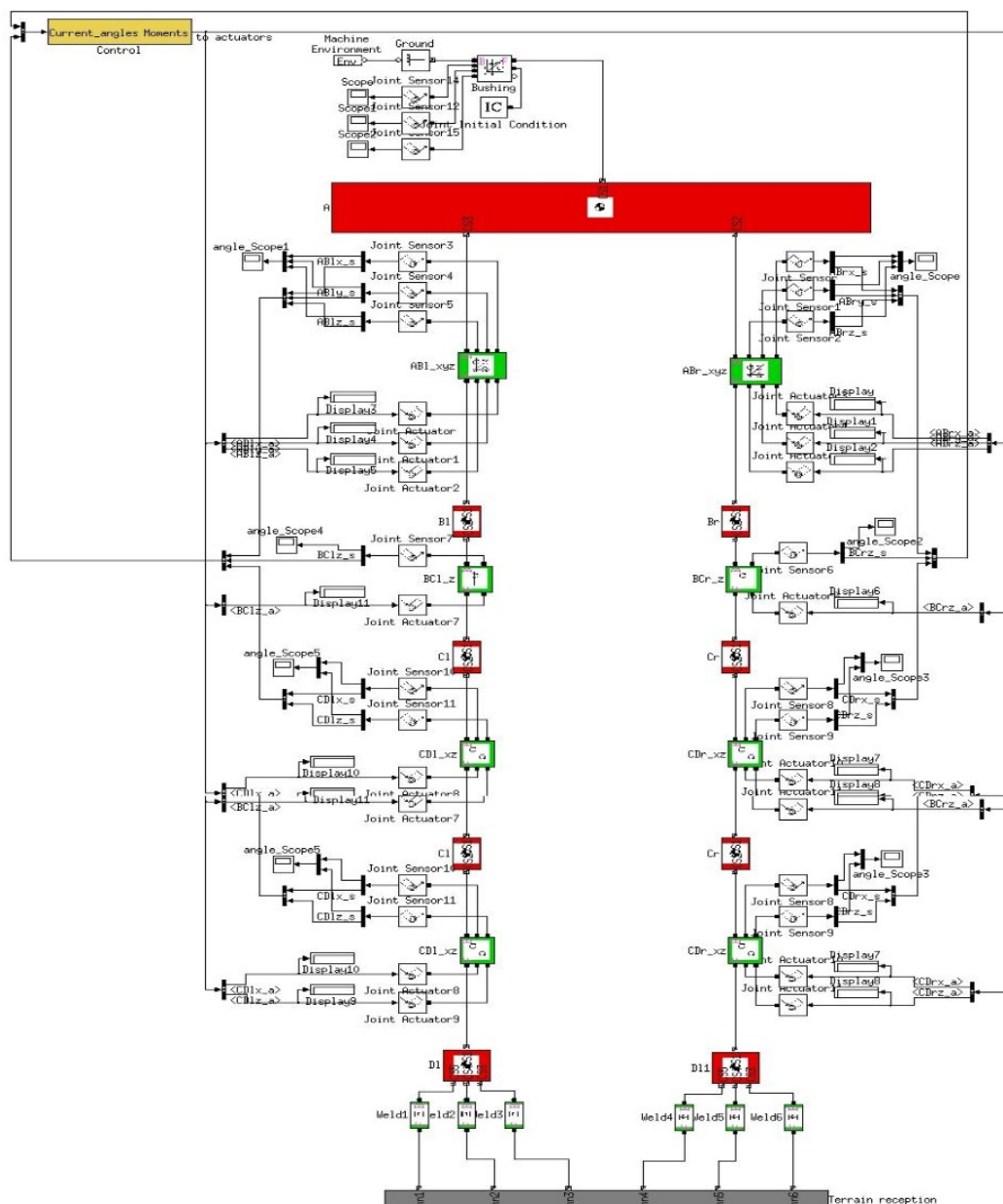


Рисунок 4.6 - Структурна схема комп'ютерної моделі АКА і її взаємодія з моделлю ОП і СУ забезпечення стійкості АКА

4. 2. Результати дослідження

Для дослідження працездатності запропонованого методу дотримання стійкого положення АКА на ОП здійснено симуляцію поведінки апарата у таких умовах:

- у початковий момент часу система сил і моментів збалансована внутрішніми силами і моментами АКА;
- у початковий момент часу система сил і моментів розбалансована у зв'язку з дією на АКА сторонніх сил, які прикладені до його корпусу у площині ОП.

У першому випадку СУ АКА виконує задачу дотримання стійкості при малих відхилення ТПЦМ від положення з найбільшим запасом стійкості. У другому

випадку, ТПЦМ АКА знаходиться у граничній зоні опори апарата, тому СУ АКА працює у режимі випадках великих відхилень від області найбільшого запасу стійкості.

Для зображення поведінки СУ побудовано 3D симуляцію взаємодії СУ, моделі АКА і моделі ОП, яка реалізована на базі моделей (рис. 4. 5, рис. 4. 6) з використанням *MatLab Simulink SimMechanics I-generation*.

Так для випадку збалансованих моментів і сил, поведінка АКА на ОП матиме вигляд, зображений на рис. 4. 7.

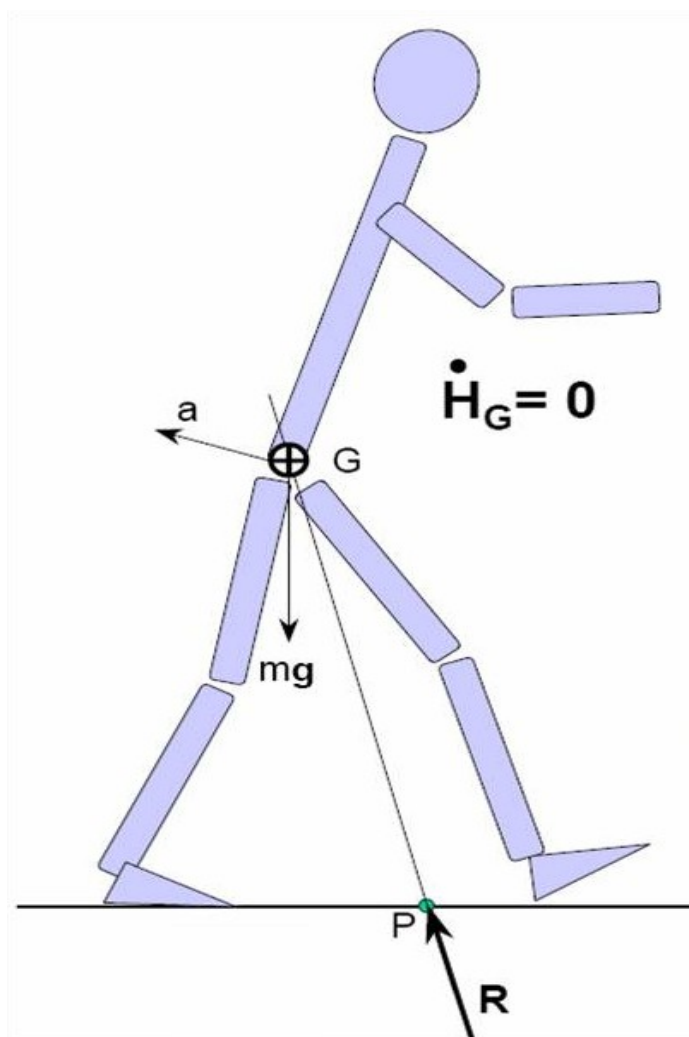


Рисунок. 4. 7 - Модельна поведінка АКА у випадку збалансованих сил і моментів визначена:
 H_G - сума сил і моментів; G -ТЦМ; a - прискорення ТЦМ; mg -маса і гравітація; P - ТПЦМ
 R - сили реакції ОП

Похибка відхилення положення ТЦМ АКА, у цьому випадку, характеризується графіком (рис. 4. 8.) і обумовлена зміщенням ТЦМ ланок стопи відносно осі ланок A, Bl, Br, Cl, Cr .

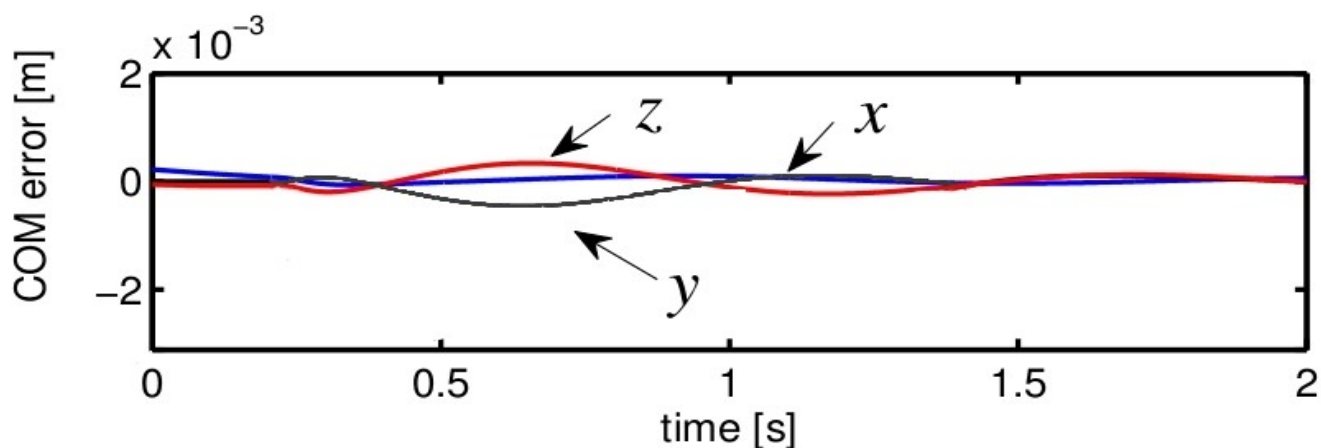


Рисунок 4.8 - Похибка положення ТЦМ АКА у площинах x , y , z його переміщення

Коливальна поведінка ТЦМ пов'язана з інерційністю ланок D .

Розподіл зовнішніх сил у площинах, що побудовані на x, y, z зображено на рис. 4. 9.

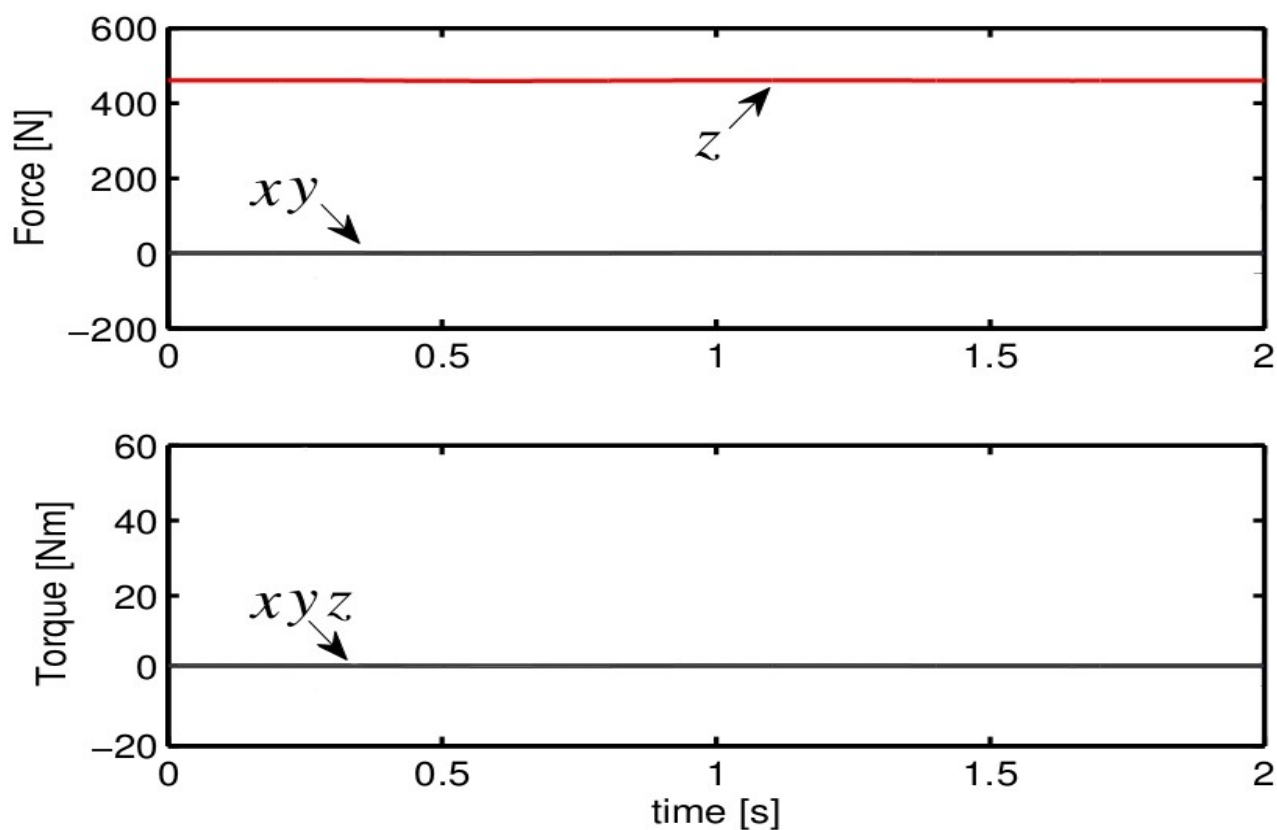


Рисунок 4.9 - Розподіл сил і моментів, котрі діють на АКА ззовні: x - сили і моменти у площині x ; y - сили і моменти у площині y ; z - сили і моменти у площині z

Розподіл сили реакції ОП вздовж осей x, y, z показано на графіках (рис. 4. 10).

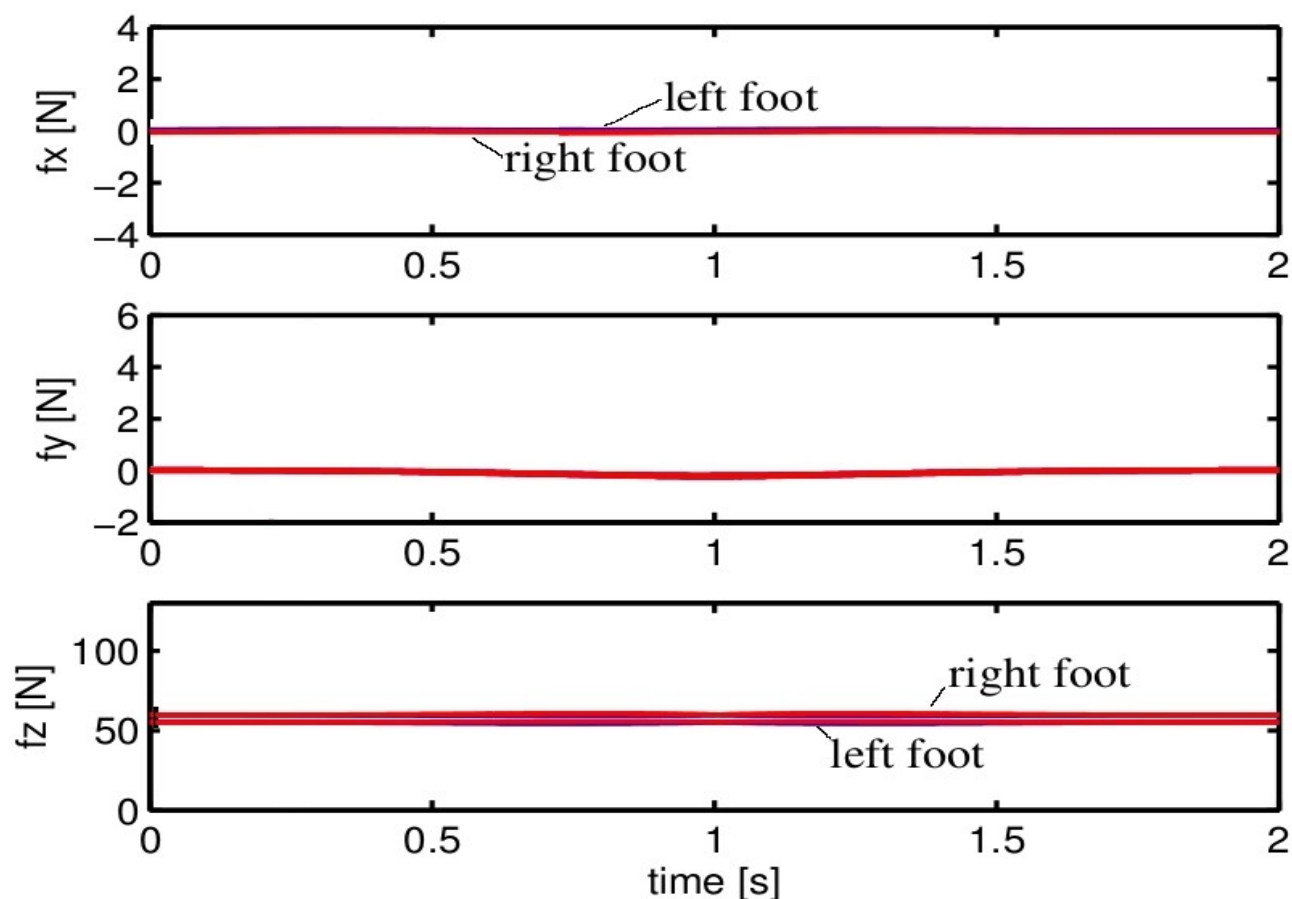


Рисунок 4.10 - Розподіл сили реакції ОП на областях стоп АКА, описаний відносно осей x (a), y (b), z (c) і визначений на проміжку часу $t=(0:0.5:2)[c.]$

Графік *a* (рис. 4. 10) описує розподіл сили реакції ОП вздовж осі x . Подвійна лінія описує розподіл сили реакції правої стопи. При цьому, більша амплітуда спостерігається на частині стопи зі сторони прикладення сили. Червона частина графіка описує розподіл сили реакції ОП на лівій стопі. Для лівої стопи, як і для правої характерним є збільшення амплітуди розподілу сили реакції зі сторони прикладення зовнішньої сили.

Графік *b* (рис. 4. 10) описує розподіл сили реакції ОП вздовж осі y . На графіку спостерігаються перехід через нуль розподілу сили реакції у часі, що обумовлено маятниковим ефектом і перерегулювання СУ. За умови перпендикулярності прикладеної зовнішньої сили, сила реакції ОП має ідентичний розподіл у часі на обох стопах АКА.

Графік *c* (рис. 4. 10) описує розподіл сили реакції ОП на стопах АКА вздовж “вертикальної” осі z . Кожна з ліній (синя, червона) характеризує силу реакції ОП у передній, задній, лівій і правій частинах лівої і правої стопи відповідно. На графіку

спостерігається стрибок сили реакції до *Left*: $(130N + 113N + 57N + 55N)$ — *Rigth*: $(-124N - 133N - 46N - 34N)$. Такий стрибок характерний для відриву однієї стопи від ОП і переміщенні всієї ваги АКА на протилежну стопу. Після переміщення ТЦМ АКА у область найбільшого запасу стійкості сила реакції рівномірно розподілиться по всій поверхні й поверхні стоп.

Для підтримання стійкого положення підсистеми, що містять регулятори компенсують силу тяжіння та інерцію ланок апарата. Для цього з моделі АКА зчитуються значення кутових швидкостей кінематичних пар. На основі цих даних визначається відхилення кутового положення пари ланок і формується передатна функція, вихідним значення якої є момент, який передається на актуатори АКА. Виокремлена структурна схема блоку регулювання положення кутових ланок АКА показана на рис. 4. 11.

