



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_91
FTAXP 55.47.29

ЖЕТЕКТЕРДІ ҒАРЫШТЫҚ РОБОТОТЕХНИКА МАНИПУЛЯТОРЛАРЫН ӘЗІРЛЕУДЕ ҚОЛДАНУ

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИВОДОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МАНИПУЛЯТОРОВ КОСМИЧЕСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

APPLICATION OF ACTUATORS IN THE DEVELOPMENT OF SPACE ROBOTICS MANIPULATORS

Ф.Б. Ораз ^{1*}, А.Н. Оразалиева ¹, К.С. Иванов ¹, К.А. Алипбаев ¹

¹«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚ,
Алматы қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Ораз Фариза Байдосқызы, e-mail: f.oraz@au.es.kz

Түйін сөздер:

кинематикалық схема,
геологиялық жағдайларда
жұмыс, геологиялық
жұмыстар, манипулятор,
робототехника.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақалада кинематикалық схеманы таңдау орындалатын жұмысқа және манипулятордың жұмыс аймағының түріне сәйкес жүргізілуі қажет жетекке негізделген манипуляторды әзірлеу мәселелері қарастырылды. Манипулятордың маневрлік қабілетін қамтамасыз ету кинематикалық схеманы құрудағы негізгі міндет болып табылады. Осы мақсатта таңдалған схема негізінде кинематикалық және күштік талдау жүргізілді.

Арнайы мақсаттағы манипуляторлардың қарастырылып отырған түрі жоғары жылдамдыққа ие емес, өйткені құрылғыны пайдалану процесі үлкен жылдамдықты қажет етпейді. Сондықтан жеделдету және динамикалық жүктемелер аз болады. Кинематикалық талдау нәтижесінде алынған мәліметтер екінші тарауда 2-кестеде келтірілген.

Ротация модулінің күштік талдауында барлық модульдердің өзара әрекеттесуі нәтижесінде туындайтын инерция күштері анықталды. Манипулятордың әртүрлі модульдерден тұратын құрылымы олардың инерциялық параметрлері мен кедергі күштерін ескере отырып талданды.

Төртінші тарауда екі бөліктен тұратын қармау құрылғысының күштік есебі қарастырылды. Бірінші кезеңде манипуляция объектісін ұстап тұру үшін қармау губкалары жасаған күштік сәт анықталды. Екінші кезеңде қармау модулінің шығыс жүктемесі есептелді, ол келесі модульдің кіріс жүктемесі болып табылады. Бұл жағдайда айналу модулі зерттелді.

Жалпы алғанда, зерттеу нәтижелері манипуляторды жобалау және жетілдіру барысында қолдануға болатын маңызды техникалық көрсеткіштерді ұсынады. Бұл зерттеу болашақта ғарыштық манипуляторлардың дамуын жетілдіруге және олардың жұмыс тиімділігін арттыруға ықпал етеді. Сонымен қатар, алынған нәтижелер өндірістік роботтарды жобалау кезінде де қолданылуы мүмкін. Бұл зерттеу робототехниканың болашақ дамуында жаңа әдістерді енгізуге негіз бола алады. Оның нәтижелері робототехникалық жүйелердің тиімділігін арттыруда үлкен маңызға ие.



Ключевые слова:

кинематическая схема,
работа в геологических
условиях, геологические
работы, манипулятор,
робототехника.

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрены вопросы разработки манипулятора на основе привода, выбор кинематической схемы которого должен производиться в соответствии с выполняемой работой и типом рабочей зоны манипулятора. Обеспечение маневренности манипулятора является основной задачей при построении кинематической схемы. С этой целью был проведен кинематический и силовой анализ на основе выбранной схемы.

Рассматриваемый тип манипуляторов специального назначения не обладает высокой скоростью, так как процесс эксплуатации устройства не требует больших скоростей. Следовательно, ускорение и динамические нагрузки будут меньше. Данные, полученные в результате кинематического анализа, представлены во второй главе в табл. 2.

Силовой анализ модуля ротации выявил силы инерции, возникающие в результате взаимодействия всех модулей. Структура манипулятора, состоящая из различных модулей, анализировалась с учетом их инерционных параметров и сил сопротивления.

В четвертой главе рассмотрен силовой расчет устройства захвата, состоящего из двух частей. На первом этапе определялся момент силы, создаваемый захватными губками для удержания объекта манипуляции. На втором этапе рассчитывалась выходная нагрузка модуля захвата, которая является входной нагрузкой следующего модуля. В этом случае был изучен модуль вращения.