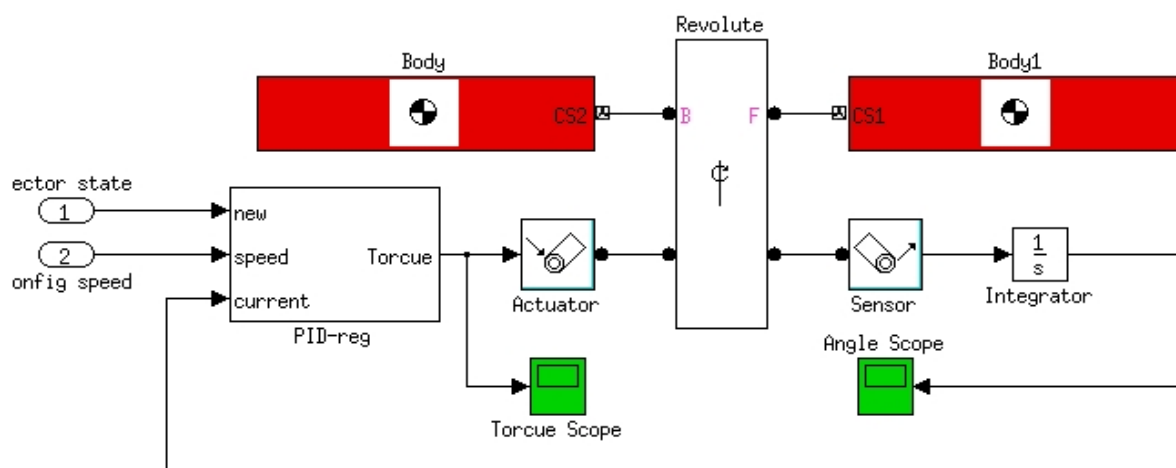


Рисунок 4.11 - Вибіркова структурна схема взаємодії СУ з актуаторами і сенсорами моделі АКА:

Efactor state — нове значення положення ланки ; *Config Speed* — швидкість сходження кута кінематичної пари; *PID-reg* — підсистема з регулятором; *Actuator* — підсистема імітації приводу; *Torque Scope*, *Angle Scope* — засоби моніторингу зміни моменту і кута; *Sensor* — підсистема імітації сенсорної системи для визначення поточного кута; *Body*- ланка АКА ; *Revolute* — шарнір апарата

Значення моментів у всіх кінематичних парах і відповідні значення кутів у шарнірах наведені у додатку В у відповідності до структури моделі апарата (рис. 4. 5, рис. 4. 11).

Похибка відхилення положення ТЦМ АКА зображена на графіку (рис. 4. 12.).

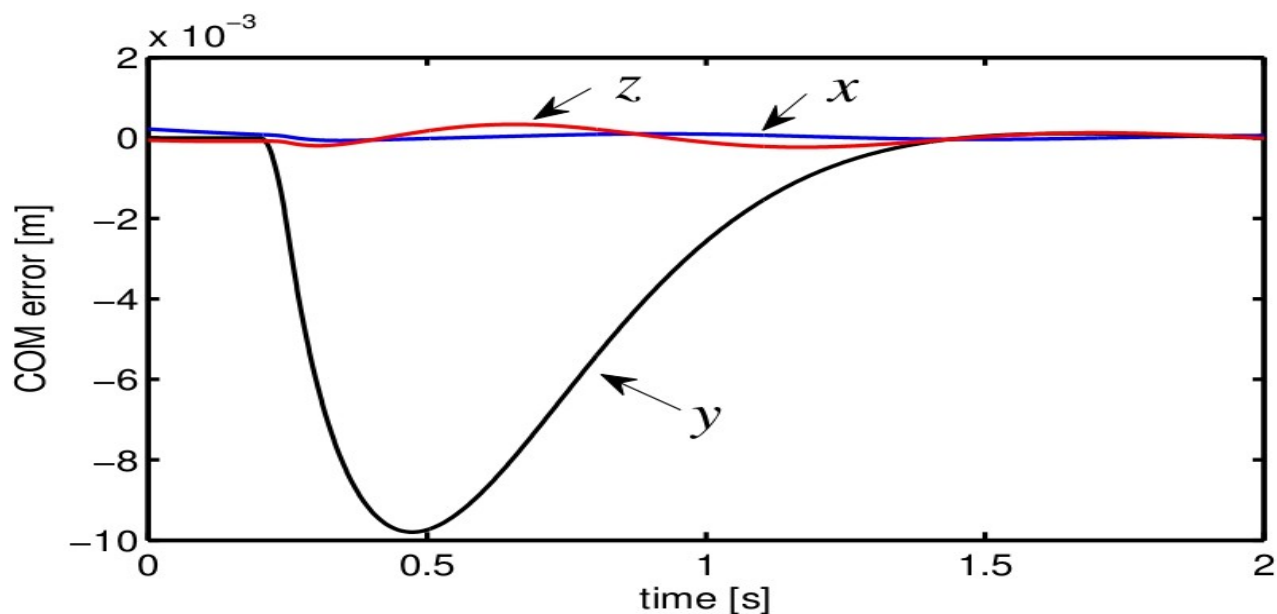


Рисунок 4.12 - Похибка положення ТЦМ АКА у проекціях на осі x, y, z

Розподіл зовнішніх сил, що прикладені до АКА у площинах побудованих на x, y, z показано на рис. 4. 13.

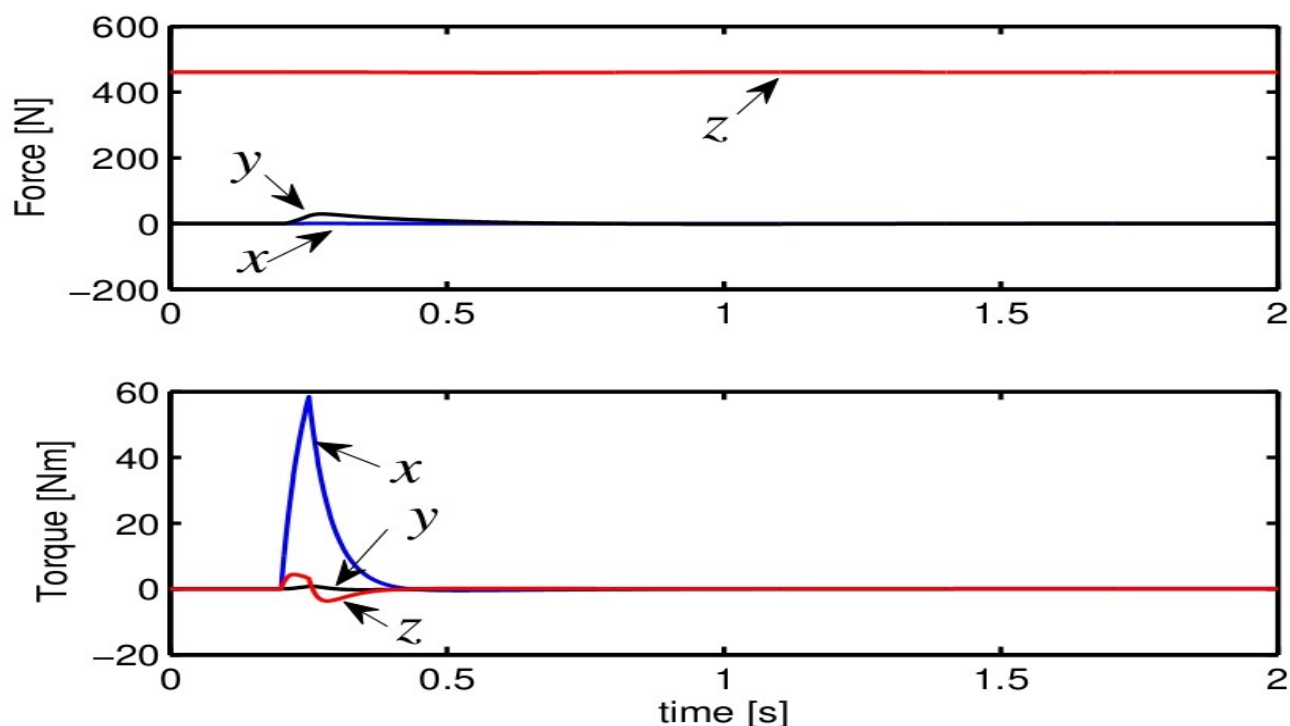


Рисунок 4.13 - Розподіл сил і моментів, які діють на АКА ззовні:

a - дія сил; b - дія моментів; $Force[N]$ - діапазон сили, що діє на АКА; $Torque[Nm]$ - діапазон моментів, що діють на АКА.

Розподіл сили реакції ОП вздовж осей x, y, z зображено на графіках (рис. 4. 14).

У випадку прикладання до ланок АКА зовнішньої сили $F=120N$ спостерігається стабілізація положення ТПЦМ АКА у області стопи з найбільшим

запасом стійкості. Відповідно до цього положення ТЦМ АКА переміщується із зменшенням амплітуди (рис. 4.14).

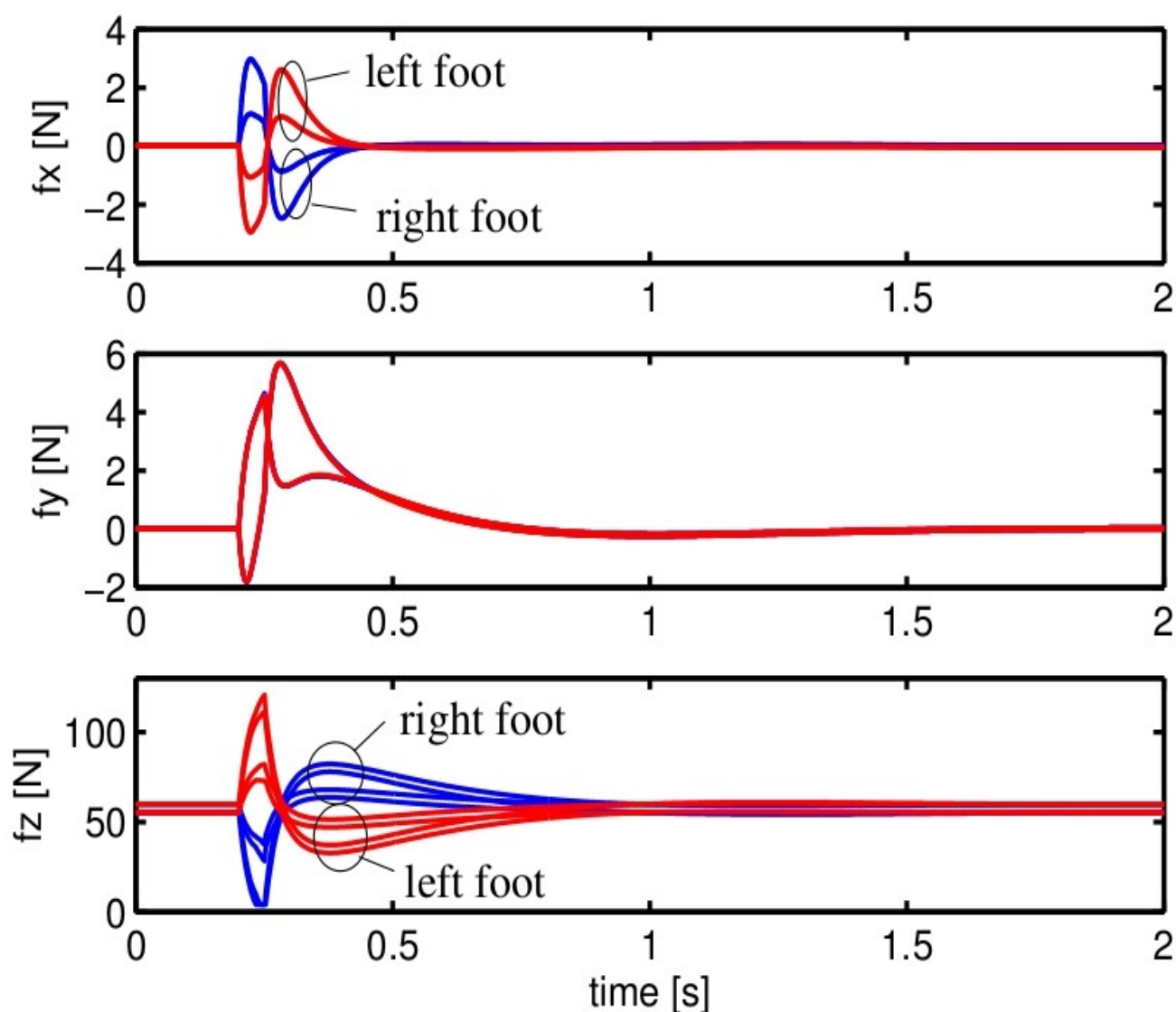


Рисунок 4.14 - Розподіл сили реакції ОП на областях стоп АКА, описаний відносно осей x (a), y (b), z (c) і визначений на проміжку часу $t=(0:0.5:2)[с.]$

Значення моментів у всіх кінематичних парах і відповідні значення кутів у шарнірах показані у ДОДАТКУ В згідно з структурою моделі (Рис. 4. 5., Рис. 4. 11).

4. 3. Висновки до розділу

По четвертому розділу дисертації можна зробити такі висновки:

1. Проведений структурний синтез системи управління усталеним рухом АКА на довільній ОП, за результатами якого побудована структурно-функціональна схема системи управління усталеним рухом АКА на довільній ОП, яка

дозволяє вирішувати задачу дотримання і відновлення положення апарата з найбільшим запасом його стійкості в умовах довільної ОП. Для синтезу системи управління застосовано критерії і стратегію дотримання усталеного руху, а також методи комп'ютерного моделювання кінематичних зв'язків і динамічної поведінки АКА. Це дало змогу підвищити швидкість відновлення усталеного руху АКА та забезпечити найбільший запас стійкості апарата на довільній ОП.

2. Виконано ситуаційне моделювання роботи системи управління усталеним рухом АКА на довільній ОП. Для перевірки ефективності роботи СУ проведено дослідження працездатності СУ у типових випадках втрати усталеного руху апарата. Так, у результаті проведеного моделювання встановлено придатність запропонованої СУ для управління усталеним рухом АКА у випадках, коли критерії усталеного руху є порушеними у результаті впливу зовнішніх факторів на АКА і у випадку початково заданих передумов його падіння.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі проведених досліджень вирішено актуальне наукове завдання: розроблені методи і засоби управління усталеним рухом антропоморфного крокуючого апарата на довільній опорній поверхні. У ході роботи отримано такі основні теоретичні та практичні результати:

- На основі проведеного аналізу літературних джерел визначені основні характеристики будови і методи управління антропоморфними крокуючими апаратами в умовах довільної ОП, які базуються на визначенні ТЦМ і розташуванні точки нульового моменту. На основі аналізу цих методів знайдені критичні характеристики ОП, при яких АКА не здатний зберігати усталений рух. Визначені і описані особливості цих умов.
- На основі проведеного аналізу умов збереження усталеного руху АКА на довільній ОП синтезовано аналітичну та комп'ютерну моделі кінематичних зв'язків і динамічної поведінки апарата в умовах його взаємодії з ОП. Особливістю запропонованих моделей є достовірність їхньої поведінки у описаних умовах середовища, яка забезпечується використанням канонічних методів аналітичної динаміки для формалізації АКА та комп'ютерних методів для опису його взаємодії з ОП.
- Запропоновано стратегію відновлення і дотримання усталеного руху АКА на довільній ОП, яка ґрунтується на визначенні оптимального і поточного положення ТПЦМ та мінімізації їхньої розбіжності за рахунок зміни розташування ТЦМ апарата. Така стратегія дозволяє відновити усталений рух АКА в умовах, коли його ТПЦМ знаходиться за межами контуру стопи апарата.
- На основі стратегії відновлення та дотримання усталеного руху АКА та властивостей моделей апарату розроблені критерії дотримання усталеного руху апарата на довільній ОП, які базуються на моніторингу розподілу сил реакції ОП та дозволяють визначити поточне положення ТПЦМ АКА незалежно від його динамічної поведінки. Також визначені критерії оцінювання запасу стійкості АКА на довільній ОП, що ґрунтуються на

характері розподілу сил реакції ОП і дозволяють визначити максимальне відхилення ТЦМ АКА від його поточного положення з точністю до 1.27 мм, що на 75-80% перевищує існуючі методи.

- Синтезовано систему управління усталеним рухом АКА, яка дає змогу задавати положення кутів кінематичних пар апарата відповідно до позиції його ТПЦМ і дозволяє підвищити запас стійкості при усталеному русі АКА на 45-50%.
- Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення системи управління усталеним рухом АКА на довільній поверхні, що дає змогу здійснити практичну реалізацію запропонованої стратегії управління.

Сукупність отриманих результатів дає змогу ставити і розв'язувати важливі задачі комп'ютерної імітації та фізичного відтворення антропоморфних крокуючих апаратів.

Розроблені аналітичні критерії та методи дотримання усталеного руху антропоморфного крокуючого апарата дають змогу розраховувати кінематичні та динамічні характеристики руху. Запропоновані методи можуть застосовуватися для синтезу систем управління усталеним рухом антропоморфних крокуючих апаратів. Описані підходи дотримання усталеного руху також можуть бути використані для обрахунку параметрів протезування, проектування ортопедичного устаткування тощо. Математичні методи пошуку оптимального місцезнаходження точки проекції центру мас на опорній поверхні антропоморфного крокуючого апарата можуть бути широко використані для вдосконалення існуючих та розробки нових ефективних систем керування різноманітного призначення.

ЛІТЕРАТУРА

3. Алексеев В. М., Тихомиров В. М., Фомин С. В. Оптимальное управление. – Москва : Наука, 1979. – 432 с.
4. Базара М., Шетти К. Нелинейное программирование: Теория и алгоритмы. – Москва : Мир, 1982. – 583 с.
5. Баскакова Н. В., Витензон А. С. Влияние темпа и длины шага на основные параметры ходьбы человека // Биомеханика. Рига: 1975. – С. 242–247.
6. Белецкий В. В. Двухногая ходьба: Модельные задачи динамики и управления. – Москва : Наука. – 1994. – 286 с.
7. Белецкий В. В. Регулярные и хаотические движения корпуса двухногоходящего аппарата: препр./ АН СССР. Ин-т прикл. математики им. М. В. Келдыша. – Москва, 1990. – №52. – 30 с.
8. Белецкий В. В., Бербюк В. Е., Самсонов В. А. Параметрическая оптимизация движений двухногого шагающего аппарата // Изв. АН СССР, МТТ. – 1982. – №1. – С. 28–40.
9. Белецкий В. В. Двухногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. – Москва : Наука, 1984. – 228с.
10. Бербюк В. Е., Демидюк М. В., Ивах Г. Ф. Задачи оптимизации конструкций и законов управления движением электромеханических манипуляторов // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1987. – №3. – С. 113–123.
11. Бербюк В. Е., Демидюк М. В., Красюк Г. В., Ковалько М. Т., Качер В. С. Автоматизированный сбор, обработка и анализ биомеханических данных ходьбы человека // Вестник Харьковского государств. политехн. университета: Системный анализ, управление и информационные технологии. 1999. – Вып. 73. – С. 7–13.
12. Бербюк В. Є. Математичне моделювання ходи людини на підставі експериментальних даних / В. Є. Бербюк, М. В. Демидюк, Б. А. Литвин // 2000.

13. Бербюк В. Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем. – Киев : Наукова думка, 1989. – 187 с.
14. Бербюк В. Е., Нищенко Н. И. Энергетически-оптимальное управление движением человека в фазе опоры на протезированную ногу // Проблемы управления и информатики. – 1997. – №2. – С. 75–86.
15. Бербюк В. Є., Красюк Г. В., Ніщенко Н. І. Математичне моделювання динаміки ходи людини у сагітальній площині // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 1997. – Т. 40, №4. – С. 127–138.
16. Бербюк В. Є., Ніщенко Н. І. Математичне проектування енергетично-оптимальних протезів стегна // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 1998. – Т. 41, №3. – С. 110–117.
17. Бернштейн Н. А. О построении движений. – Москва, 1967.
18. Богданов В. А. Элементы биомеханики тела человека // Физиология движений. – Л.: Наука, 1976. – С. 5–37.
19. Богданов В. А., Гурфинкель В. С. Биомеханика локомоций человека // Физиология движений. – Л.: Наука, 1976. – С. 276–315.
20. Болотин Ю. В., Новожилов И. В. Управление походкой двуногого шагающего аппарата // Изв. АН СССР. МТТ. – 1977. – №3. – С. 47–52.
21. Бордюг Б. А., Ларин В. Б., Тимошенко А.Г. Задачи управления шагающими аппаратами. – Киев : Наукова думка, 1985. – 264 с.
22. Бордюг Б. А., Ларин В. Б. Моделирование движения электромеханического шагающего аппарата // Проблемы управления и информатики. – 1995. – № 4. – С. 115–119.
23. Брискин Е. С. О минимизации энергозатрат при движении шагающей машины с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, Я.В. Калинин // 2009.
24. Бублик Б. Н., Кириченко Н. Ф. Основы теории управления. – Киев: Выща школа, 1975. – 328 с.

25. Величенко В. В, Матрично-геометрические методы в механике с приложениями к задачам робототехники, 1988
26. Витензон А. С. Динамические фазы цикла ходьбы // Биомеханика.– Рига, 1975. – С. 251–257.
27. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. – Москва : Мир, 1976. – 543 с.
28. Глушков В. Енциклопедія кібернетики – 1974.
29. Голубничий Н. И. Беседы по автоматике / Н. И. Голубничий, Г. Ф. Зайцев, М. А. Иващенко, П. И. Чумаков // Київ : “Техніка”, 1971. – 232 с.
30. Гриценко Г. П., Морейнис И. Ш. Энергетическая оценка ходьбы человека в норме и на протезах бедра // Биомеханика. Рига, 1975.– С. 228–232.
31. Гуменний Д. О. Адаптивна система автоматичного керування з дуальним спостерігачем та пам'яттю / Д. О. Гуменний, В. В. Курбанов // Київ : “Поліком”, 2010. – С. 78–85.
32. Девянин Е. А., Ленский А. В., Самсонов В. А. Задача управления движением шагающего аппарата // Биомеханика. Рига: 1975.– С. 640–643.
33. Донской Д. Д. Биомеханика. – Москва : Просвещение, 1975. – 239 с.
34. Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л. Методы сплайн-функций. – Москва : Наука, 1980. – 352 с.
35. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. 2-е изд., перераб. и доп. / Г. Ф. Зайцев. Киев : Выща школа. Головное изд-во, 1988. – 431 с.
36. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій. Підручник. Сьоме видання, перероблене та доповнене – , 2006.
37. Иванов А. О. Теорія автоматичного керування: Підручник – 2003.
38. Кириченко Н. Ф., Сопронюк Ф. А. Кинематические и динамические модели мехатронных систем // Проблемы управления и информатики. – Киев. 1995, №6.

– С. 116–127.

39. Кисленко Ю. И. Тактильное очувствление шагающего робота / Техническая кибернетика, 1991. – № 6. – С. 62–50.
40. Ковалев А. М. Нелинейные задачи управления и наблюдения в теории динамических систем. – Киев : Наукова думка, 1980.
41. Ковальчук Л. В. Способы повышения быстродействия в процессах медианной фильтрации // Управляющие системы и машины. – 1998. №2. – С. 13–15.
42. Крак Ю. В. Координационный подход к организации движения манипуляционных роботов // Проблемы управления и информатики. – 1995. – № 4. – С. 120–128.
43. Красовский Н. Н. Теория управления движением. – Москва : Наука, 1968. – 478 с.
44. Лавровский Э. К. Динамика двуногой ходьбы при больших скоростях движения // Изв. АН СССР. МТТ.– 1980.– №4.– С. 50–58.
45. Ларин В. Б. Управление шагающими аппаратами. – Киев : Наукова думка, 1980. – 168с.
46. Ларин В. Б. Управление статически неустойчивыми шагающими аппаратами // Прикл. механика. – 2000.– Т. 36, №6.– С. 37–66.
47. Ларин В. Б. Задачи управления шагающими машинами // Прикл. механика.– 1993. Т. 29, №10.– С. 123–129.
48. Ларин В. Б., Матиясевич В. М. К вопросу построения модели прыгающего аппарата // Прикл. механика.– 2002. – Т. 38, №10. – С. 130–137.
49. Маркеев А. П. Теоретическая механика. – Москва : Наука, 1990. – 416 с.
50. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы: Пер. с фр.– Москва : Наука, 1990.– 488 с.
51. Морейнис И. Ш., Гриценко Г. П., Левит С. Г. Биомеханический анализ ходьбы в норме и на протезах // Протезирование и протезостроение. Москва : ЦНИИПП,

1971, вып. 26. – С. 7–16.

52. Морейнис И. Ш., Славущий Я. Л., Курильская Н. А. и др. Математическое моделирование ходьбы и электромиография // Протезирование и протезостроение. – Москва : ЦНИИПП, 1969, вып.22. – С. 109–118.
53. Новожилов И. В. Управление ногой шагающего аппарата в фазе опоры / Биомеханика. Рига, 1975, С. 634–639.
54. Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата.– Москва : Наука, 1984.– 312 с.
55. Питкин М. Р. Кинематический и динамический анализ ходьбы человека / Биомеханика. Рига, 1975, С. 279–282.
56. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – Москва : Наука, 1976. – 392 с.
57. Попов Е. П., Теория нелинейных систем автоматического регулирования управления – , 1979.
58. Пшеничный Б. Н., Данилин Ю. М. Численные методы в экстремальных задачах. – Москва : Наука, 1975. – 320 с.
59. Скворцов Д. В. Клинический анализ движений. Анализ походки. – Иваново : Издательство НПЦ “Стимул”, 1996. – 344 с.
60. Скопецкий В. В., Стоян В. А., Кривонос Ю. Г., Математичне моделювання прямих та обернених задач динаміки систем з розподіленими параметрами. – Київ : Наукова думка, 2002.– 361 с.
61. Стрижак Т. Г. Метод усреднения в задачах механики, 1982.
62. Тимофеев А. В. Управление роботами. – Ленинград : Ленинградского университета, 1986. – 240 с.
63. Ткач М. М. Математичне моделювання кінематичних зв'язків антропоморфного крокуючого апарата / М. М. Ткач, Д. О. Гуменний // 2014.
64. Ткач М. М. Математичний опис рівноваги двоногої локомоції / М. М. Ткач, Д.

- О. Гуменний // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2012. №20. – С. 146–152. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/asau_2012_20_22.
65. Ткач М. М. Моделювання руху антропоморфного крокуючого апарата на довільній твердій поверхні / М. М. Ткач, Д. О. Гуменний // , 2012.
 66. Ткач М. М. Оптимізація управління запасами матеріальних ресурсів на підприємстві / М. М. Ткач, Д. О. Гуменний // , 2014.
 67. Ткач М. М. Система управління дотримання рівноваги антропоморфним крокуючим апаратом / Ткач М. М., Гуменний Д. О. // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2014. №24. – С. 139–152. Режим доступу: <http://asac.kpi.ua/article/download/38200/34398>.
 68. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. – Москва : Наука, 1978. – 486 с.
 69. Формальский А. М. Управление движением шагающих аппаратов / Развитие общей механики в России и на Украине 20-80-е годы XX века. – Москва : Наука; Киев : Феникс, 1998. – 404 с.
 70. Формальский А. М. Перемещение антропоморфных механизмов. – Москва : Наука, 1982. – 368 с.
 71. Щербатий М., Мацьонг Я. Оптимальне керування та ідентифікація параметрів у системах звичайних диференціальних рівнянь // Вісник Львів. ун-ту Сер. прикл. матем. інформ. – 2003. – Вип. 7. – С. 224–233.
 72. Abba G. Robot dynamic modeling using a power flow approach with application to biped locomotion / G. Abba, N. Chaillet // Williams, 1999. – 660 p.
 73. Adolfsson J. 3D passive walkers: finding periodic gaits in the presence of discontinuities / J. Adolfsson, H. Dankowicz, A. Nordmark // Springer, 2001. – 205–229 p.
 74. Aguiar A. P. Path-following for nonminimum phase systems removes performance limitations // IEEE Transaction and Automation vol.50 iss.2, 2005. – 234–239 p.
 75. Ahmadi M. Stable control of a simulated one-legged running robot with hip and leg

compliance / M. Ahmadi, M. Bhler // IEEE Transaction and Robotics Vol.13 iss.1, 1997. – 96–104 p.

76. Aldebaran Robotics. Humanoid robotics & programmable robots [Электронный ресурс] . Режим доступа: <http://www.aldebaran.com/en>
77. Aleshinsky S.Yu. An energy “sources” and “fraction” approach to the mechanical energy expenditure problem // J. Biomechanics. – 1986. – Vol. 19, №.4. – P. 287–316.
78. Aleshinsky S. Yu., Zatsiorsky V. M. Human locomotion in space analyzed biomechanically through a multi-link chain model // J. Biomechanics. – 1978.– Vol. 11. P. 101–108.
79. Alexander R. McN. Three uses for springs in legged locomotion / The International Journal of Robotics Research Vol.9 no.2, 1990. – 53–61 p.
80. Ames A. D. Stably extending two-dimensional bipedal walking to three / Aaron D. Ames, Robert D. Gregg // IEEE American Control Conference, New York, NY, 2007. – 2848–2854 p.
81. Aoustin Y. Design of reference trajectory to stabilize desired nominal cyclic gait of a biped / Y. Aoustin, A. Formal'sky // IEEE Robot Motion and Control, Kiekrz, 1999. – 159–164 p.
82. Aoustin Y. Stability of a cyclic biped gait and hastening of the convergence to it / Y. Aoustin and A. Formal'sky // Robotica Vol.22 no.1, 2004. – 15–28 p.
83. Arena P. The Central Pattern Generator: a paradigm for artificial locomotion // Soft Computing. – 2000. – Vol. 4, №4. – P. 251–266.
84. Arnol'd V. Mathematical Methods of Classical Mechanics – Springer, New York, 1989. – 536 p.
85. Arvidson R. Results From The Mars Phoenix Lander Robotic Arm Experiment / R. Arvidson, R. Bonitz, M. Robinson, J. Carsten, R. Volpe, A. Trebi-Ollennu, et al. // Journal of Geophysical Research, vol. 114, 2009.
86. Asano F., Yamakita M., Kamamichi N., LUO Z.-W. A novel gait generation for biped walking robots based on mechanical energy constraint // Proc. 2002 IEEE/RSJ

Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems EPFL, Lausanne, Switzerland. October 2002. P. 2637–2644.

87. Bainov D. D. Systems with Impulse Effects : Stability, Theory and Applications / D. D. Bainov, P. S. Simeonov // Chichester, Ellis Horwood Limited / John Wiley & Sons, 1989. – 255 p.
88. Banks S. P. Control Systems Engineering / Pentice Hall, Englewood Cliffs, 1986.
89. Beckett R., Chang K. An evaluation of kinematics of the gait by minimum energy // J. Biomechanics. – 1968. – Vol. 1. – P. 147–159.
90. Benallegue M., Laumond J-P. and Berthoz A., Contribution of Actuated Head and Trunk to Passive Walkers Stabilization, 2010
91. Berbyuk V. E. Dynamics and optimal control problems for biotechnical system “Man-Prosthesis” // IUTAM Symposium of Interaction Between Dynamics Control in Advanced Mechanical Systems, D. H. van Kampen editor, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.– 1996.– P. 28–35.
92. Berbyuk V. E. Multibody system modeling and optimization problems of lower limb prostheses // IUTAM Symposium on Optimization of Mechanical Systems, D. Bestle and W. Schiehlen (eds.), The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.– 1996. – P. 25–32.
93. Berbyuk V. E., Nishchenko N. I., Polishchuk A. D. Modeling of human locomotion with artificial lower extremities // Proceedings of the Eighth Biomechanical Seminar, Editor: C. Högfors and G. Andreasson, 1994, Göteborg, Sweden.– Vol. 8.– P. 167–178.
94. Berbyuk V., Boström A., Lytwyn B., Peterson Bo. Energy-Optimal Control of Bipedal Locomotion Systems // J. Stability and Control: Theory and Application (SACTA). – 2002. – Vol. 4. No 2. – P. 74–89.
95. Berbyuk V., Boström A., Lytwyn B., Peterson Bo. Optimization of Control Laws of the Bipedal Locomotion Systems // Advances in Computational Multibody Dynamics / J. Ambrosio, W. Schiehlen (eds.), IDMEC/IST. – Lisbon (Portugal). – 1999. –

P. 713–728.

96. Berbyuk V., Boström A., Peterson Bo, Demydyuk M., Lytwyn B. Modelling of Controlled Motion of Semi-Passively Actuated Bipedal Robot // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур в 2-х Т. – Львів, 2000.– Т. 2.– С. 275–278.
97. Berbyuk V., Peterson B., Nishchenko N., Linear viskoelastic actuator-based control system of a bipedal walking robot // Mechatronics' 98, J. Adolfsson and J. Karlsen, (eds.), Elsevier Science Ltd., 1998. – 379–384.
98. Bhat S. P. Finite-time stability of continuous autonomous systems – SIAM Journal on Control and Optimisation vol.38 no.3, 2006. – 751–766 p.
99. Brach R. M. Rigid body collisions / The International Journal of Robotics Research, vol.13 no.1, Texas. – 1994. – 82–92 p.
100. Brenner R. The Origins of Capitalist Development: a Critique of Neo-Smithian Marxism / R. Brenner – UK : 1977. – 204 p.
101. Brogliato B. Nonsmooth Mechanics: Models, Dynamics and Control / Springer Communications and Control Engineering, 2012. – 552 p.
102. Buher M. Koditschek, Kindlmann P. J. A family of robotucontrol strategies for intermittent dynamical environments / M. Buher, D. E. Koditschek, P. J. Kindlmann // IEEE Robotics and Automation, vol.3, 1989. – 1296–1301 p.
103. Buss M., Glocker M., Hardt M., von Stryk O., Bulirsch R., Schmidt G. Nonlinear hybrid dynamical systems: modeling, optimal control, and applications // Lecture notes in control and information science: modelling, analysis and design of hybrid systems. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. Vol. 279. P. 311–335.
104. Cabodevila G., Abba G. Quasi optimal gait for a bipedal robot using genetic algorithm // Proc. of IEEE conf. on System, Man and cybernetics. – Orlando (USA). –1997. – P. 3960–3965.
105. Canudas C. On the concept of virtual constraints as a tool for walkingrobot control and balancing / Elsevier Annular Reviews in Control vol.28 iss.2, 2004. – 157–166 p.

106. Canudas C. Orbital stabilization of under-actuated mechanical systems / C. Canudas, B. Espiau, C. Urrea // *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, Vol.12, iss.1 – 2012. – 711–712 p.
107. Carlton R. E. The evolution of the application of mobile robotics to nuclear cfacility operations and maintenance / R. E. Carlton, S. J. Bartholet // Anaheim, CA. : “Odetics, Inc.”, 1987. – 720–727 p.
108. Channon P. H. Optimal walking motions for abiped walking robot / P. H. Channon, S. Hopkins // *Robotica*, 10(2), 1990. – 165–72 p.
109. Chapman S. J. *Electric Machinery Fundamental Fourth Edition* / McGraw-Hill, Inc., 2004. – 302 p.
110. Cheng Y. Landmark Based Position Estimation for Pinpoint Landing on Mars / Y. Cheng A. Ansar // *Mobility Systems Concept Development Section Jet Propulsion Laboratory*, 2005
111. Chessé S., Bessonnet G. Optimal dynamics of constrained multibody systems. Application to bipedal walking synthesis // *Proc. of 2001 IEEE Int. conf on Robotics & Automation*. – 2001. P. 2499–2505.
112. Chevallereau C., Formal'sky A., Perrin B. Low energy cost reference trajectories for a biped robot // *Proc. of the 1998 IEEE Int. conf. on Robotics & Automation*. 1998. – P. 1398–1404.
113. Chow C. K., Jacobson D. H. Studies of human locomotion via optimal programming // *Mathem. Biosciences*. – 1971. – Vol. 10, №.3/4.– P. 239–306.
114. Dacic D. B. Path-following approach to control effort reduction of tracking feedback laws / D. B. Dacic, M. V. Subbotin and P. V. Kokotovic // *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006. – P. 1831–1837.
115. Dietrich M., Kedzior K., Rzymkovski C. Some theoretical and practical aspects of modeling and simulation of the human musculoskeletal system // *Human and Machine Locomotion*, A. Morecki and K. J. Waldron, (eds.), CISM Courses and Lectures No. 375, Springer-Verlag, Wien, New York.–1997.– P. 107–123.

116. Djoudi D. Contribution a la Commande de Robots Marcheurs / PhD Thesis, Ecole Central de Nantes, Universite de Nantes-France, 2007
117. Djoudi D. Fast motions in Biomechanics and Robotics, chapter Stability analysis of bipedal walking with control or monitoring of the center of pressure / D. Djoudi, C. Chevallereau // Of the series Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol. 340, 2006. – 95–120 p.
118. Djoudi D. Optimal reference motions for walking of a biped robot / D. Djoudi, C. Chevallereau, Y. Aoustin // Spain, Barcelona: International Conference on Robotics and Automation, 2005. – 2002–2007 p.
119. Dubovik Anatoly and D. I. Rublyov. After Makhno: The Anarchist Underground in the Ukraine in the 1920s and 1930s: Outlines of History & The Story of a Leaflet and The Fate of the Anarchist Varshavskiy (From the History of Anarchist Resistance to Totalitarianism) / A. Dubovik, D. I. Rublyov // Kate Sharpley Library, 2009. – 288 p.
120. Eng J. J. and Winter D. A. Kinetic analysis of the lower limbs during walking: what information can be gained from a three-dimensional model? // J. Biomechanics. – 1995.– Vol. 28, №.6.– P. 753–758.
121. Espiau B. BIP: a joint project for the development of an anthropomorphic biped robot / IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2000. – P. 3996–4001.
122. Formal'sky A. Locomotion of Anthropomorphic Mechanisms — Moscow, Nauka, 1982. – 382 p.
123. Formal'sky A. M. Ballistic locomotion of a biped. Design and control of two biped machines // Human and Machine Locomotion, A. Morecki and K. J. Waldron, (eds.), CISM Courses and Lectures No. 375, Springer-Verlag, Wien New York, 1997. – P. 191–229.
124. Frank L. Robot Manipulator Control. Theory and Practice / L. Frank, T. Abdallah, D. Dawson // USA, NY. : “Marcel Dekker Inc.”, 2006. – 614 p.
125. Fujimoto Y. Simulation of an autonomous biped walking robot including

environmental force interaction / Y. Fujimoto and A. Kawamura // 1998.

126. Fukuda F., Michelini R., Potkonjak V., Tzafestas S., Valavanis K., Vocobratovic M. How far away is “Artificial Man” / IEEE Robotics & Automation Magazine. March 2001. P. 66–73.
127. Furusho J. and Sano A. Sensor-based control of a nine-link biped // Int. J. Robot. Res. 1990. Vol. 9, No 2. P. 83–98.
128. Grishin A. A., Formal'sky A. M., Lensky A. M., Zhitomirsky S. V. Dynamic walking of a vehicle with two telescopic legs controlled by two drives // Int. J. Robot. Res. 1994. – Vol. 13, No 2. P. 137–147.
129. Hardt M., Kreutz-Delgado K., Helton J. W. Optimal biped walking with a complete dynamic model // Proc. 38th conference on decision and control, Phoenix AZ, USA, December 7–10 (IEEE 1999). – 1999. – P. 2999–3004.
130. Hardt M., von Stryk O. Dynamic modeling in the simulation, optimization, and control of bipedal and quadrupedal robots // ZAMM. Z. angew. Math. Mech. 2003. – Vol. 84, – No. 10. – P. 1–16.
131. Hatze H. A complete optimization of human motion // Math. Bios. – 1976. – Vol. 13. – P. 833–843. Hatze H. A comprehensive model for human motion simulation and its application to the take-off phase of the long jump // J. Biomechanics. – 1980. – Vol. 13. – P. 833–843.
132. Hatze H. A mathematical model for the computational determination of parameter values of anthropomorphic segments // J. Biomechanics. – 1981. – Vol. 14, №3. – P. 135–142.
133. Hatze H. and Venter A. Practical activation and retention of locomotion constraints in neuromusculoskeletal control systems models // J. Biomechanics. – 1981. – Vol. 14, №12. – P. 833–843.
134. Hatze H. Neuromusculoskeletal control systems modeling. – A critical survey of recent developments // IEEE Transactions on Automatic Control, 1980. – AC-25, №5. – P. 375–385.