В целом, результаты исследования предоставляют важные технические показатели, которые можно использовать в процессе проектирования и совершенствования манипулятора. Это исследование будет способствовать совершенствованию разработки космических манипуляторов в будущем и повышению эффективности их работы. Кроме того, полученные результаты также могут быть использованы при проектировании промышленных роботов. Это исследование может стать основой для внедрения новых методов в будущее развитие робототехники. Его результаты имеют большое значение для повышения эффективности робототехнических систем.

keywords:

kinematic scheme, working
in geological conditions,
geological work,
manipulator, robotics

ABSTRACT

This article discusses the development of a manipulator based on a drive, the kinematic scheme of which should be selected in accordance with the work performed and the type of working area of the manipulator. Ensuring the maneuverability of the manipulator is the main task in constructing the kinematic scheme. For this purpose, kinematic and force analysis was carried out based on the chosen scheme.

This type of special-purpose manipulators does not have high speed, since the operation of the device does not require high speeds. Therefore, acceleration and dynamic loads will be less. The data obtained as a result of kinematic analysis are presented in the second chapter in table 2.

The force analysis of the rotation module revealed inertia forces resulting from the interaction of all modules. The structure of the



manipulator, consisting of various modules, was analyzed taking into account their inertial parameters and resistance forces.

In the fourth chapter, the force calculation of the capture device, consisting of two parts, is considered. At the first stage, the moment of force created by the gripping jaws to hold the object of manipulation was determined. At the second stage, the output load of the capture module was calculated, which is the input load of the next module. In this case, the rotation module was studied.

In general, the results of the study provide important technical indicators that can be used in the process of designing and improving the manipulator. This research will contribute to improving the development of space manipulators in the future and increasing their efficiency. In addition, the results obtained can also be used in the design of industrial robots. This research can become the basis for the introduction of new methods in the future development of robotics. His results are of great importance for improving the efficiency of robotic systems.

КІРІСПЕ

Ғарышта қолдануға арналған роботталған жүйелерді дамыту қазіргі ғылым мен техниканың ажырамас бөлігі болып табылады. Жыл сайын ғарыштың экстремалды жағдайларында тапсырмаларды орындай алатын технологияларға қойылатын талаптар күшейіп келеді. Бұл адам өміріне қауіптілік деңгейінің жоғары болуына байланысты: радиация, микрогравитация, экстремалды температуралар және вакуум. Осыған байланысты ашық ғарышта және планеталардың бетінде тиімді жұмыс істей алатын робототехникалық кешендерді құруға ерекше назар аударылады.

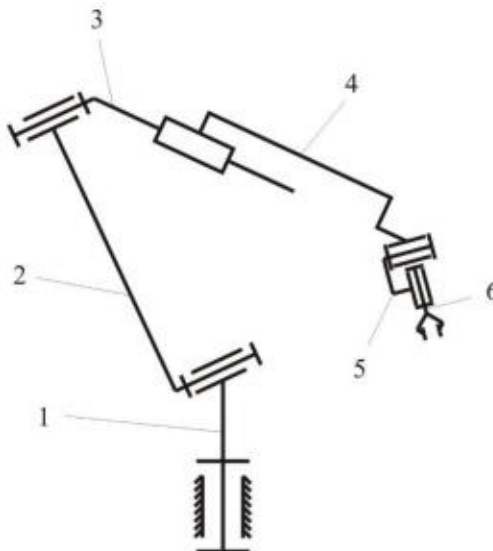
Ғарыштық роботтар спутниктерді орбитада қызмет көрсету және жөндеу, ғарыш станциялары үшін модульдер мен құрылымдарды жинау, сондай-ақ қолданыстағы спутниктер мен ғарыш аппараттары үшін елеулі қауіп төндіретін ғарыш қоқыстарын жою сияқты көптеген міндеттерді шешуде маңызды рөл атқарады. Бұл роботтар әртүрлі манипуляторлармен, сенсорлармен және арнайы операцияларды орындауға арналған құралдармен жабдықталуы мүмкін, бұл олардың функционалдық мүмкіндіктерін айтарлықтай кеңейтеді. (Louback, Machado, Bruck, Kollmeyer & Emadi, 2022; James, Thomas, 2021). Сонымен қатар, роботталған жүйелер басқа планеталар мен астероидтарда ғылыми зерттеулер жүргізу үшін қажет. Олар геологиялық талдау жүргізуге, топырақ үлгілерін жинауға, сондай-ақ алынған деректерді Жерге жіберуге қабілетті, бұл ғарыштық ғылым мен технологияның дамуына ықпал етеді. Осылайша, робототехника ғарышты игерудің және адам өз бетінше шеше алмайтын күрделі тапсырмаларды орындаудың ең маңызды құралы болып табылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Кинематикалық схеманы таңдау