135. Hatze H. The fundamental problem of myoskeletal inverse dynamics and its implications // Journal of Biomechanics. – 2002. – Vol. 35, №1. – P. 109–115.
136. Hatze H. The inverse dynamics problem of neuromuscular control // Biological Cybernetics. – 2000. – Vol. 82, №2. – P. 133–141.
137. Hirai K. The Honda humanoid robot // in Proc. 1997 IEEE-RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems, Grenoble, France, P. 499–508.
138. Humennyi D. A Hybrid Control Method for Stabilizing of Walking Robot on Irregular Surface Using Plantar Pressure Sensors / D. Humennyi, M. Tkach, A.Tchkalov // Eccomas thematic conference Multibody Dynamics, Croatia, Zagreb, 2013. – P. 207–208.
139. Humennyi D. Planning Algorithm of Quasi-Static Locomotion for Humanoid Robot Walking on Rough Terrain / Israel Conference on Mechanical Engineering, Israel, Tel Aviv, 2015. – P. 17–28.
140. Humennyi D. Return from Falling and Stabilization of Antropomorphiv Walking Robot nearby Stability Boundary / D. Humennyi, A. Chkalov //, 2015.
141. Jang, J.-S. R, Fuzzy Modeling Using Generalized Neural Networks and Kalman Filter Algorithm, 1991.
142. Kajita S., Yamaura T., Kobayashi A. Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit // IEEE Trans. Robot. Automat. –1992. Vol. 8, P. 431–438.
143. Koopman B., Grootenboer H. J. and Jongh H. J. An inverse dynamics model for the analysis, reconstruction and prediction of bipedal walking // J. Biomechanics.– 1995.– Vol. 28, №11.– P. 1369–1376.
144. Larin V. B. Control of walking machines // J. Biomechanics. – 1990. – Vol. 22, №1. – P. 3–7.
145. Larin V. B. Problems of control of a hopping apparatus // J. Franklin Inst. – 1998. – Vol. 335B, №3. – P. 579–593.
146. Larin V. B. Problems of control of machines that walk // Inter. Appl. of Mech.–

1993. – Vol. 29, №10. – P. 868–872.
147. McGeer T. Passive dynamic walking // Int. J. Robot Res.–1990.–Vol. 9.– P. 62–82.
 148. McGeer T. Passive walking with knees' // Proc. of IEEE conf. on Robotics & Automation.–Cincinnati.–1990.– P. 1640–1645.
 149. Miller W. T. III. Real-time neural network control of a biped walking robot // IEEE Contr. Syst. – 1994. – Vol. 14, P. 41–48.
 150. Miura H. and Shimoyama I. Dynamic walk of a biped // Int. J. Robot. Res. 1984. – Vol. 3, no. 2, P. 60–74.
 151. Morecki A. and Waldron (eds.), Human and Machine Locomotion, CISM Courses and Lectures No. 375, Springer-Verlag, Wien New York (1997).
 152. Morecki A. Modeling and Simulation of Human and Walking Robot Locomotion // Human and Machine Locomotion , A. Morecki and K. J. Waldron (eds.), CISM Courses and Lectures №375, Springer-Verlag, Wien, New York, 1997. – P. 1–78.
 153. Muybridge E. Animals in motion, 1957.
 154. Nagurka M., Yen V. Fourier-based optimal control of nonlinear dynamic system // Trans. ASME J. Dynamic Systems, Meas. and Contr. – 1990. – Vol. 112, №3. – P. 19–26.
 155. Nishiwaki K., Kagami S., Kuniyoshi Y., Inaba M., Inoue H. Toe joints that enhance bipedal and fullbody motion of humanoid robots // Proc. of 2002 IEEE int. conf. on Robotics & Automation. 2002. P. 3105–3110.
 156. Nuber Y., Contini R. A minimal principle in biomechanics // Bull. Math. Biophys. – 1961. – Vol. 23. – P. 377–391.
 157. Oberg T., Karsznia A. and Oberg K. Joint angle parameters in gait: Reference data for normal subject, 10-79 years of age // J. Rehabilitation Research and Development.– 1994.– Vol. 31, №3.– P. 199–213.
 158. Ogihara N., Yamazaki N. Generation of human bipedal locomotion by a bio-mimetic neuro-musculo-skeletal model // Biological Cybernetics. – 2001. – Vol. 84,

№1.– P. 1–11.

159. Ott C. Prioritized Multi-Task Compliance Control of Redundant Manipulators / Christian Ott, Alexander Dietrich, and Alin Albu-Schäffer // Elsevire, Automatica, vol. 53, 2015. – P. 416–423.
160. Paluszek M. Spacecraft Attitude and Orbit Control, 2e, – 2009.
161. Pfeiffer F., Rossmann T., Steuer J. Theory and practice of machine walking // Human and Machine Locomotion, A. Morecki and K. J. Waldron, (eds.), CISM Courses and Lectures No. 375, Springer-Verlag, Wien New York, 1997. – P. 231–281.
162. Polanyi K. The Great Transformation / K. Polanyi – USA: 1944. – 204 p.
163. Roussel L., Canudas-de-Wit D., Goswami A. Generation of energy optimal complete gait cycles for biped robots // Proc. of 2001 IEEE Int. conf on Robotics & Automation. 2001. P. 2036–2041.
164. Sardain P., Rostami M., Bessonnet G. An anthropomorphic biped robot: dynamic concepts and technological design // IEEE trans. on Systems, Man, and cybernetics - part A: systems and humans. 1998. Vol. 28, No. 6. P. 823–838.
165. Schuessler J. In History Departments, It's Up With Capitalism / J. Schuessler – USA, DC : 2013. – 102 p.
166. Shih C.-L., Gruver W. A., and Lee T.-T. Inverse kinematics and inverse dynamics for control of a biped walking machine // J. Robot.Syst. 1993. Vol. 10, no. 4, P. 531–555.
167. Shoemake K. Animating Rotation with Quaternion Curves Proc. / K. Shoemake // SIG-GRAPH, 1985, P. 245–254.
168. Slabaug G. Joint segmentation and non-rigid registration without shape priors / Unal G., Slabaugh G., Yezzi A., Tyan J. // Scr-04-tr-7495, Siemens Corporate Research, 2004. – 86 p.
169. Sokal A. D. Intellectual impostures: postmodern philosophers' abuse of science / A. D. Sokal, J. Bricmont // 1998.
170. Taga G. A model of the neuro-musculo-skeletal system for anticipatory adjustment

- of human locomotion during obstacle avoidance // Biological Cybernetics. – 1998. – Vol. 78, №1. – P. 9–17.
171. Taga G. A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. I. Emergence of basic gait // Biological Cybernetics. – 1995. – Vol. 73, №2. – P. 97–111.
 172. Taga G. A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. II. Real-time adaptability under various constraints // Biological Cybernetics. – 1995. – Vol. 73, №2. – P. 113–121.
 173. Takanishi A., Lim H.-o., Tsuda M. and Kato I. Realization of dynamic biped walking stabilized by trunk motion on a sagittally uneven surface // in Proc. – 1990 IEEE Int. Workshop Intelligent Robots Systems, Tsuchiura, Ibaraki, Japan, P. 323–330.
 174. Tkach M. A dynamic model of an anthropomorphic walking machine with momentum and energy of interaction with the support surface / M. Tkach, D. Humennyi //, 2014.
 175. Travis Deyle. KATE: A New Humanoid Robot from FutureBots Labs [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.hizook.com/blog/2012/04/16/kate-new-humanoid-robot-futurebots-labs>
 176. Van der Linde R. Q. Passive bipedal walking with phasic muscle contraction // Biol. Cybern. – 1999. – Vol. 81, №3. – P. 227–237.
 177. Volpe R. 2014 Robotics Activities at JPL - International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS), Montreal, Canada, 17 June 2014.
 178. Volpe R. Rover Functional Autonomy Development for the Mars Mobile Science Laboratory / IEEE Aerospace Conference, 2003. – P. 2643–2652.
 179. Von Stryk O. Optimal control of multibody systems in minimal coordinates // Zeitschrift für Angewandte mathematik und mechanik, 1998. Vol. 78, Suppl. 3. P. 1117–1120.

180. Von Stryk O., Bulirsch R. Direct and indirect methods for trajectory optimization // *Annals of operational research*. 1992. Vol. 37. P. 357–373.
181. Waldron K. Design of walking machines // *Human and Machine Locomotion*, A. Morecki and K. J. Waldron, (eds.), CISM Courses and Lectures No. 375, Springer-Verlag, Wien New York, 1997. – P. 283–315.
182. Winter D. A. *The Biomechanics and Motor Control of Human Gait*. – University of Waterloo Press.– Canada, 1991. – 140 p.
183. Wollher D., Hardt M., Buss M., von Stryk O. Actuator selection and hardware realization of a small and fast-moving, autonomous humanoid robot // *Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, Swetzerland. September 30-October 4. 2002. P. 2491–2496.
184. Zheng Y. F. and Shen J. Gait synthesis for the SD-2 biped robot to climb sloping surface // *IEEE Trans. Robot. Automat.* 1990. Vol. 6, P. 86–96.
185. Zhou C. Neuro-fuzzy gait synthesis with reinforcement learning for a biped walking robot // *Soft Computing*. – 2000. – Vol. 4, №4. – P. 238–250.
186. Zielińska T. Coupled oscillators utilised as gait rhythm generators of a two-legged walking machine // *Biological Cybernetics*. – 1996. – Vol. 74, №3.– P. 263–273.

ДОДАТКИ

Додаток А.

Визначення положення ТЦМ АКА у залежності від розташування його ланок

Кінематичний стан апарата заданий його вектором стану, що складається із координат кінематичних пар ланок ($x_A, y_A, z_A, x_B, y_B, z_B, x_C, y_C, z_C, x_D, y_D, z_D$), координат точок центрів мас ланок ($mass_xA, mass_yA, mass_zA, mass_xB, mass_yB, mass_zB, mass_xC, mass_yC, mass_zC, mass_xD, mass_yD, mass_zD$) і координат точки центру мас АКА ($comX, comY, comZ$). Вказані параметри є взаємопов'язаними. Характер зв'язків є нелінійним, залежним від кінематичної схеми апарата і фази його руху. У табличному вигляді, характер зв'язків представлений так:

№пп	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x_A	37	36.992	36.97	36.932	36.878	36.81	36.727	36.628	36.514	36.386	36.242	36.084	35.91	35.722	35.519	35.301	35.068
y_A	0	-0.91995	-1.8396	-2.7588	-3.6771	-4.5943	-5.5102	-6.4245	-7.3368	-8.247	-9.1547	-10.06	-10.962	-11.861	-12.756	-13.648	-14.535
z_A	0	-0.77996	-1.5597	-2.3388	-3.1172	-3.8946	-4.6707	-5.4453	-6.218	-6.9887	-7.7571	-8.5229	-9.2859	-10.046	-10.802	-11.555	-12.305
x_B	7	6.9984	6.9936	6.9856	6.9744	6.96	6.9424	6.9216	6.8977	6.8705	6.8401	6.8066	6.7699	6.73	6.6869	6.6407	6.5913
y_B	0	-0.31999	-0.63996	-0.95986	-1.2797	-1.5993	-1.9188	-2.2382	-2.5573	-2.8761	-3.1947	-3.5129	-3.8308	-4.1483	-4.4654	-4.782	-5.0982
z_B	0	-0.18	-0.35998	-0.53992	-0.71981	-0.89963	-1.0794	-1.259	-1.4385	-1.6178	-1.797	-1.976	-2.1548	-2.3334	-2.5118	-2.6899	-2.8677
x_C	-18	-18	-18.001	-18.003	-18.006	-18.009	-18.013	-18.017	-18.022	-18.028	-18.035	-18.042	-18.05	-18.059	-18.068	-18.079	-18.089
y_C	0	-0.069999	-0.13999	-0.20997	-0.27993	-0.34985	-0.4198	-0.4896	-0.5594	-0.6292	-0.6988	-0.76845	-0.83799	-0.90744	-0.9768	-1.0461	-1.1152
z_C	0	0.069999	0.13999	0.20997	0.27993	0.34985	0.41975	0.4896	0.5594	0.62915	0.69883	0.76845	0.83799	0.90744	0.9768	1.0461	1.1152
x_D	7	6.9997	6.9986	6.9969	6.9944	6.9913	6.9874	6.9829	6.9776	6.9717	6.965	6.9577	6.9497	6.9409	6.9315	6.9214	6.9106
y_D	0	-0.069999	-0.13999	-0.20997	-0.27993	-0.34985	-0.4198	-0.4896	-0.5594	-0.6292	-0.6988	-0.76845	-0.83799	-0.90744	-0.9768	-1.0461	-1.1152
z_D	0	0.069999	0.13999	0.20997	0.27993	0.34985	0.41975	0.4896	0.5594	0.62915	0.69883	0.76845	0.83799	0.90744	0.9768	1.0461	1.1152
$mass_xA$	22	21.995	21.982	21.959	21.926	21.885	21.835	21.775	21.706	21.628	21.541	21.445	21.34	21.226	21.103	20.971	20.83
$mass_yA$	0	-0.61997	-1.2398	-1.8593	-2.4784	-3.0968	-3.7145	-4.3313	-4.947	-5.5616	-6.1747	-6.7863	-7.3963	-8.0045	-8.6107	-9.2148	-9.8167
$mass_zA$	0	-0.47998	-0.95982	-1.4394	-1.9185	-2.3971	-2.875	-3.3521	-3.8282	-4.3033	-4.777	-5.2495	-5.7204	-6.1896	-6.6571	-7.1227	-7.5862
$mass_xB$	-5	-5.001	-5.004	-5.009	-5.016	-5.025	-5.036	-5.049	-5.064	-5.0809	-5.0999	-5.1209	-5.1438	-5.1688	-5.1957	-5.2246	-5.2555
$mass_yB$	0	-0.2	-0.39997	-0.59991	-0.79979	-0.99958	-1.1993	-1.3989	-1.5983	-1.7976	-1.9967	-2.1956	-2.3942	-2.5927	-2.7909	-2.9888	-3.1864
$mass_zB$	0	-0.059999	-0.11999	-0.17997	-0.23994	-0.29988	-0.3598	-0.4197	-0.4795	-0.5393	-0.599	-0.65867	-0.71827	-0.7778	-0.83726	-0.89663	-0.95591
$mass_xC$	-6	-6.0003	-6.0014	-6.0031	-6.0056	-6.0087	-6.0126	-6.0171	-6.0224	-6.0283	-6.035	-6.0423	-6.0503	-6.0591	-6.0685	-6.0786	-6.0894
$mass_yC$	0	-0.069999	-0.13999	-0.20997	-0.27993	-0.34985	-0.4198	-0.4896	-0.5594	-0.6292	-0.6988	-0.76845	-0.83799	-0.90744	-0.9768	-1.0461	-1.1152
$mass_zC$	0	0.069999	0.13999	0.20997	0.27993	0.34985	0.41975	0.4896	0.5594	0.62915	0.69883	0.76845	0.83799	0.90744	0.9768	1.0461	1.1152
$mass_xD$	4	3.9998	3.9992	3.9982	3.9968	3.995	3.9928	3.9902	3.9872	3.9838	3.98	3.9758	3.9712	3.9662	3.9609	3.9551	3.9489
$mass_yD$	0	-0.039999	-0.079995	-0.11998	-0.15996	-0.19992	-0.2399	-0.2798	-0.3197	-0.3595	-0.3993	-0.43911	-0.47885	-0.51854	-0.55817	-0.59775	-0.63727
$mass_zD$	0	0.039999	0.079995	0.11998	0.15996	0.19992	0.23986	0.27977	0.31966	0.35951	0.39933	0.43911	0.47885	0.51854	0.55817	0.59775	0.63727
$comX$	6.1273	6.1243	6.1152	6.1001	6.079	6.0518	6.0187	5.9795	5.9343	5.8832	5.826	5.7629	5.6939	5.6189	5.5381	5.4513	5.3587
$comY$	0	-0.44017	-0.88024	-1.3201	-1.7597	-2.199	-2.6377	-3.076	-3.5135	-3.9503	-4.3863	-4.8214	-5.2554	-5.6884	-6.1201	-6.5505	-6.9796
$comZ$	0	-0.22126	-0.44245	-0.6635	-0.88433	-1.1049	-1.3251	-1.5448	-1.7641	-1.9828	-2.2009	-2.4182	-2.6348	-2.8506	-3.0654	-3.2792	-3.492

Nenn	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
xA	28.495	28.005	27.503	26.989	26.462	25.924	25.375	24.815	24.243	23.66	23.067	22.463	21.848	21.224	20.589	19.945	19.292
yA	-29.535	-30.299	-31.054	-31.8	-32.537	-33.264	-33.982	-34.69	-35.388	-36.075	-36.752	-37.419	-38.074	-38.719	-39.353	-39.975	-40.586
zA	-24.867	-25.499	-26.122	-26.738	-27.344	-27.942	-28.53	-29.109	-29.679	-30.239	-30.789	-31.329	-31.859	-32.379	-32.888	-33.386	-33.874
xB	5.1681	5.0599	4.9487	4.8345	4.7173	4.5971	4.474	4.3479	4.2188	4.0869	3.9521	3.8143	3.6737	3.5302	3.3838	3.2347	3.0826
yB	-10.672	-10.973	-11.273	-11.572	-11.869	-12.166	-12.461	-12.755	-13.048	-13.34	-13.63	-13.919	-14.206	-14.492	-14.777	-15.06	-15.342
zB	-6.0028	-6.1722	-6.3409	-6.5091	-6.6766	-6.8434	-7.0095	-7.175	-7.3397	-7.5037	-7.6669	-7.8294	-7.9911	-8.152	-8.312	-8.4713	-8.6297
xC	-18.401	-18.424	-18.449	-18.474	-18.499	-18.526	-18.553	-18.58	-18.608	-18.637	-18.667	-18.697	-18.728	-18.759	-18.791	-18.824	-18.857
yC	-2.3344	-2.4003	-2.4659	-2.5313	-2.5964	-2.6613	-2.7259	-2.7903	-2.8543	-2.9181	-2.9816	-3.0448	-3.1076	-3.1702	-3.2325	-3.2944	-3.356
zC	2.3344	2.4003	2.4659	2.5313	2.5964	2.6613	2.7259	2.7903	2.8543	2.9181	2.9816	3.0448	3.1076	3.1702	3.2325	3.2944	3.356
xD	6.5993	6.5756	6.5513	6.5263	6.5007	6.4744	6.4474	6.4198	6.3916	6.3628	6.3333	6.3031	6.2724	6.241	6.209	6.1763	6.1431
yD	-2.3344	-2.4003	-2.4659	-2.5313	-2.5964	-2.6613	-2.7259	-2.7903	-2.8543	-2.9181	-2.9816	-3.0448	-3.1076	-3.1702	-3.2325	-3.2944	-3.356
zD	2.3344	2.4003	2.4659	2.5313	2.5964	2.6613	2.7259	2.7903	2.8543	2.9181	2.9816	3.0448	3.1076	3.1702	3.2325	3.2944	3.356
mass_xA	16.832	16.533	16.226	15.912	15.59	15.261	14.925	14.581	14.231	13.873	13.509	13.138	12.761	12.377	11.987	11.59	11.187
mass_yA	-20.103	-20.636	-21.164	-21.686	-22.203	-22.715	-23.222	-23.723	-24.218	-24.708	-25.191	-25.669	-26.14	-26.606	-27.065	-27.517	-27.964
mass_zA	-15.435	-15.835	-16.232	-16.623	-17.01	-17.393	-17.77	-18.142	-18.509	-18.871	-19.228	-19.579	-19.925	-20.265	-20.6	-20.929	-21.252
mass_xB	-6.1449	-6.2125	-6.2821	-6.3535	-6.4267	-6.5018	-6.5788	-6.6576	-6.7382	-6.8207	-6.905	-6.9911	-7.079	-7.1686	-7.2601	-7.3533	-7.4483
mass_yB	-6.6697	-6.858	-7.0455	-7.2323	-7.4184	-7.6038	-7.7884	-7.9722	-8.1552	-8.3374	-8.5188	-8.6993	-8.879	-9.0577	-9.2356	-9.4125	-9.5885
mass_zB	-2.0009	-2.0574	-2.1136	-2.1697	-2.2255	-2.2811	-2.3365	-2.3917	-2.4466	-2.5012	-2.5556	-2.6098	-2.6637	-2.7173	-2.7707	-2.8238	-2.8766
mass_xC	-6.4007	-6.4244	-6.4487	-6.4737	-6.4993	-6.5256	-6.5526	-6.5802	-6.6084	-6.6372	-6.6667	-6.6969	-6.7276	-6.759	-6.791	-6.8237	-6.8569
mass_yC	-2.3344	-2.4003	-2.4659	-2.5313	-2.5964	-2.6613	-2.7259	-2.7903	-2.8543	-2.9181	-2.9816	-3.0448	-3.1076	-3.1702	-3.2325	-3.2944	-3.356
mass_zC	2.3344	2.4003	2.4659	2.5313	2.5964	2.6613	2.7259	2.7903	2.8543	2.9181	2.9816	3.0448	3.1076	3.1702	3.2325	3.2944	3.356
mass_xD	3.771	3.7575	3.7436	3.7293	3.7147	3.6996	3.6842	3.6685	3.6524	3.6359	3.619	3.6018	3.5842	3.5663	3.548	3.5293	3.5103
mass_yD	-1.3339	-1.3716	-1.4091	-1.4465	-1.4837	-1.5208	-1.5577	-1.5944	-1.631	-1.6675	-1.7038	-1.7399	-1.7758	-1.8115	-1.8471	-1.8825	-1.9177
mass_zD	1.3339	1.3716	1.4091	1.4465	1.4837	1.5208	1.5577	1.5944	1.631	1.6675	1.7038	1.7399	1.7758	1.8115	1.8471	1.8825	1.9177
comX	2.7243	2.5266	2.3238	2.116	1.9032	1.6854	1.4628	1.2353	1.003	0.76607	0.52446	0.27826	0.027544	-0.22764	-0.48721	-0.75112	-1.0193
comY	-14.367	-14.754	-15.137	-15.517	-15.894	-16.268	-16.638	-17.005	-17.369	-17.729	-18.085	-18.438	-18.787	-19.132	-19.473	-19.81	-20.143
comZ	-7.0668	-7.2472	-7.4253	-7.6011	-7.7745	-7.9454	-8.1137	-8.2795	-8.4427	-8.6032	-8.761	-8.916	-9.0682	-9.2176	-9.364	-9.5075	-9.648