Манипулятордың кинематикалық сұлбасын таңдағанда, манипулятордың жұмыс аймағының түрін ескеру қажет (Ivanov, Tulekenova, Seccarelli, 2021). Алайда, арнайы мақсаттағы робот-манипулятордың нақты жұмыс аймағы болмайды. Кинематикалық сұлбаны құрастырудағы басты міндет — манипулятордың маневрлік қабілетін қамтамасыз ету. Сондықтан бұл мәселені шешу толығымен әзірлеушінің құзыретіне жатады.

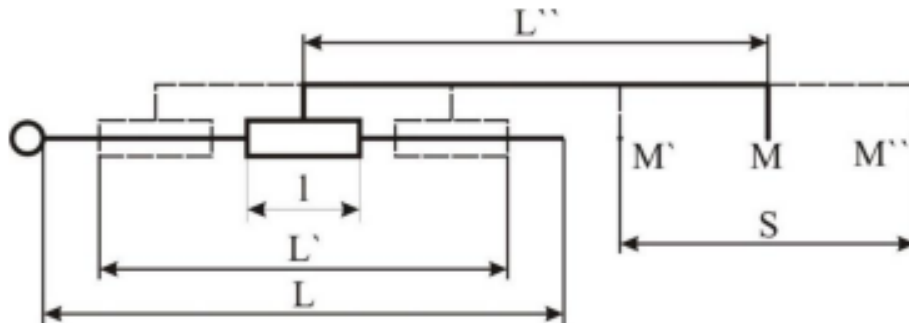
Әзірленген роботтың кинематикалық сұлбасы 1-суретте көрсетілген және ол бұрылу, иықты еңкейту, білек еңкейту, жазу, білекті еңкейту және айналу модульдерінен тұрады.



1-сурет. Робот манипуляторының кинематикалық схемасы

Ескерту – (Ivanov & Tulegenova, 2021) негізінде құрастырылған.

Кинематикалық сұлбаны таңдағаннан кейін, алынған орын ауыстыруларға сәйкес буын ұзындықтары есептеледі. Айналу модульдері буын ұзындықтарын есептеуді қажет етпейтіндіктен, бұл сұлбада тек шығу модулінің өлшемдерін анықтау қажет. Бұл үшін кеңейту модулін жеке қарастыру керек. Қарастырылып отырған модульдің сұлбасы 2-суретте көрсетілген.(Ivanov & Tulegenova, 2021.)



2-сурет. Кеңейту модулінің схемасы

Ескерту – (Корескі, 2021) негізінде құрастырылған

Өзек (стержень) ұзындығы қажетті қозғалыстың 0,1-і ретінде анықталады.

$$l = 0,1S = 0,1 \cdot 0,2 = 0,02 \text{ м}, \quad (1)$$

2-суретте көрсетілген L , L' және L'' ұзындықтары бағыттаушының толық өлшемін, бағыттаушының ұзындығын, жылжыма ұзындығын және модульдің қозғалмалы бөлігінің қосылу өлшемін анықтайды. Бұл өлшемдер 2, 3, 4 формулалармен анықталады (Корескі, 2021, Trubachev, 2024)

$$L' = 1,1S = 1,1 \cdot 0,2 = 0,22 \text{ м}. \quad (2)$$

$$L = 1,2S = 1,2 \times 0,2 = 0,24 \text{ м}. \quad (3)$$

$$L'' = 1,15S = 1,15 \times 0,2 = 0,23 \text{ м}. \quad (4)$$



Есептелген байланыс ұзындықтарынан басқа, берілген байланыстардың ұзындықтарын анықтау қажет. Бұл байланыстар иық модулі, қол модульдері және айналу модульдерін қамтиды. Кейбір жағдайларда айналу модулінің өлшемдерін ескеру қажет. Кесте 1-де кейінгі есептеулерге қажетті байланыс ұзындықтары көрсетілген.

Кинематикалық талдау

Манипулятор модульдерінің кинематикасында мынадай ұғымдар пайдаланылады:

- модульдің жүруі;
- жауап беру уақыты;
- үдеу уақыты;
- тежелу уақыты;
- әрекет жылдамдығы.

1-кесте. Манипулятор буындарының ұзындығы

Атауы	Ұзындығы, м
Иық модулі	0,6
Білек модулі (жазылу модулін қоса алғанда)	0,6
Білектің еңкею модулі	0,07
Айналу модулі	0,03
<i>Ескерту – автормен құрастырылған</i>	

Кинематика есептерін практикалық есептеуде модульдің жүріс кезіндегі жауап беру уақыты үш фазадан тұрады:

- үдеу;
- тұрақты қозғалыс;
- тежелу.

$$T = t_a + t_{st} + t_d, \quad (5)$$

мұндағы t_a – үдеу уақыты,

t_{st} – тұрақты қозғалыс уақыты,

t_d – тежелу уақыты ($t_p > t_r$) (Ivanov, Ceccarelli, Yestemessova, Nurgizat & Balbayev, 2019).

Модульдің жұмыс уақыты және оның фазалары жетектің түріне, инерциялық параметрлерге, кедергі күштеріне және тежегіш құрылғысына байланысты. 3-суретте көрсетілген жылдамдық графигінде үдеу және тежелу кезінде жылдамдықтың сызықтық өзгеруі болжанады, ал тұрақты қозғалыс фазасында жылдамдық тұрақты. Жетек түріне байланысты үдеу және тежелу уақытының коэффициенттері таңдалады. Электромеханикалық жетек үшін $k_a=0,2$ және $k_d=0,1$.

$$k_a = \frac{t_a}{T}, \quad (6)$$

$$k_d = \frac{t_d}{T} \quad (7)$$

Модульдің жауап беру жылдамдығын практикалық есептеулер кезінде үдеу және тежелу үшін уақытты ескере отырып, 8 және 9 формулалар пайдаланылады:

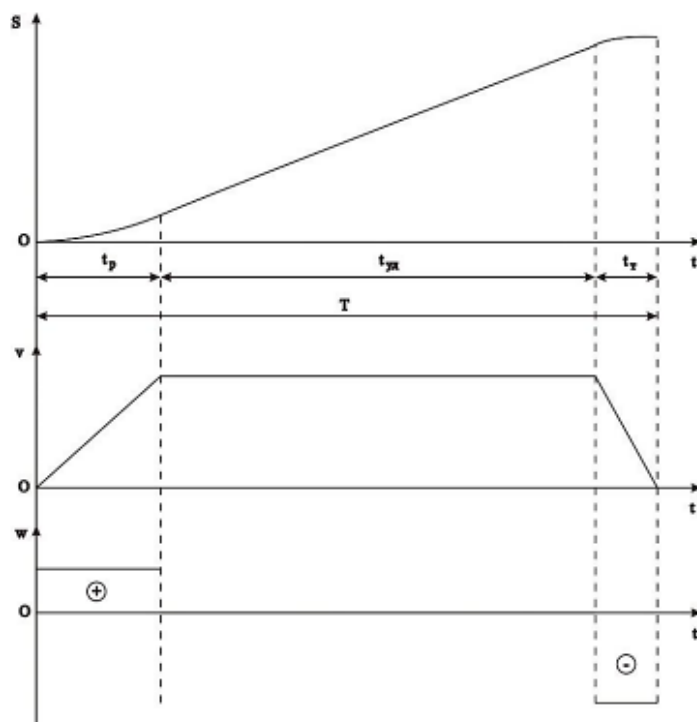
$$v = \frac{S}{T} \cdot \frac{1}{1-0.5(k_a+k_d)}, \quad (8)$$

$$\omega = \frac{\varphi}{T} \cdot \frac{1}{1-0.5(k_a+k_d)}, \quad (9)$$

мұндағы S – модульдің жүрісі;

T – модульдің жұмыс уақыты;

φ – айналу бұрышы.



3-сурет. Жылдамдық графигі

Ескерту – автормен құрастырылған

Үдеуді есептеу үшін үдеу және тежелу уақыттарының формулалары қолданылады, алайда, есептеу үшін тұрақты қозғалыс кезінде үдеу нөлге тең.

$$w_p = \frac{s}{T^2} \cdot \frac{1}{k_p[1-0.5(k_p+k_m)]'} \quad (10)$$

$$w_m = \frac{s}{T^2} \cdot \frac{1}{k_m[1-0.5(k_p+k_m)]'} \quad (11)$$

Сондай-ақ, арнайы мақсаттағы роботталған манипуляторлардың көпшілігі жоғары жылдамдыққа ие емес екенін атап өткен жөн, өйткені құрылғы қолданылатын процесс үлкен жылдамдықтарды қажет етпейді, сондықтан үдеулер мен динамикалық жүктемелер аз болады. (Ivanov 2019; Иванов, 2019)

Жүргізілген есептеулер нәтижесінде алынған деректер 2-кестеде жинақталған. Бұл кестеде үдеу және тежелу кезінде ең үлкен үдеу мәндері көрсетілген.