Nenn	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
xA	28.495	28.005	27.503	26.989	26.462	25.924	25.375	24.815	24.243	23.66	23.067	22.463	21.848	21.224	20.589	19.945	19.292
yA	-29.535	-30.299	-31.054	-31.8	-32.537	-33.264	-33.982	-34.69	-35.388	-36.075	-36.752	-37.419	-38.074	-38.719	-39.353	-39.975	-40.586
zA	-24.867	-25.499	-26.122	-26.738	-27.344	-27.942	-28.53	-29.109	-29.679	-30.239	-30.789	-31.329	-31.859	-32.379	-32.888	-33.386	-33.874
xB	5.1681	5.0599	4.9487	4.8345	4.7173	4.5971	4.474	4.3479	4.2188	4.0869	3.9521	3.8143	3.6737	3.5302	3.3838	3.2347	3.0826
yB	-10.672	-10.973	-11.273	-11.572	-11.869	-12.166	-12.461	-12.755	-13.048	-13.34	-13.63	-13.919	-14.206	-14.492	-14.777	-15.06	-15.342
zB	-6.0028	-6.1722	-6.3409	-6.5091	-6.6766	-6.8434	-7.0095	-7.175	-7.3397	-7.5037	-7.6669	-7.8294	-7.9911	-8.152	-8.312	-8.4713	-8.6297
xC	-18.401	-18.424	-18.449	-18.474	-18.499	-18.526	-18.553	-18.58	-18.608	-18.637	-18.667	-18.697	-18.728	-18.759	-18.791	-18.824	-18.857
yC	-2.3344	-2.4003	-2.4659	-2.5313	-2.5964	-2.6613	-2.7259	-2.7903	-2.8543	-2.9181	-2.9816	-3.0448	-3.1076	-3.1702	-3.2325	-3.2944	-3.356
zC	2.3344	2.4003	2.4659	2.5313	2.5964	2.6613	2.7259	2.7903	2.8543	2.9181	2.9816	3.0448	3.1076	3.1702	3.2325	3.2944	3.356
xD	6.5993	6.5756	6.5513	6.5263	6.5007	6.4744	6.4474	6.4198	6.3916	6.3628	6.3333	6.3031	6.2724	6.241	6.209	6.1763	6.1431
yD	-2.3344	-2.4003	-2.4659	-2.5313	-2.5964	-2.6613	-2.7259	-2.7903	-2.8543	-2.9181	-2.9816	-3.0448	-3.1076	-3.1702	-3.2325	-3.2944	-3.356
zD	2.3344	2.4003	2.4659	2.5313	2.5964	2.6613	2.7259	2.7903	2.8543	2.9181	2.9816	3.0448	3.1076	3.1702	3.2325	3.2944	3.356
mass_xA	16.832	16.533	16.226	15.912	15.59	15.261	14.925	14.581	14.231	13.873	13.509	13.138	12.761	12.377	11.987	11.59	11.187
mass_yA	-20.103	-20.636	-21.164	-21.686	-22.203	-22.715	-23.222	-23.723	-24.218	-24.708	-25.191	-25.669	-26.14	-26.606	-27.065	-27.517	-27.964
mass_zA	-15.435	-15.835	-16.232	-16.623	-17.01	-17.393	-17.77	-18.142	-18.509	-18.871	-19.228	-19.579	-19.925	-20.265	-20.6	-20.929	-21.252
mass_xB	-6.1449	-6.2125	-6.2821	-6.3535	-6.4267	-6.5018	-6.5788	-6.6576	-6.7382	-6.8207	-6.905	-6.9911	-7.079	-7.1686	-7.2601	-7.3533	-7.4483
mass_yB	-6.6697	-6.858	-7.0455	-7.2323	-7.4184	-7.6038	-7.7884	-7.9722	-8.1552	-8.3374	-8.5188	-8.6993	-8.879	-9.0577	-9.2356	-9.4125	-9.5885
mass_zB	-2.0009	-2.0574	-2.1136	-2.1697	-2.2255	-2.2811	-2.3365	-2.3917	-2.4466	-2.5012	-2.5556	-2.6098	-2.6637	-2.7173	-2.7707	-2.8238	-2.8766
mass_xC	-6.4007	-6.4244	-6.4487	-6.4737	-6.4993	-6.5256	-6.5526	-6.5802	-6.6084	-6.6372	-6.6667	-6.6969	-6.7276	-6.759	-6.791	-6.8237	-6.8569
mass_yC	-2.3344	-2.4003	-2.4659	-2.5313	-2.5964	-2.6613	-2.7259	-2.7903	-2.8543	-2.9181	-2.9816	-3.0448	-3.1076	-3.1702	-3.2325	-3.2944	-3.356
mass_zC	2.3344	2.4003	2.4659	2.5313	2.5964	2.6613	2.7259	2.7903	2.8543	2.9181	2.9816	3.0448	3.1076	3.1702	3.2325	3.2944	3.356
mass_xD	3.771	3.7575	3.7436	3.7293	3.7147	3.6996	3.6842	3.6685	3.6524	3.6359	3.619	3.6018	3.5842	3.5663	3.548	3.5293	3.5103
mass_yD	-1.3339	-1.3716	-1.4091	-1.4465	-1.4837	-1.5208	-1.5577	-1.5944	-1.631	-1.6675	-1.7038	-1.7399	-1.7758	-1.8115	-1.8471	-1.8825	-1.9177
mass_zD	1.3339	1.3716	1.4091	1.4465	1.4837	1.5208	1.5577	1.5944	1.631	1.6675	1.7038	1.7399	1.7758	1.8115	1.8471	1.8825	1.9177
comX	2.7243	2.5266	2.3238	2.116	1.9032	1.6854	1.4628	1.2353	1.003	0.76607	0.52446	0.27826	0.027544	-0.22764	-0.48721	-0.75112	-1.0193
comY	-14.367	-14.754	-15.137	-15.517	-15.894	-16.268	-16.638	-17.005	-17.369	-17.729	-18.085	-18.438	-18.787	-19.132	-19.473	-19.81	-20.143
comZ	-7.0668	-7.2472	-7.4253	-7.6011	-7.7745	-7.9454	-8.1137	-8.2795	-8.4427	-8.6032	-8.761	-8.916	-9.0682	-9.2176	-9.364	-9.5075	-9.648

Представлена таблична залежність отримана за допомогою програмного коду середовища *MatLab*:

```

begin_angle=0; // Ініціалізація початкового положення
end_angle=pi/2;
step_angle=0.01;
x0=0; y0=0; z0=0;
lA=30; lB=25; lC=25; lD=7; // Ініціалізація довжин ланок
dA=15; dB=12; dC=12; dD=3;
mA=30; mB=13; mC=10; mD=2;
alphaX=[begin_angle:step_angle:end_angle]; // Генерація області існування кутів
alphaZ=[begin_angle:step_angle:end_angle];
betaX=[begin_angle:step_angle:end_angle];
betaZ=[begin_angle:step_angle:end_angle];
etaX=[begin_angle:step_angle:end_angle];
etaZ=[begin_angle:step_angle:end_angle];
deltaX=[begin_angle:step_angle:end_angle];
deltaZ=[begin_angle:step_angle:end_angle];
xD = x0 + (lD) * cos (deltaX); // Перерахунок відносного положення шарнірів АКА
yD = -(y0 + (lD) * sin (deltaX));
zD = z0 + (lD) * sin (deltaZ);
xC = xD - (lC * cos (deltaX-etaX));
yC = yD + (lC * sin (deltaX-etaX)); zC = zD + (lC * sin (deltaZ-etaZ));
xB = xC + (lB * cos (deltaX - etaX - betaX));
yB = yC + (lB * sin (deltaX - etaX - betaX));
zB = zC + (lB * sin (deltaZ - etaZ - betaZ));
xA = xB + (lA * cos (deltaX - etaX - betaX - alphaX));
yA = yB + (lA * sin (deltaX - etaX - betaX - alphaX));
zA = zB + (lA * sin (deltaZ - etaZ - betaZ - alphaZ));
mass_xD = x0 + ((lD-dD)) * cos (deltaX); // Обрахунок положення ТЦМ ланок АКА
mass_yD = -(y0 + ((lD-dD)) * sin (deltaX));
mass_zD = z0 + ((lD-dD)) * sin (deltaZ);

```

```

mass_xC = xD - ((lC-dC) * cos (deltaX-etaX));
mass_yC = yD + ((lC-dC) * sin (deltaX-etaX));
mass_zC = zD + ((lC-dC) * sin (deltaZ-etaZ));
mass_xB = xC + ((lB-dB) * cos (deltaX - etaX - betaX));
mass_yB = yC + ((lB-dB) * sin (deltaX - etaX - betaX));
mass_zB = zC + ((lB-dB) * sin (deltaZ - etaZ - betaZ));
mass_xA = xB + ((lA-dA) * cos (deltaX - etaX - betaX - alphaX));
mass_yA = yB + ((lA-dA) * sin (deltaX - etaX - betaX - alphaX));
mass_zA = zB + ((lA-dA) * sin (deltaZ - etaZ - betaZ - alphaZ));
// Перерахунок положення ТЦМ АКА
comX=(mA*mass_xA+mB*mass_xC+mA*mass_xC+mB*mass_xB)/ (mA+mB+mC+mD);
comY=(mA*mass_yA+mB*mass_yC+mA*mass_yC+mB*mass_yB)/ (mA+mB+mC+mD);
comZ=(mA*mass_zA+mB*mass_zC+mA*mass_zC+mB*mass_zB)/ (mA+mB+mC+mD);
figure // Візуалізація
    plot (xA, yA,'+', xB, yB,'d', xC, yC,'-d', xD, yD, mass_xA, mass_yA,'--',mass_xB,
mass_yB,'--',mass_xC, mass_yC,'--',mass_xD, mass_yD,'--',comX,comY,'--o'),grid on;
    xlabel ('x phase');
    ylabel ('y phase');
    legend ('A','B','C','D','mass of A','mass of B','mass of C','mass of D','Center of the mass');
BiPed_state=[xA;yA;zA;xB;yB;zB;xC;yC;zC;xD;yD;zD;mass_xA;mass_yA;mass_zA;mass_xB;
mass_yB;mass_zB;mass_xC;mass_yC;mass_zC;mass_xD;mass_yD;mass_zD;comX;comY;com
Z];
file_BiPed_state='BiPed_state.txt';
dlmwrite (file_BiPed_state,BiPed_state);

```

Додаток Б.

Структурна схема системи управління усталеним рухом АКА на довільній ОП за даними про розподіл сил реакції ОП

Система управління усталеним рухом АКА взаємодіє з об'єктом управління. Параметри такої взаємодії можуть бути отримані із зовнішнього джерела інформації (НІЛ) метод і передані до комп'ютерної моделі АКА (рис. Б1), або можуть бути синтезовані засобами моделювання на моделі.

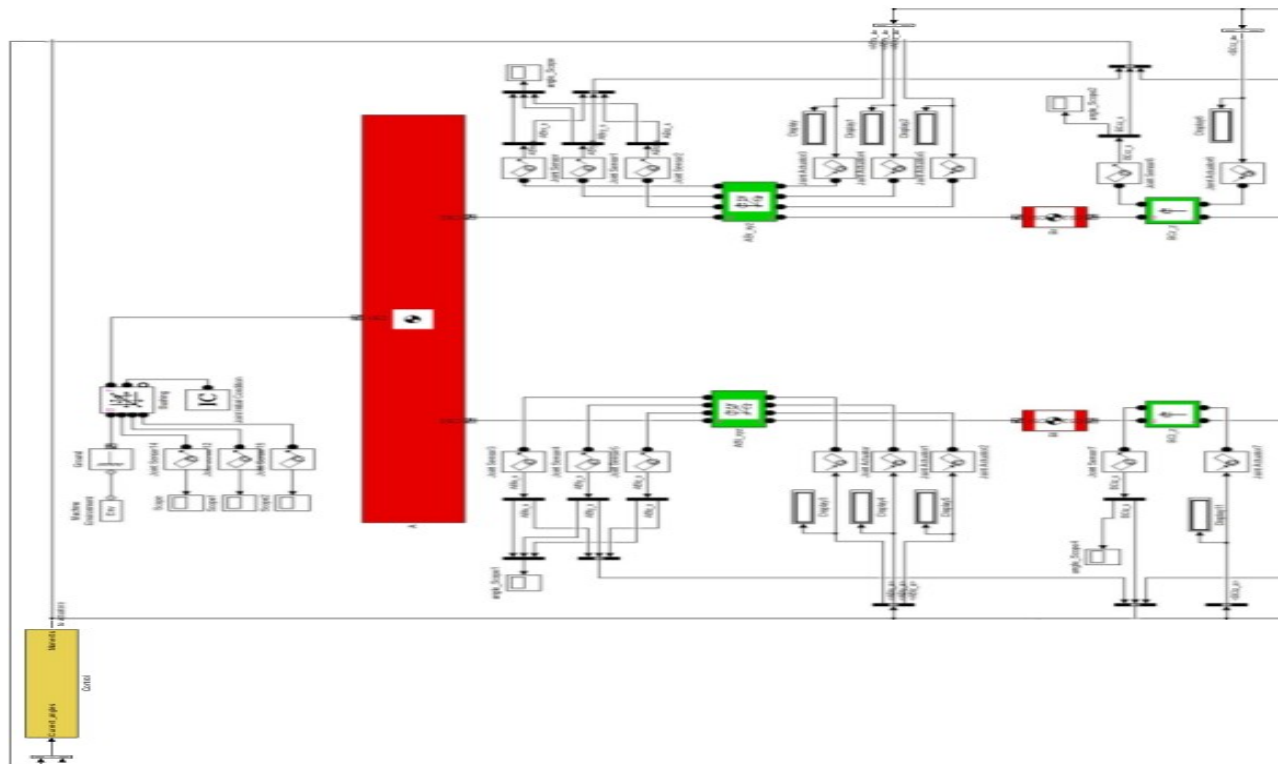


Рисунок Б1, аркуш 1 - Комп'ютерна модель АКА із урахуванням кінематичних зв'язків, динамічної поведінки: *Control* - блок СУ усталеним рухом АКА; *Joint* - ; *Body* - ланки АКА; *Ground* - зовнішні сили; *Scope*, *Display* - засоби моніторингу АКА

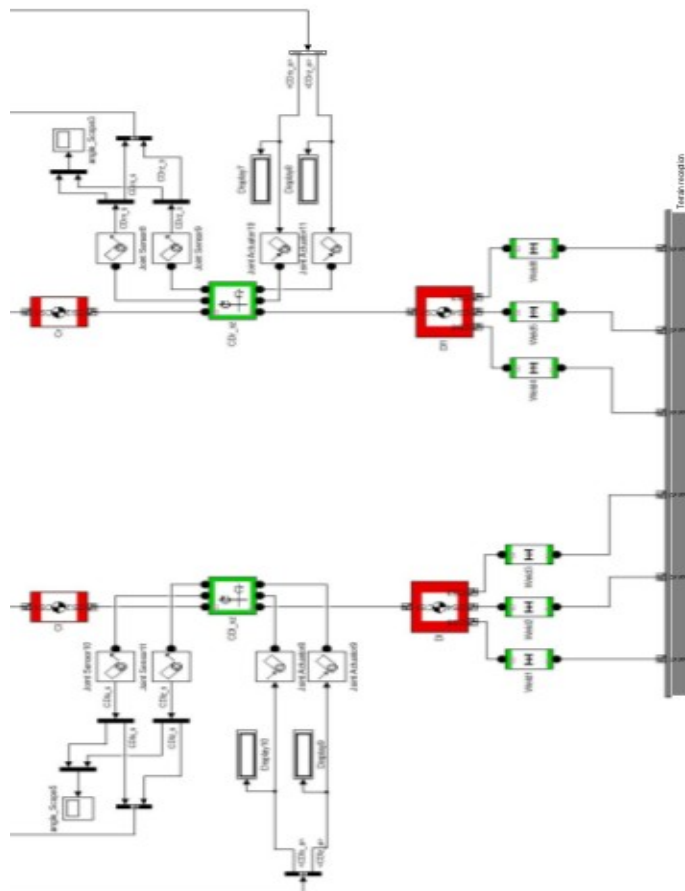


Рисунок Б1, аркуш 2 - Комп'ютерна модель АКА із урахуванням кінематичних зв'язків, динамічної поведінки: *Control* - блок СУ усталеним рухом АКА; *Joint* - ; *Body* - ланки АКА; *Ground* - зовнішні сили; *Scope*, *Display* - засоби моніторингу АКА

Зчитування даних про взаємоді АКА із навколишнім середовищем надходять до блоку *Control*, який містить розгалужену структуру блоків і підсистем СУ усталеним рухом АКА (рис. Б2).