2-кесте. Жылдамдық және үдеу есептеулерінің нәтижелері

Атауы	Жүріс, рад/м	Уақыт, с	Жылдамдық, рад/с, м/с	Үдеу, рад/с ² , м/с ²
Айналу	2π	50	0,148	0,03
Номинациялар	0,2	40	0,006	0,002
Білек	3,58	72	0,059	0,008
Иық	2,8	64	0,052	0,008

Ескерту – автормен құрастырылған

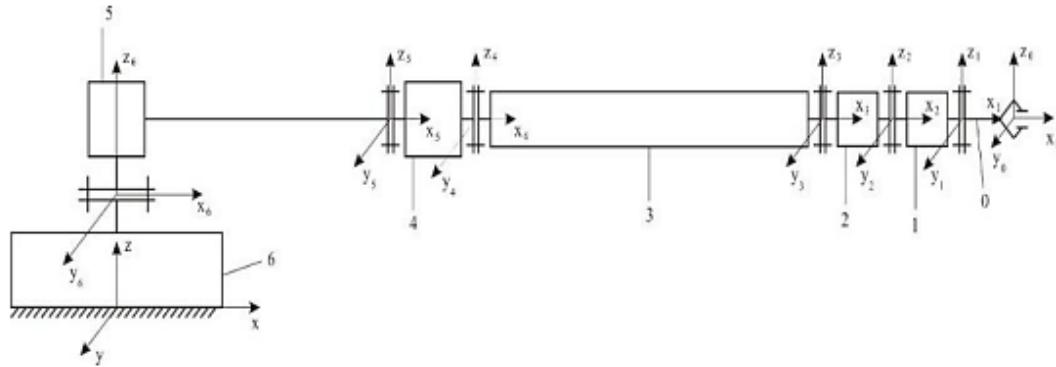
Манипулятордың күштік талдауы

Ашық кинематикалық тізбегі бар манипулятордың күштік талдауы кинематикалық жұптағы күштерді анықтайды, олар манипулятордың жетектеріндегі күштерге сәйкес келеді. Алынған деректер кеңейту модулі үшін электр қозғалтқышты есептеу және таңдау



үшін пайдаланылады. Жеке модульдерден тұратын құрылым ретінде манипулятордың күшін есептеу кезінде, олардың инерциялық параметрлері мен кедергі күштерін ескере отырып, модульдердің құрамдас бөліктеріне әсер ететін күштерді анықтау қажет (Kim, Kim, Choi, 2020; Louback, Machado, Bruck, Kollmeyer & Emadi, 2022)

Бастапқы міндет – модульдерден тұратын манипулятордың схемасын анықтау. Бұл манипулятор схемасы 4-суретте көрсетілген.



4-сурет. Манипулятордың модульдік схемасы

Ескерту – автормен құрастырылған

4-суретте келесі модульдер нөмірлермен белгіленген:

- 0 – қармау;
- 1 – айналу модулі;
- 2 – білектің еңкею модулі;
- 3 – кеңейту модулі;
- 4 – білек еңкею модулі;
- 5 – иық еңкею модулі;
- 6 – бұрылу модулі.

Күштік талдау әрбір модуль қармағынан бастап соңғы модульге дейін қарастырады. Есептеу үшін модульдің бастапқы деректері модульдің кіріс жүктемесі және модульдің қозғалмалы және қозғалмайтын бөлігіне инерциялық жүктемелерді қамтиды.

Кіріс жүктеме P векторы, ол негізгі момент M және негізгі күш векторын R қамтиды:

$$\bar{P} = [P_x \ P_y \ P_z \ P_\alpha P_\beta P_\gamma]^T, \quad (12)$$

мұндағы P_x, P_y, P_z - сәйкесінше x, y, z осьтеріндегі R векторының проекциялары;

$P_\alpha, P_\beta, P_\gamma$ сәйкесінше x, y, z осьтеріндегі негізгі момент M проекциялары.

Қозғалмалы және қозғалмайтын бөліктерге инерциялық жүктемелер векторлары кіріс жүктемесінің векторына сәйкес.

$$\bar{H}^n = [H_x^n H_y^n H_z^n H_\alpha^n H_\beta^n H_\gamma^n]^T. \quad (13)$$

$$\bar{H}^h = [H_x^h H_y^h H_z^h H_\alpha^h H_\beta^h H_\gamma^h]^T. \quad (14)$$

Шығыс жүктеме векторы келесідей түрге ие:

$$\bar{P}_{i+1} = \bar{P}_i^p + \bar{P}_i^n + \bar{P}_i^h, \quad (15)$$

мұндағы $\bar{P}_i^p$ – модульдің кірісіндегі жүктемеден шығатын вектор,

$\bar{P}_i^n$ – модульдің қозғалмалы бөлігінің инерциялық күштерінен шығатын вектор,

$\bar{P}_i^h$ – модульдің кірісіндегі жүктемеден шығатын вектор.

Жоғарыда сипатталған үш вектор түрлендіру матрицасына кіріс жүктемелерінің көбейтіндісі болып табылады, ол мынадай түрге ие:

$$B_{i(i+1)} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_i & -y_i & 1 & 0 & 0 \\ -z_i & 0 & x_i & 0 & 1 & 0 \\ y_i & -x_i & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Осылайша, 15 және 16 формулаларын салыстыра отырып, біз жүктеменің шығыс векторының толық көрінісін аламыз $\bar{P}_{i+1}$:

$$\bar{P}_{i+1} = B_{i(i+1)}^P \bar{P}_i + B_{i(i+1)}^n \bar{H}_i^n + B_{i(i+1)}^H \bar{H}_i^H. \quad (17)$$

Қармау күшін талдау

Қармаудың күштік есебі екі бөліктен тұрады. Бірінші кезеңде манипуляция объектісін ұстап тұру үшін қармау тубкаларымен жасалатын сәт анықталады. Екінші кезеңде қармау модулінен шығу жүктемесі есептеледі, ол сондай-ақ келесі модульдің, бұл жағдайда айналу модулінің кіру жүктемесі болып табылады.

Объектіні қармау үшін қармау құрылғысының тістері жасайтын айналу моменті M_3 , барлық модульдердің жұмысы нәтижесінде пайда болатын объектінің инерциялық күштерін жеңуге тиіс. 5-суреттен көрініп тұрғандай, M_3 моменті x және z осьтеріне әсер ететін күштерді жеңуге тиіс. (Machado, Kollmeyer, Barroso, Emadi, 2021)

Сәйкесінше, M_3 моменті x және z осьтері бойымен әсер ететін күштерді жеңуге арналған M_{3x} және M_{3z} екі моменттен тұрады:

$$M_3 = M_{3x} + M_{3z}. \quad (18)$$

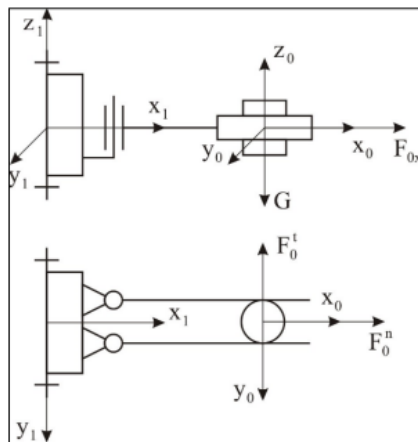
M_{3x} моменті келесі формула бойынша есептеледі:

$$M_{3x} = \frac{(F_0^n + F_{0x})l}{f}, \quad (19)$$

Момент басқарылатын объектінің ауырлық күшін теңестіреді және келесі формула бойынша есептеледі:

$$M_{3z} = \frac{Gl}{f} = \frac{mgl}{f}, \quad (20)$$

мұндағы G – басқарылатын объектінің ауырлық күші, m – объектінің массасы, g – еркін түсу үдеуі.



5-сурет. Қармау құрылғысының схемалық диаграммасы

Ескерту – автормен құрастырылған



мұндағы F_0^n – объектінің инерциялық күші, ол модульдердің орталықтан тепкіш үдеулері нәтижесінде пайда болады;

F_{0x} – кеңейту модулінің жұмысы нәтижесінде пайда болатын инерциялық күш;

l – қармау құрылғысының ұзындығы;

f – қысу еріншесі материалының үйкелу коэффициенті. (Lin, Feng, Mo & Li, 2019.)