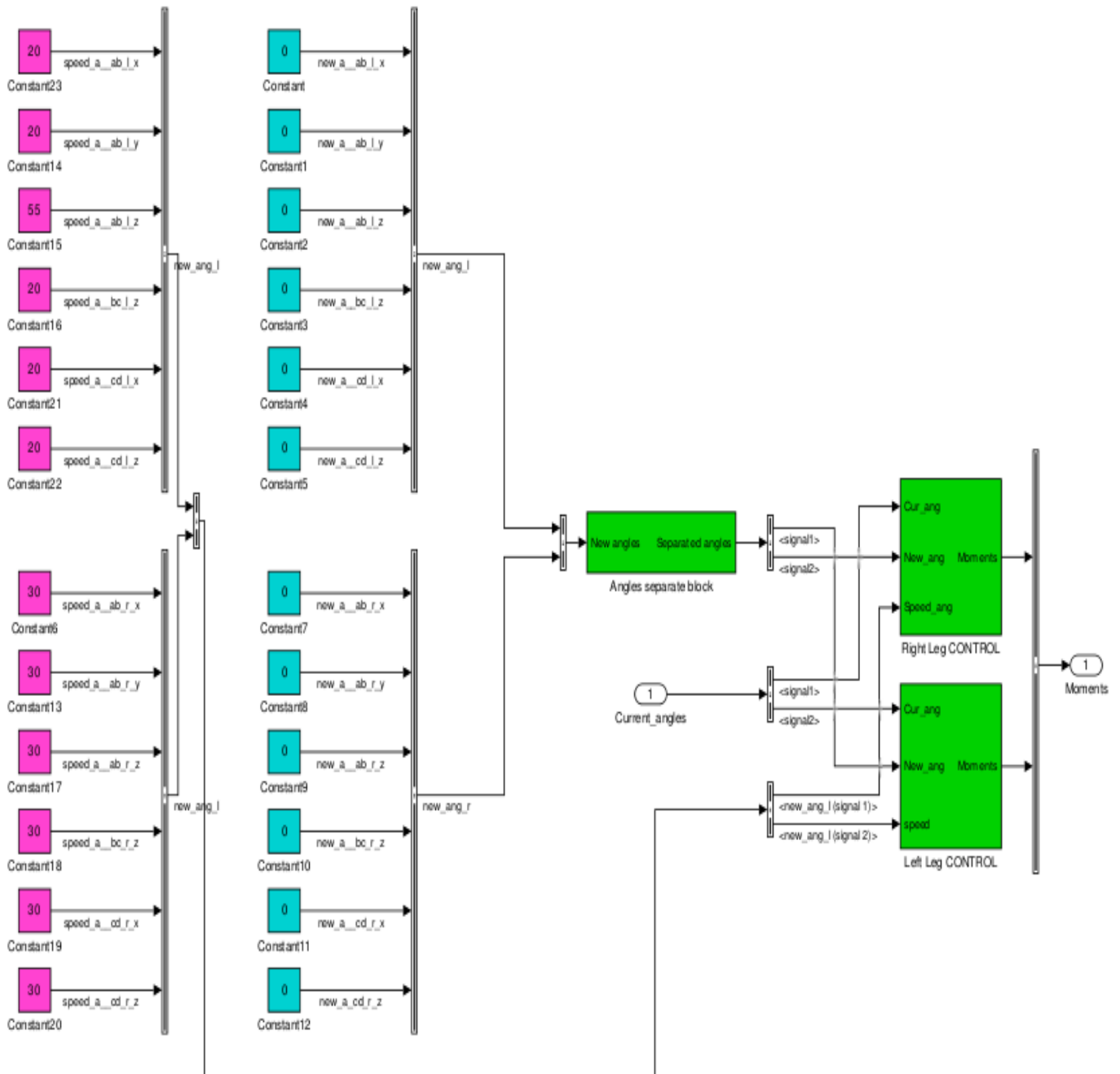


Рисунок Б2 - Схема зчитування параметрів взаємодії АКА із навколишнім середовищем засобами розгалуженої структури *Control*:

Const - параметри нового вектора-стану АКА; *AnglesSeparateBlock* - блок визначення відхилення поточного стану АКА від його вектора-ствну; *LeftLegControl*, *RightLegControl* - блоки управління лівою та правою ногами АКА; *Moments* - вихідні значення моментів у кінематичних парах апарата; *CurrentAngles* - вхідні поточні значення кутів кінематичних пар АКА.

Блок *AnglesSeparateBlock* виконує задачу порівняння відхилення кутів кінематичних пар і складається із підсистеми, зображеної на рис. Б3.

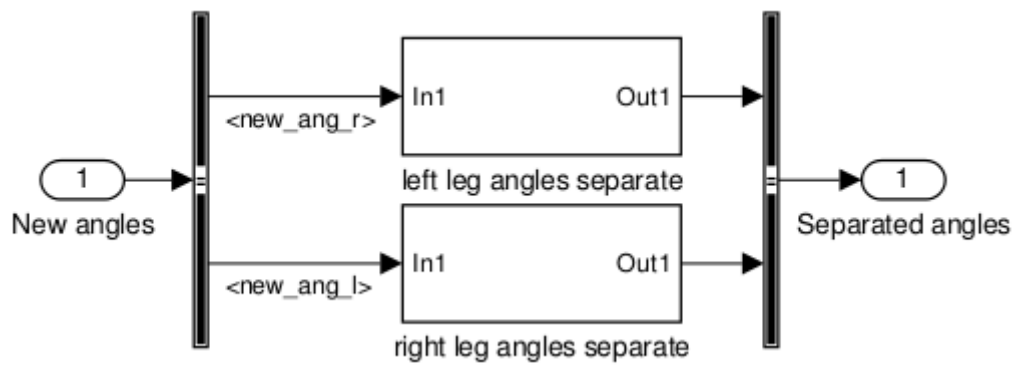


Рисунок Б3 - Підсистема *AnglesSeparateBlock* для розподілу і порівняння кутів кінематичних пар АКА із їхніми еталонними значеннями: *NewAngle* - вхід біномів кутів кінематичних пар АКА; *LeftLegAnglesSeparate*, *RightLegAnglesSeparate* - підсистеми порівняння кутів лівої і правої ніг апарата; *SeparateAngles* - розбіжності пар кутів АКА.

Структура підсистем *LeftLegAnglesSeparate*, *RightLegAnglesSeparate* показана на рис. Б4.

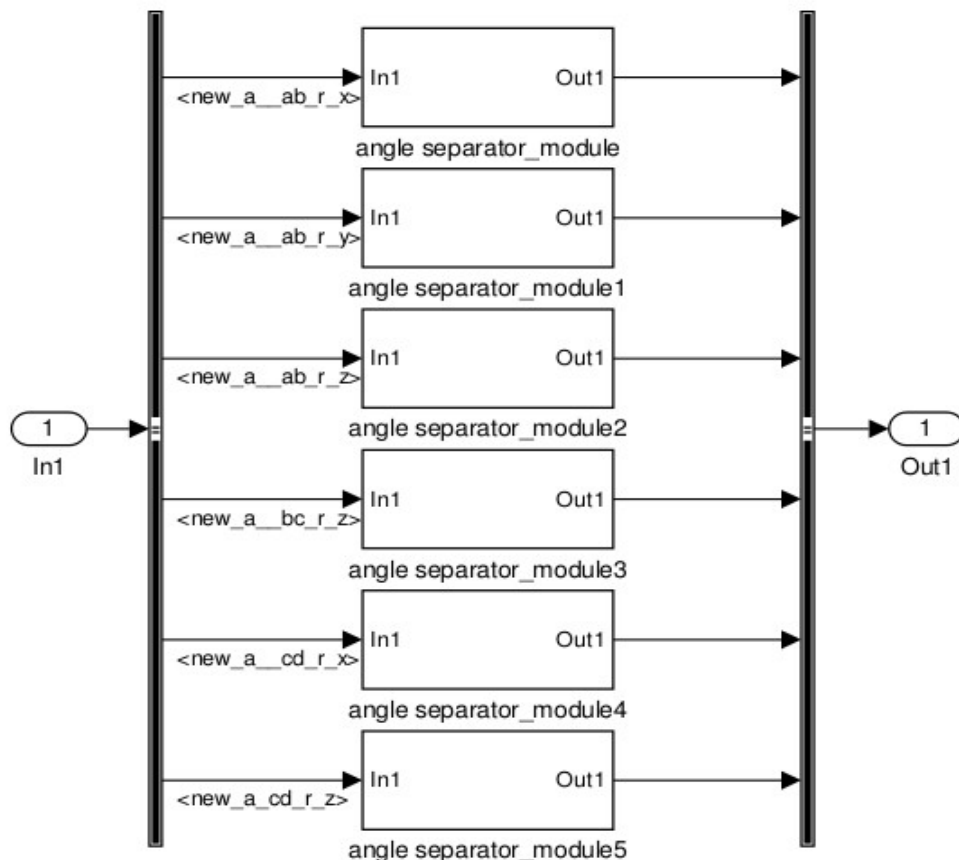


Рисунок Б4 - Підсистема *LeftLegAnglesSeparate* для порівняння пар кутів АКА

Підсистеми *AngleSeparator_module* мають структуру, зображену на рис. Б5.

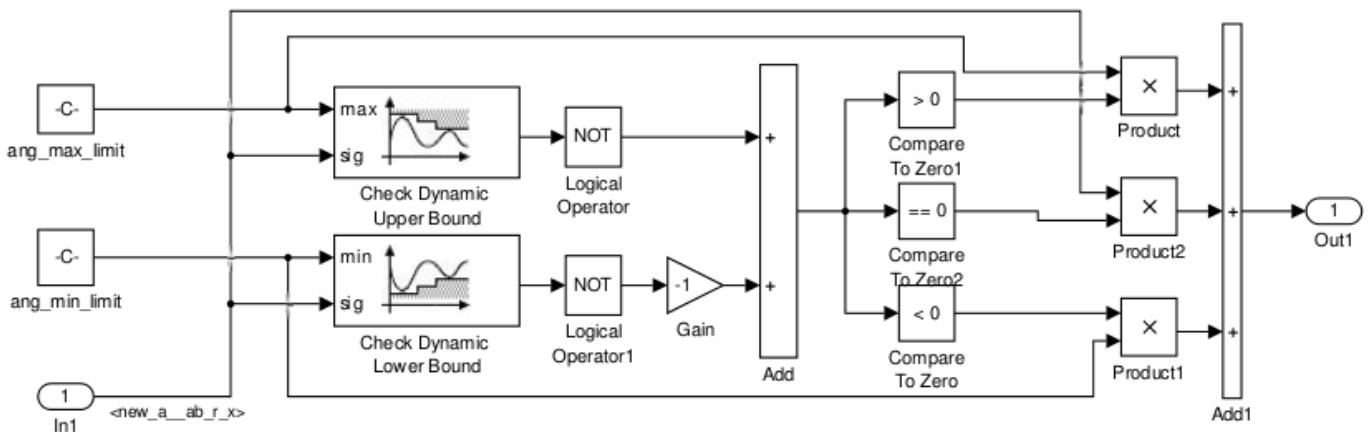


Рисунок Б5 - Підсистема *AngleSeparator_module* у складі підсистеми *AngleSeparator_module*: *ang_max_limit*, *ang_min_limit* - діапазон допустимих кутів кінематичної пари ланок; *in1* - біном кутів кінематичної пари; *check Dynamics UpperBound*, *check Dynamics Lower Bound* - блоки перевірки входження кутів у заданий діапазон; *Out1* - вихідне значення кута.

Блоки *LeftLegControl*, *RightLegControl* мають структуру, що зображена на рис. Б6 і обраховують значення моментів у шарнірах АКА.

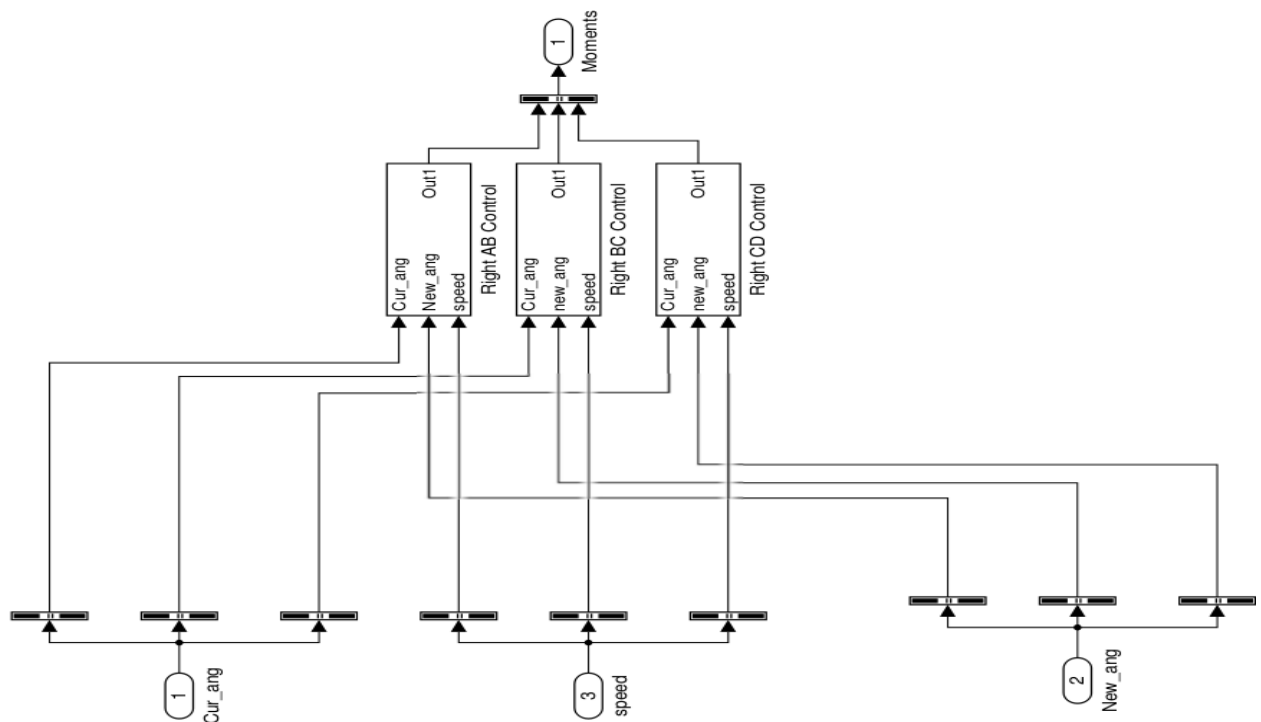


Рисунок Б6 - Підсистема *LeftLegControl*, *RightLegControl*: *Right/Left AB*, *Right/Left BC Control*, *Right/Left CD Control* - підсистеми ПІД-регуляторів для формування кутових моментів у *AB, BC, CD* парах ланок відповідно; *CurAng* - поточний кут кінематичної пари; *Speed* - швидкість зміни кута; *NewAng* - новий куту пари ланок.

Формування кутових моментів кінематичних пар ланок АКА здійснюється за рахунок застосування ПІД-регулятора, структурна схема якого показана на рис. Б7.

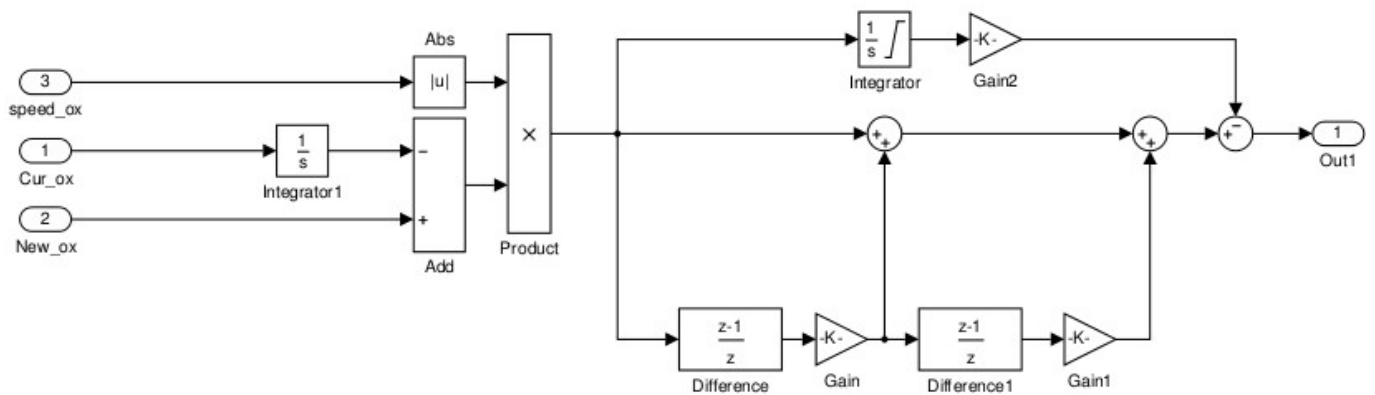


Рисунок Б7 -Регулятор формування кутового моменту пари ланок АКА у складі підсистем *Right/Left AB, Right/Left BC Control, Right/Left CD Control* СУ усталеним рухом апарата

Для моделювання взаємодії АКА із ОП синтезовано блок *Terrain Reaction* у складі моделі АКА (Рис. Б1). Структура блоку показана на рис. Б8.

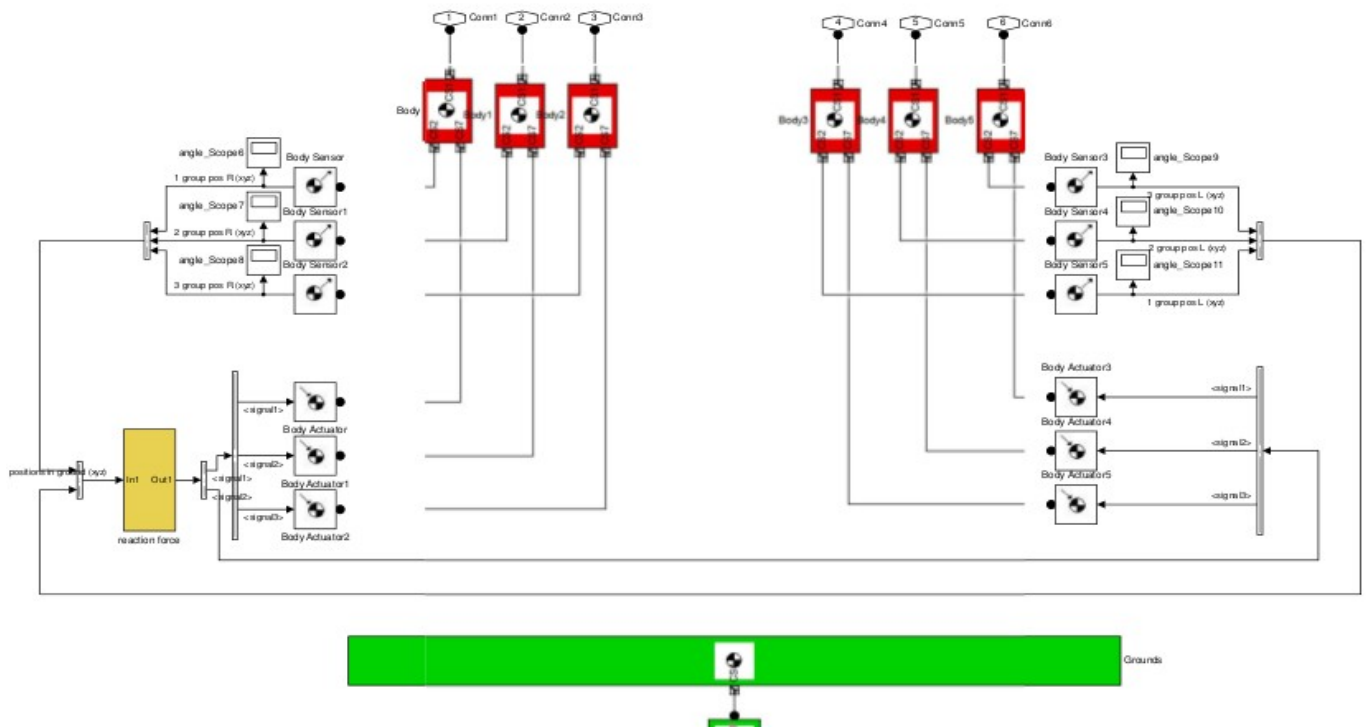


Рисунок Б8 -Блок *Terrain Reaction* для зчитування взаємодії між АКА та ОП: *Grounds* - модель ОП; *ReactionForce* - підсистема аналізу розподілу сил реакції ОП; *Body* - датчики натиску; *BodySensor* - система моніторингу розподілу сил реакції; *Conn* - канали взаємодії блоку із СУ.

Підсистема *ReactionForce* складається із розподіленої системи потоків, яку показано на рис. Б9 і виконує задачу аналізу натиску стопи АКА на ОП у кожній дотичній точці. Ця функція здійснюється підсистемою *F_reaction in group*, яку показано на рис. Б10.