Центрден тепкіш инерция күші F_0^n келесі формуламен анықталады:

$$F_0^n = m(x_{06}\omega_6^2 + x_{05}\omega_5^2 + x_{04}\omega_4^2 + x_{02}\omega_2^2). \quad (21)$$

Ұзарту модуліне әсер ететін инерциялық күш келесі формула бойынша есептеледі:

$$F_{0x} = mw_3. \quad (22)$$

18-22 формулаларына тиісті мәндерді қойып, біз объектінің қармау құрылғысының тістерінің айналдыру моментін алдық $M_3=73,66$ Н.

Қармау модулінің шығатын жүктеме векторы келесі формула бойынша анықталады:

$$\bar{P}_0 = \begin{bmatrix} P_{0x} \\ P_{0y} \\ P_{0z} \\ P_{0\alpha} \\ P_{0\beta} \\ P_{0\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m(x_{06}\omega_6^2 + x_{05}\omega_5^2 + x_{04}\omega_4^2 + w_3 + x_{02}\omega_2^2) \\ mx_{06}\varepsilon_6 \\ m(x_{05}\varepsilon_5 + x_{04}\varepsilon_4 + x_{02}\varepsilon_2) + G \\ \frac{2mR^2\varepsilon_1}{5} \\ Gx_{05} + mx_{05}^2\varepsilon_5 + mx_{04}^2\varepsilon_4 + mx_{02}^2\varepsilon_2 \\ mx_{06}^2mx_{04}^2\varepsilon_6 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Тиісті мәндерді қойып, келесі нәтижеге жеттік:

$$\bar{P}_0 = [0,0754 \ 0,0455 \ 49,1261 \ 0,0004 \ 63,7735 \ 0,0592]^T.$$

Бастапқы есептеулерде қармау құрылғысы айналу модуліне бекітілген деп болжанады, сондықтан $\bar{P}_0$ қармау модулінің шығатын жүктеме векторы $\bar{P}_1$ келесі модульдің кіріс жүктеме векторына тең, яғни, $\bar{P}_1 = \bar{P}_2$.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Манипулятор модульдерінің күштік талдауы

Айналу модулінің күштік талдауында барлық модульдердің жұмысы нәтижесінде пайда болатын оның қозғалмалы және қозғалмайтын бөліктерінің инерция күштері анықталады. Қозғалмалы бөліктің инерция күштерінен туындаған жүктеме келесі түрде болады (Mantriota, Reina, 2021; Alipbayev, Ivanov, Sultan & Komekbayev, 2024)

$$\bar{H}_1^n = [0,0059 \ 0,0036 \ 0,0065 \ 0,00000 \ 0,007 \ 0,0015]^T$$

$$\bar{H}_1^n = \begin{bmatrix} H_{1x}^n \\ H_{1y}^n \\ H_{1z}^n \\ H_{1\alpha}^n \\ H_{1\beta}^n \\ H_{1\gamma}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1^n(x_{16}\omega_6^2 + x_{15}\omega_5^2 + x_{14}\omega_4^2 + w_3 + x_{12}\omega_2^2) \\ m_1^n x_{16}\varepsilon_6 \\ m_1^n(x_{15}\varepsilon_5 + x_{14}\varepsilon_4 + x_{12}\varepsilon_2) \\ \frac{2m_1^n R_1^n \varepsilon_1}{5} \\ m_1^n(x_{15}^2\varepsilon_5 + x_{14}^2\varepsilon_4 + x_{12}^2\varepsilon_2) \\ \frac{m_1^n R_{06}^2 \varepsilon_6}{3} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

(16) формулаға сәйкес түрлендіру матрицасы келесі түрде болады:

$$B_{12}^n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.03 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Кіріс жүктеме векторы үшін түрлендіру матрицасы да осындай болады $B_{12}^p = B_{12}^n$.

Қозғалмайтын бөлік білектің еңкею модулімен байланысты болғандықтан түрлендіру матрицасы B_{12}^n бірлік матрица болып табылады. Жоғарыда алынған мәндерді 17 формулаға қойып, келесі нәтижеге жеттік:

$$\bar{P}_2 = B_{12}^p \bar{P}_1 + B_{12}^n \bar{H}_1^H + B_{12}^H \bar{H}_1^H = |0,0914 \ 0,0562 \ 49,1451 \ 0,0004 \ 65,2677 \ 0,0622|^T.$$