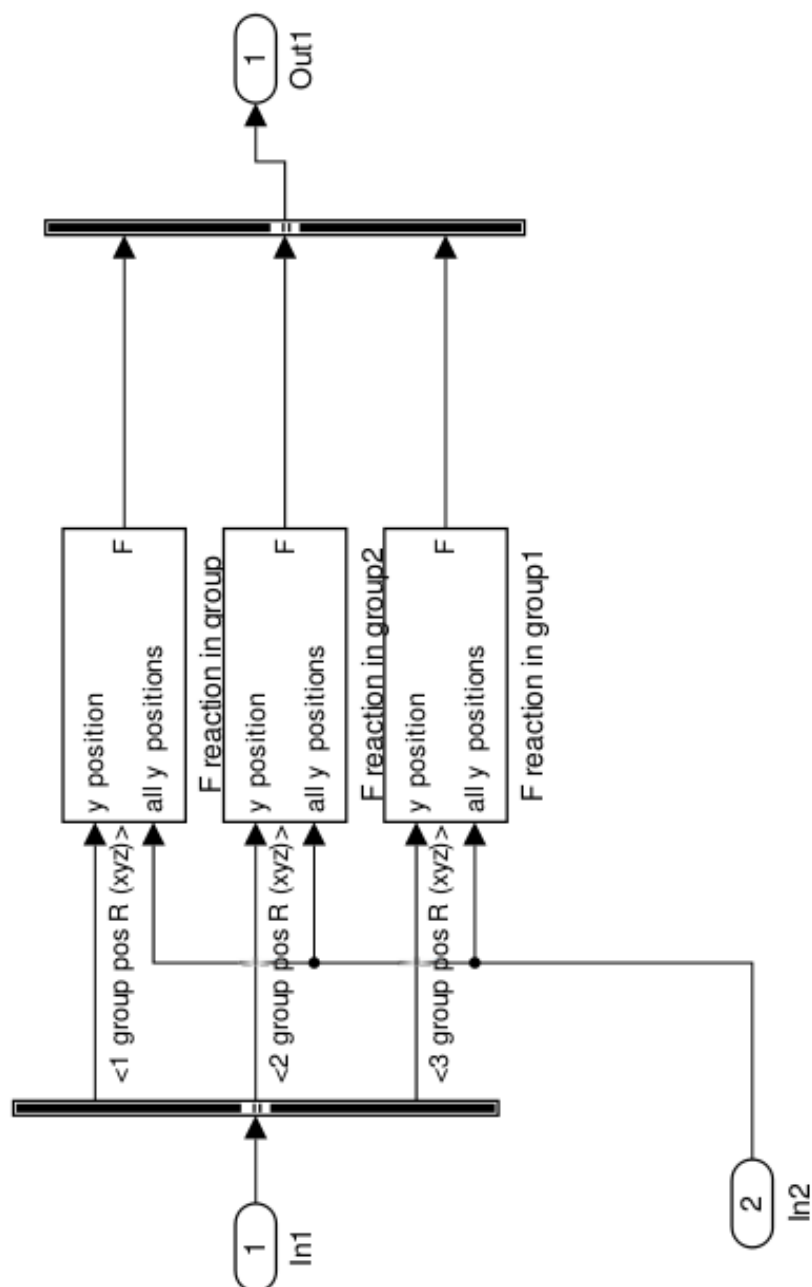


Рисунок Б9 - Підсистема *ReactionForce*: *F_reaction in group* - Підсистема аналізу сили натиску АКА на ОП у кожній дотичній точці; *In1* - вхід параметрів сили натиску; *In2* - вхід параметрів поточної позиції АКА на ОП; *Out1* - значення сили настику у точці.

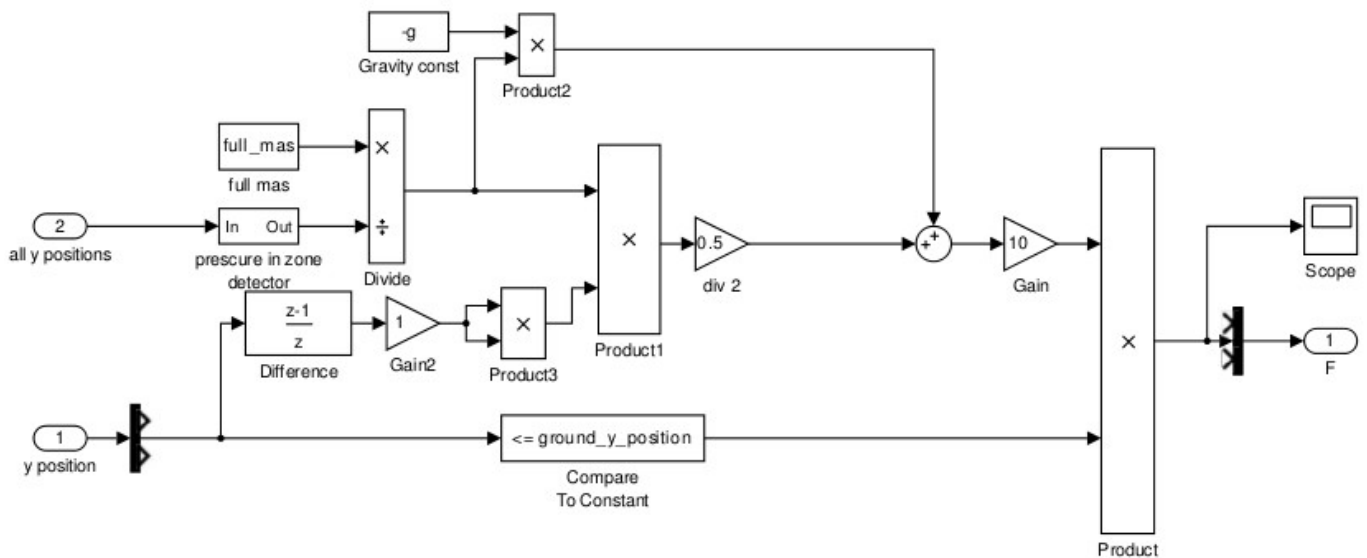


Рисунок Б10 - Підсистема $F_{reaction}$ in group: $alYPosition$ - положення базової точки стопи; $y_{position}$ - положення точки стопи для аналізу; H - вихідне значення сили реакції; $Scope$ - блок моніторингу зміни сили реакції у точці; $FulMas$ - загальна маса АКА; $GravityConst$ - постійна сили тяжіння.

Дотик стопи АКА до ОП визначається підсистемою $LegReaction$, структура схеми якої показана на рис. Б11.

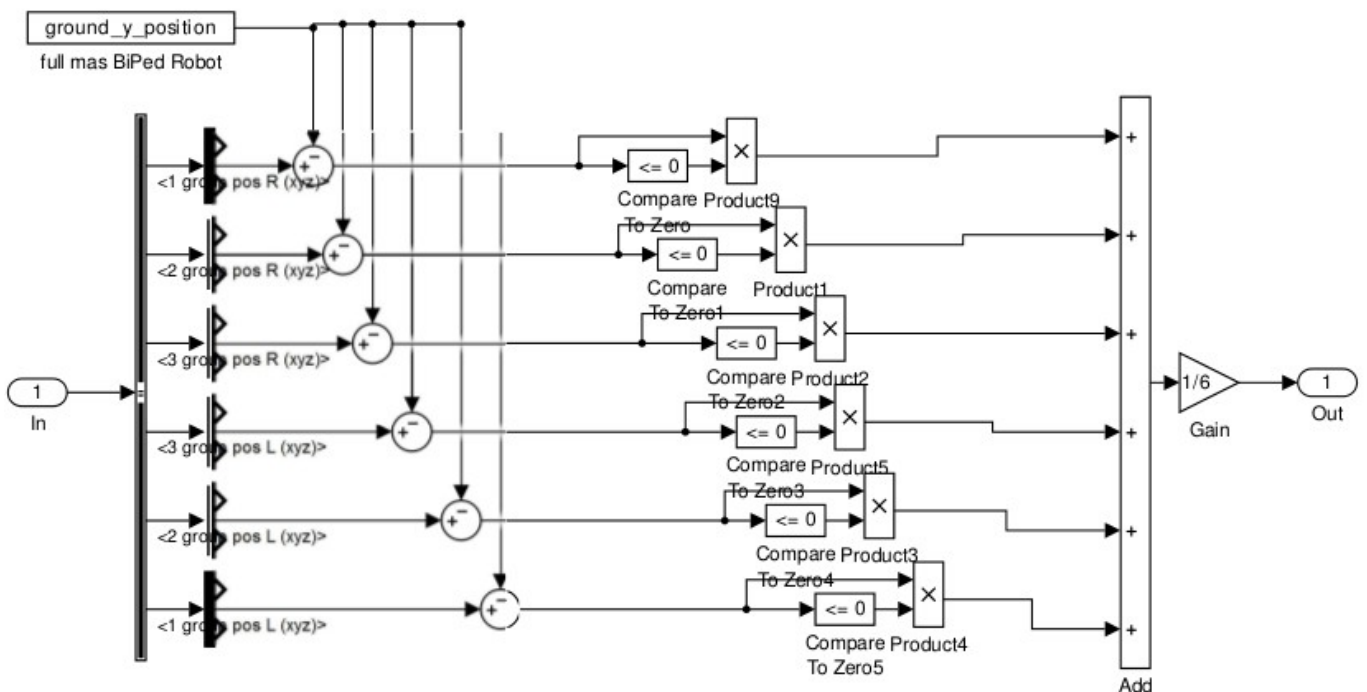


Рисунок Б11 - Підсистема $LegReaction$: In - сила реакції в точці; $Out1$ - бінарний сигнал про наявність реакції; $fulMasBiPedRobot$ - загальна маса АКА.

Додаток В

Значення моментів у кінематичних парах і відповідні значення кутів у шарнірах АКА при дотриманні ним усталеного руху

На графіках представлені значення моментів у кінематичних парах ланок АКА. Також зображені відповідні кути кінематичних пар. Введені такі позначення: a, b — значення кутів і моментів у шарнірі $ABL(R)_{xyz}$; c, d — $BCL(R)_z$; e, f — $CDL(R)_{xz}$. Кути задані у градусах, вісь часу — у секундах, моменти у $H \cdot 10^2$. Чорним, червоним і синім зображено значення кутів і моментів відносно осей x, y, z - відповідно

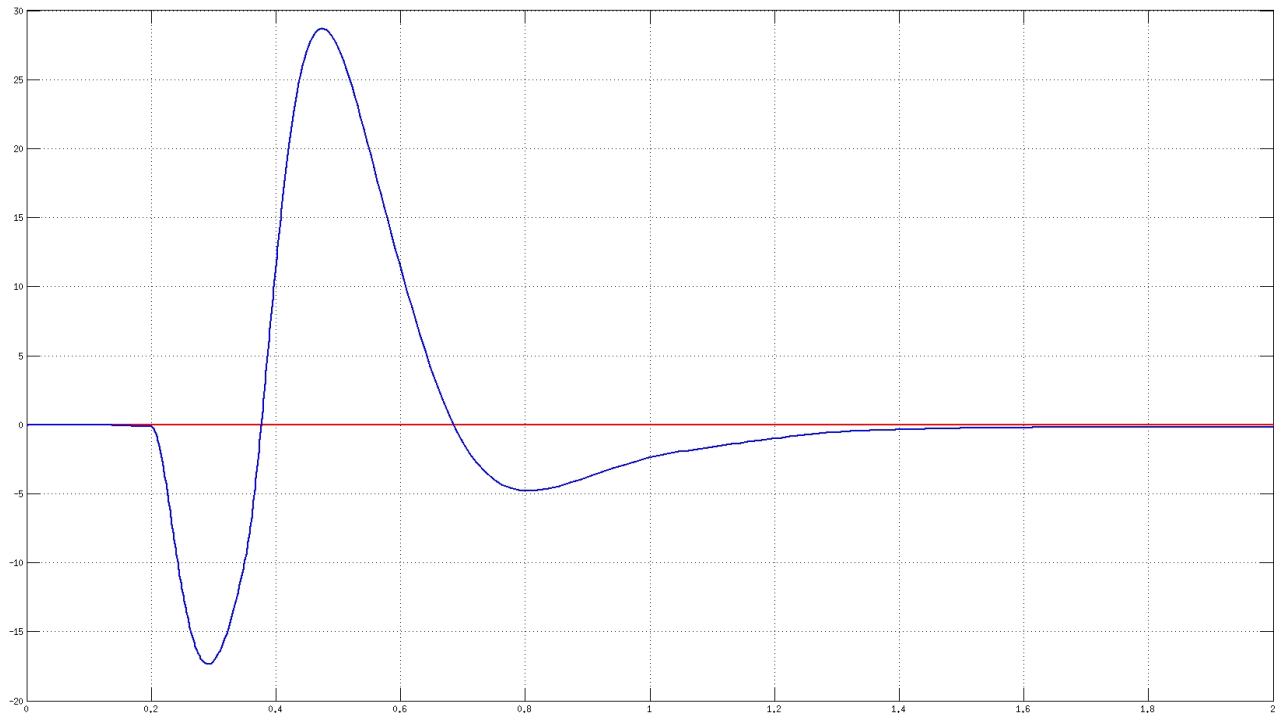


Рисунок В1 - зміна кута і моменту кінематичної пари ланок ВІСІ:
червоний - кут повороту ланки z; синій - момент відносно z

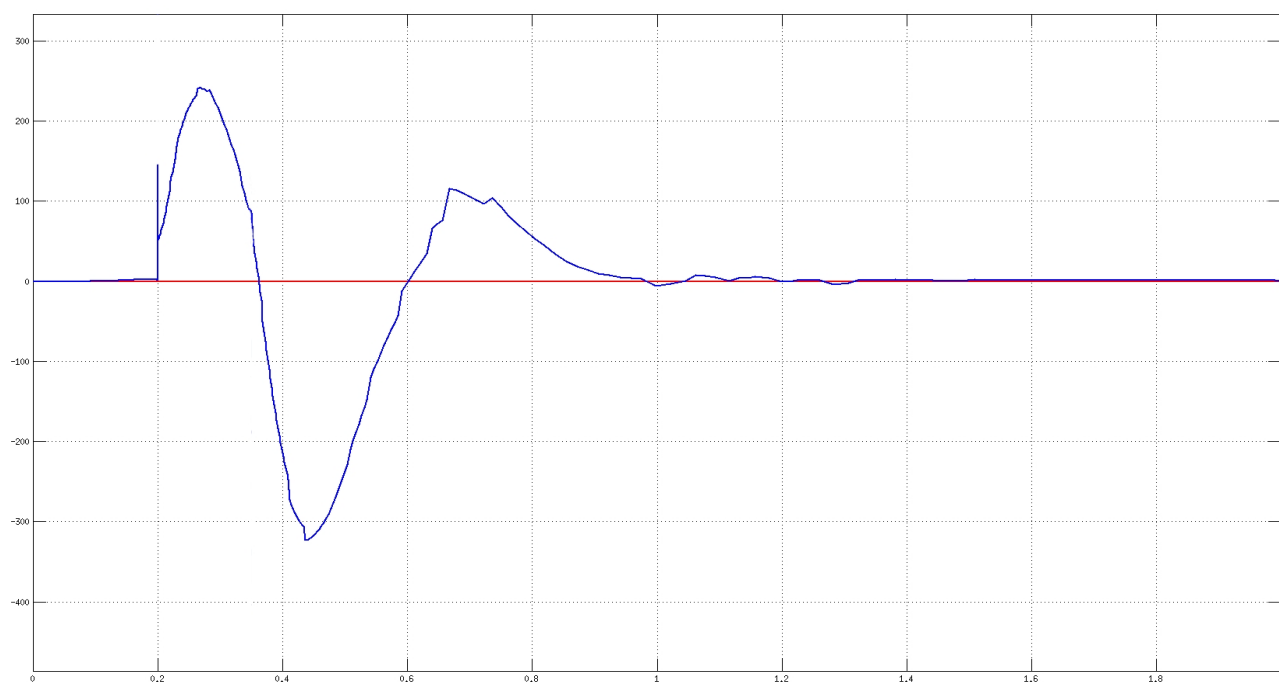


Рисунок В2 - зміна кутів і моментів кінематичної пари ланок $BrCr$:
синій- момент при повороті ланки у площині z ; червоний - кут повороту ланки у z

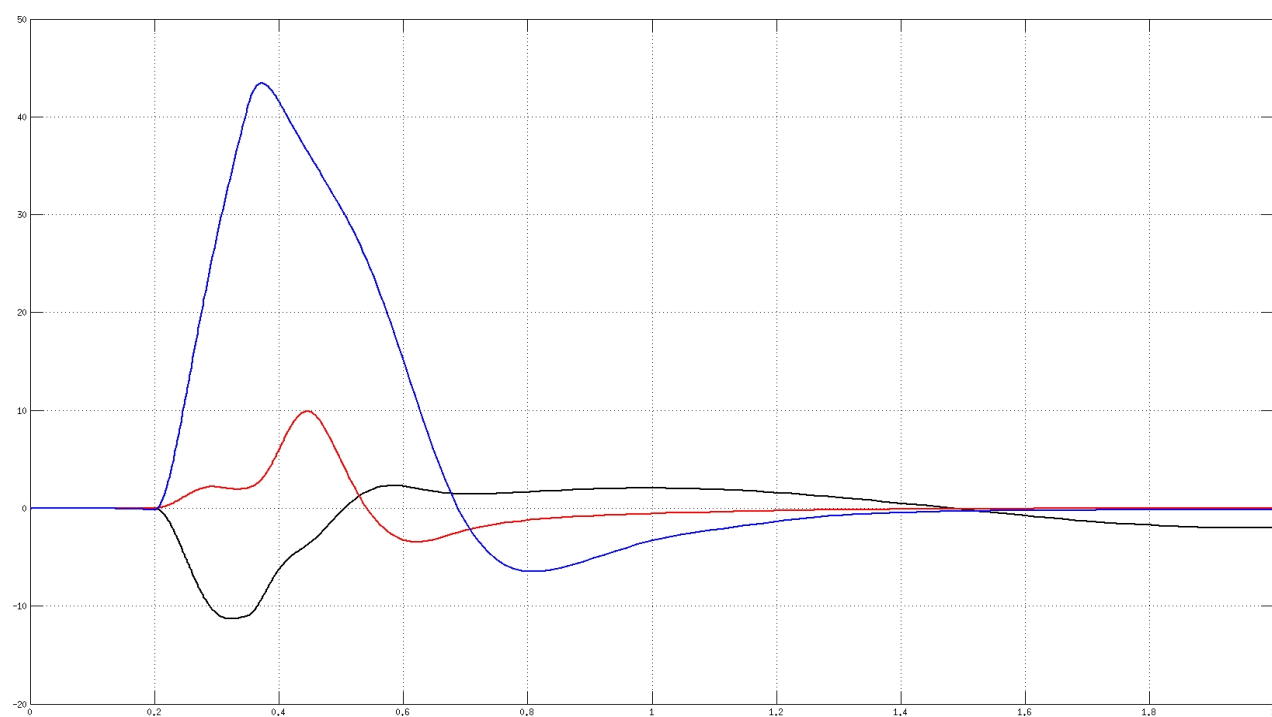


Рисунок В3 - зміна кутів кінематичної пари ланок $AB1$:
червоний - площа повороту ланки x ; чорний-площина повороту ланки y ; синій -площина повороту ланки z

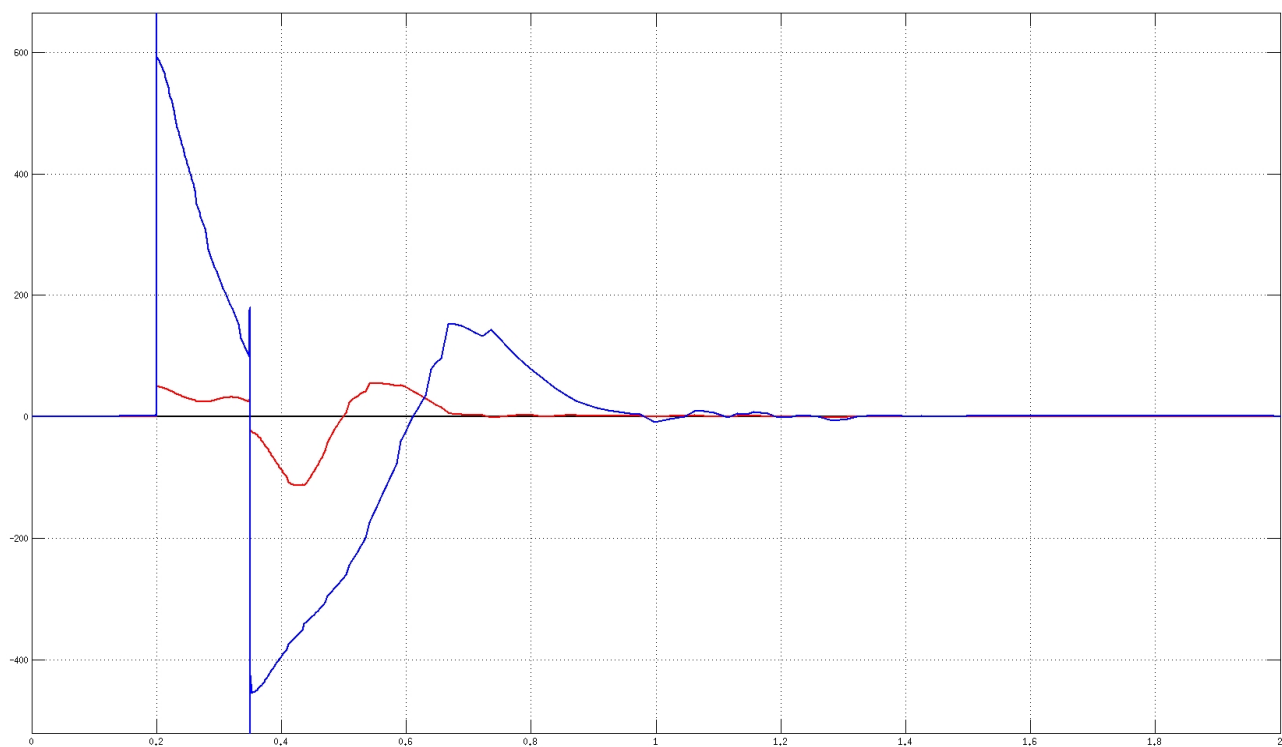


Рисунок В5 - зміна кутів кінематичної пари ланок ABr :
 червоний - площина повороту ланки x ; чорний-площина повороту ланки y ; синій -площина повороту ланки z

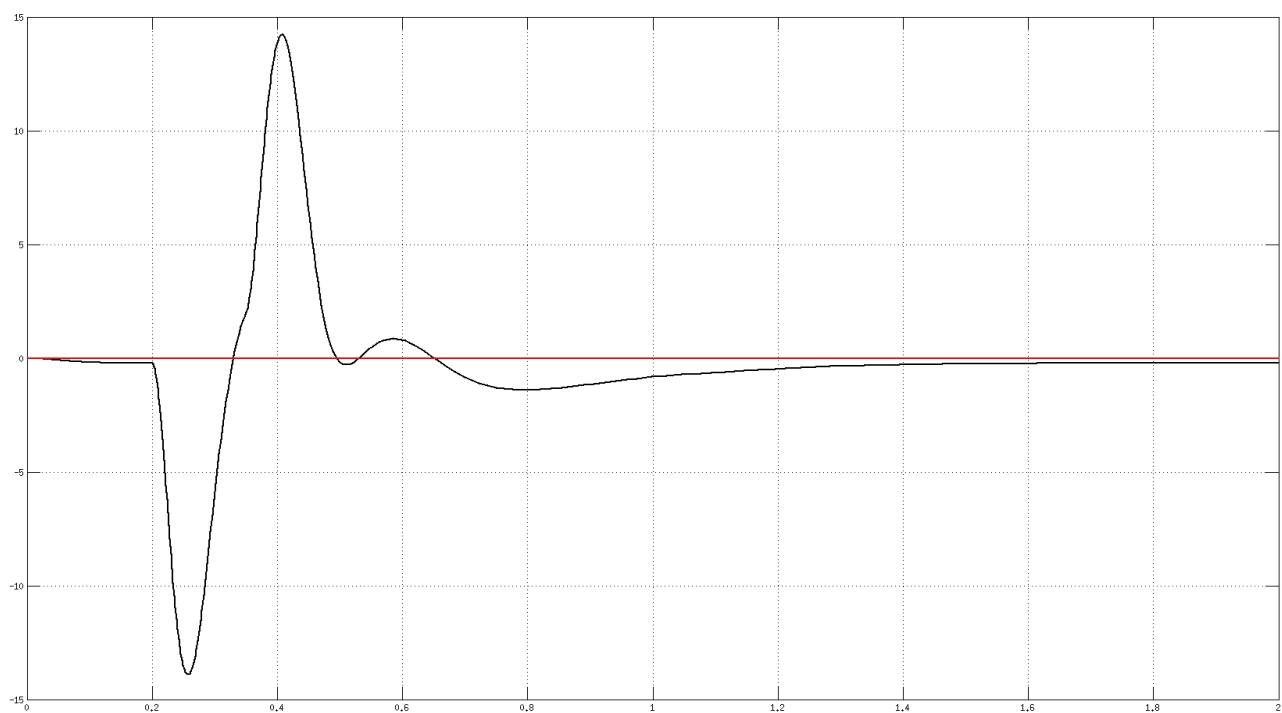


Рисунок В3 - зміна кутів кінематичної пари ланок $CIDl$:
 червоний -кут повороту ланки $y z$; чорний-момент при повороті ланки $y z$

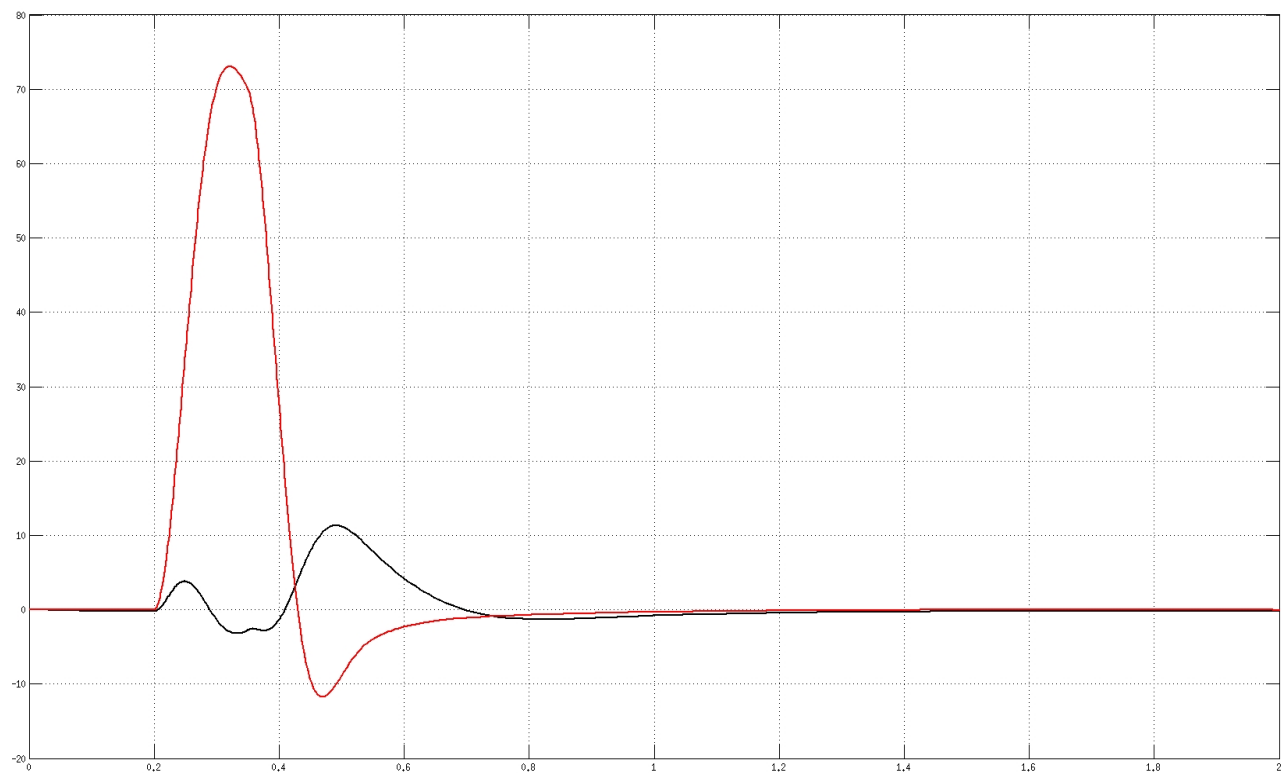


Рисунок В4 - зміна кутів кінематичної пари ланок CrDr:
червоний - кут повороту ланки у z ; чорний - момент при повороті ланки у z

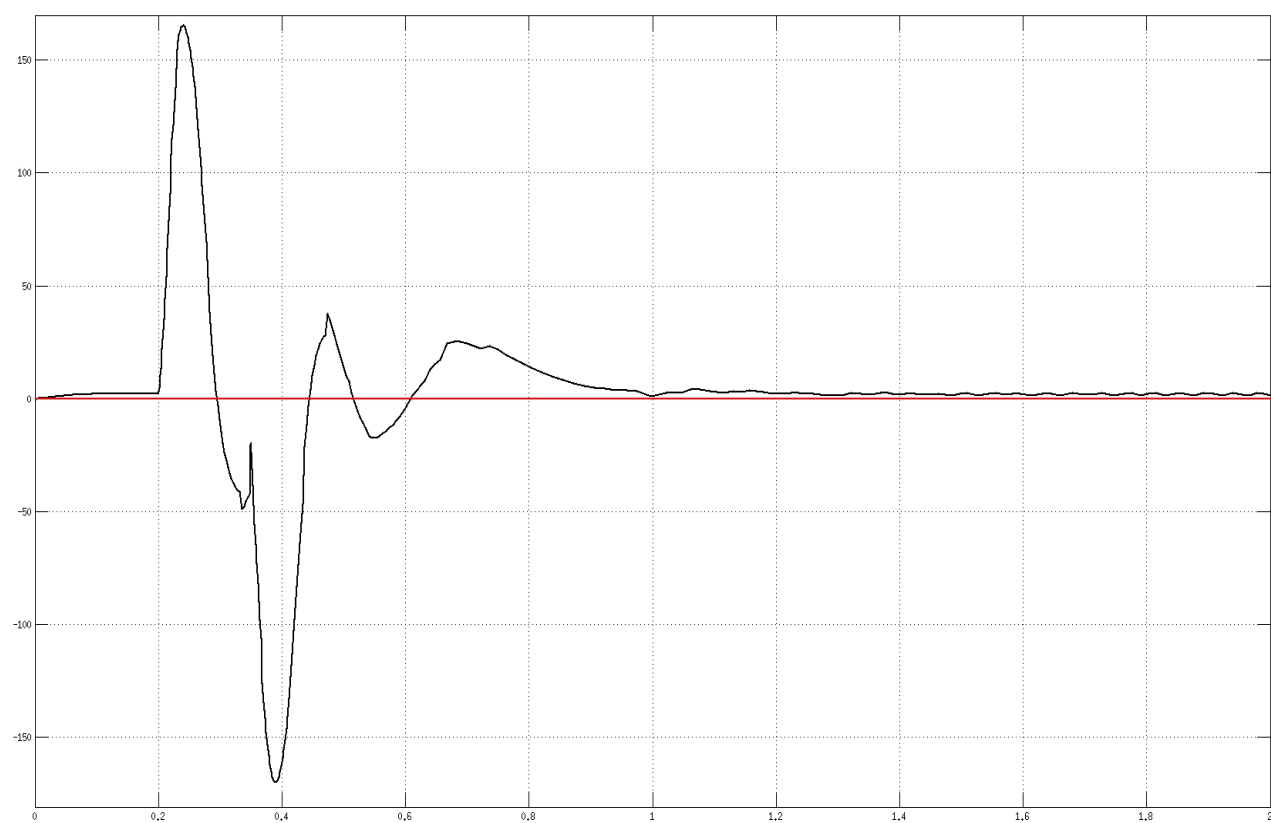


Рисунок В5 - зміна кутів кінематичної пари ланок CIDI:
червоний - площа повороту ланки z ; чорний - площа повороту ланки y

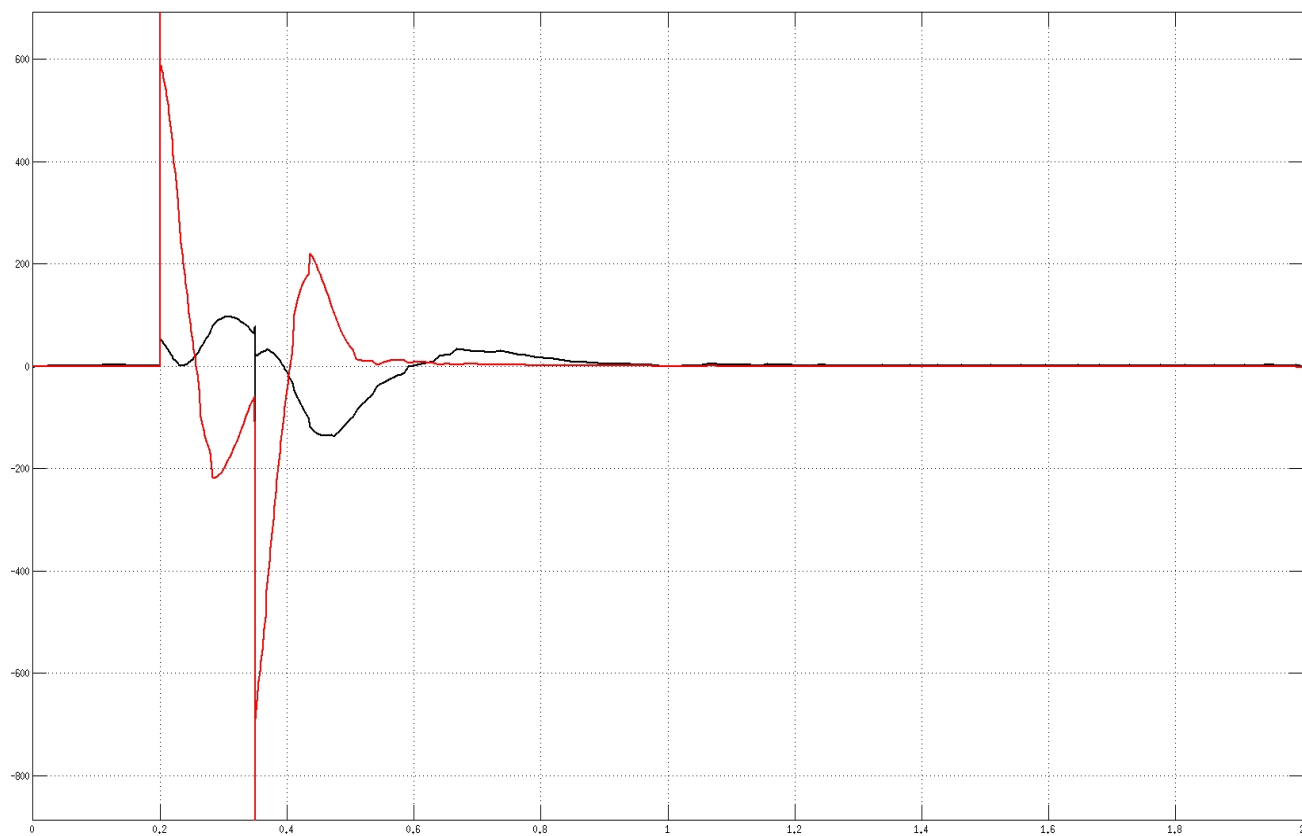


Рисунок В6 - зміна кутів кінематичної пари ланок $CrDr$:
 червоний - площина повороту ланки z ; чорний-площина повороту ланки y

Додаток Г.**Акти впровадження результатів дисертаційної роботи**

ЗАТВЕРДЖЕНО



В.о. Голови правління
ПРАТ "НВК "КУРС""
В.П. Беляков

2016 р.

АКТ

про впровадження в науково-дослідницький процес результатів дисертаційної роботи
Гуменного Дмитра Олександровича на тему "Автоматизація процесу керування
усталеним рухом антропоморфного крокуючого апарата"

Комісія у складі:

голови: головний конструктор "НВК "КУРС" ",
к.т.н., С. А. Матвієнко

Членів комісії: начальник відділу №2,
Годунок Л. Я.;
головний спеціаліст відділу №2,
Добровольський В. Ю.;
начальник відділу №3,
Кряталов М. П.

склала цей акт про впровадження в науково-дослідницький процес розробки і побудови експериментального робототехнічного обладнання для виконання орбітального сервісу, а саме: схвату і утримання некооперованих космічних апаратів.

Місце впровадження – Приватне підприємство "Науково-виробничий комплекс "КУРС"".

Склад впровадження:

- комплекс засобів зворотнього зв'язку за даними про розподіл сил реакції опорної поверхні для визначення величини і місце прикладання моментів при схваті клієнтського апарата;
- система управління усталеним рухом застосовується для безударного схвату і утримання некооперованого КА кінцевим ефектором робототехнічного обладнання.

Голова комісії

Члени комісії

С. А. Матвієнко

Л. Я. Годунок

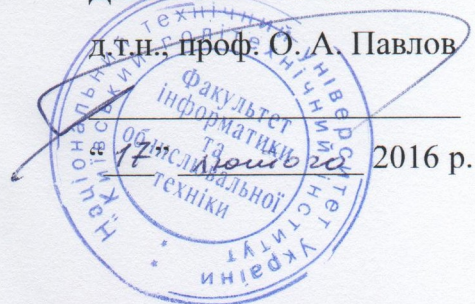
В. Ю. Добровольський

М. П. Кряталов

ЗАТВЕРДЖЕНО

Декан ФІОТ НТУУ “КПІ”

д.т.н., проф. О. А. Павлов



АКТ

**про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Гуменного Дмитра Олександровича на тему “Автоматизація процесу керування
усталеним рухом антропоморфного крокуючого апарата”**

Комісія у складі:

голови: к.т.н., доц. в.о. завідувача кафедрою
технічної кібернетики Ткача М. М.

Членів комісії: д.т.н., проф. Стеніна О. А.;
к.т.н., доц. Паська В. П.;
к.т.н., доц. Тимошина Ю. А.

склала цей акт про впровадження в навчальний процес лекційних матеріалів та методичних вказівок щодо виконання лабораторних робіт, розроблених Гуменним Д. О. на основі результатів його дисертаційної роботи.

Місце впровадження – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, кафедра технічної кібернетики.

Склад впровадження:

- лекції “Розв’язання задач нелінійного програмування методом множників Лагранжа” з курсу “Дослідження операцій”;
- лекції “Технічні засоби моніторингу сили та розподілу натиску” з курсу “Мікроконтролерні системи управління робототехнічними системами і комплексами”;
- методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з курсу “Елементи та компоненти гнучких комп’ютеризованих систем” (лабораторна робота № 3 на тему “Методи опису динаміки системи твердих тіл”.

Голова комісії

Члени комісії

к.т.н., доц. Ткач М. М.

д.т.н., проф. Стенін О. А.

к.т.н., доц. Пасько В. П.

к.т.н., доц. Тимошин Ю. А.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Головний конструктор
космічних апаратів,
комплексів та систем
ДП "КБ "Південне"

В.М. Маслей

"10"



АКТ

**про впровадження в науково-дослідницький процес результатів дисертаційної роботи
Гуменного Дмитра Олександровича на тему "Автоматизація процесу керування
усталеним рухом антропоморфного крокуючого апарата"**

Комісія у складі:

голови: заст. Головного конструктора космічних апаратів, комплексів та систем,
С.І. Москальов

Членів комісії: заст. Головного конструктора космічних апаратів, комплексів та систем
Шовкопляс Ю.А.;
начальник відділу 311,
Д.А. Галабурда;
начальник відділу 312,
О.Г. Меланченко.

склала цей акт про впровадження в науково-дослідницький процес розробки і побудови експериментального робототехнічного обладнання для виконання орбітального сервісу, а саме: схвату і утримання некооперованих космічних апаратів в умовах наявної похибки позиціювання клієнтського космічного апарата відносно міжорбітального транспортного апарата.

Місце впровадження – ДП "КБ "Південне".

Склад впровадження:

- стратегія управління положенням точки центру мас апарата ефективно застосована для управління кутовою складовою базової консолі механічного захватного пристрою;
- критерії дотримання усталеного руху апарата враховано при проектуванні кінцевого ефектора механічного захватного пристрою.

Голова комісії

С.І. Москальов

Члени комісії

Ю.А. Шовкопляс

Д.А. Галабурда

О.Г. Меланченко