25 формулаға тиісті мәндерді қойып, келесі нәтижені алдық:

$$\bar{H}_1^H = |0,0101 \ 0,0071 \ 0,0125 \ 0 \ 0,0132 \ 0,003|^T.$$

Қозғалмайтын бөліктің инерция күшінен жүктеме былайша анықталады:

$$\bar{H}_1^n = \begin{bmatrix} H_{1x}^H \\ H_{1y}^H \\ H_{1z}^H \\ H_{1\alpha}^H \\ H_{1\beta}^H \\ H_{1\gamma}^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1^H(x_{16}\omega_6^2 + x_{15}\omega_5^2 + x_{14}\omega_4^2 + w_3 + x_{12}\omega_2^2) \\ m_1^H x_{16} \varepsilon_6 \\ m_1^H(x_{15}\varepsilon_5 + x_{14}\varepsilon_4 + x_{12}\varepsilon_2) \\ \frac{2m_1^H R_{11}^H \varepsilon_1}{5} \\ m_1^H(x_{15}^2 \varepsilon_5 + x_{14}^2 \varepsilon_4 + x_{12}^2 \varepsilon_2) \\ \frac{m_1^H R_{06}^2 \varepsilon_6}{3} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Келесі модульдердің қуатын талдау ұқсас болғандықтан, төменде әрбір модуль үшін есептік деректер ғана берілген.

$$\bar{H}_2^n = |0,0103 \ 0,0062 \ 0,0109 \ 0 \ 0,0115 \ 0,0026|^T,$$

$$\bar{H}_2^H = |0,0139 \ 0,0067 \ 0,0115 \ 0 \ 0,0115 \ 0,0027|^T,$$

$$\bar{P}_3 = |0,1156 \ 0,0691 \ 49,1675 \ 0 \ 0,0004 \ 68,7322 \ 0,0632|^T.$$

Ұзарту модулі:

$$\bar{H}_3^n = |0,0238 \ 0,0143 \ 0,0244 \ 0 \ 0,0245 \ 0,0057|^T,$$

$$\bar{H}_3^H = |0,0139 \ 0,0106 \ 0,0155 \ 0 \ 0,011 \ 0,003|^T,$$

$$\bar{P}_4 = |0,1533 \ 0,094 \ 49,2074 \ 0 \ 0,0004 \ 98,2828 \ 0,0276|^T.$$

Білек еңкею модулі:

$$\bar{H}_4^n = |0,0049 \ 0,0042 \ 0,0048 \ 0 \ 0,0028 \ 0,0008|^T,$$

$$\bar{H}_4^H = |0,0049 \ 0,0042 \ 0,0048 \ 0 \ 0,0028 \ 0,0008|^T,$$

$$\bar{P}_5 = |0,1631 \ 0,01024 \ 49,217 \ 0,0004 \ 127,8186 \ 0,5398|^T.$$

Иық еңкею модулі:

$$\bar{H}_5^n = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,0048 \ 0,0017|^T,$$

$$\bar{H}_4^H = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,0001|^T,$$

$$\bar{P}_6 = |0,1631 \ 0,1024 \ 49,217 \ 0,0004 \ 127,8234 \ 0,5416|^T.$$

Іінтіректің көлбеу модулінен шығу жүктемесі іінтіректің бұрылу модулі үшін жүктеме болып табылады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл мақалада келесі мәселелер қарастырылды:

1) Кинематикалық схеманы таңдау.

2) Кинематикалық талдау. Модульдің жауап беру уақыты және оның фазасы жетек типіне, инерциялық параметрлерге, кедергі күштеріне және тежеу құрылғысына



байланысты болады. Жетек түріне байланысты жылдамдық және тежеу уақытының коэффициенттері таңдалады. Электр механикалық жетек үшін $k_p = 0,2$ және $k_r = 0,1$ коэффициенттері.

3) Айналу модулінің күштік талдауы барлық модульдердің жұмысынан туындайтын оның жылжымалы және жылжымайтын бөліктерінің инерция күштерінен жүктемелерді анықтайды.

Ғылыми жаңашылдығы – манипулятордың модульдік құрылымын ескере отырып күштік модельдеудің интеграцияланған әдістемесін ұсыну, сондай-ақ әрбір модуль үшін кіріс-шығыс күштік векторлар мен түрлендіру матрицалары арқылы бірізді есептеулер жүргізу әдісі.

Зерттеудің практикалық маңызы – алынған нәтижелер ғарыштық ортада жұмыс істеуге арналған робототехникалық жүйелерді жобалауда, соның ішінде модульдік манипуляторларды басқару алгоритмдерін жетілдіруде, сондай-ақ өнеркәсіптік роботтарды бейімдеуде қолданылуы мүмкін.

Зерттеу шектеулері – зерттеу тек кинематикалық және күштік сипаттамалармен шектеліп, толық динамикалық модельдеу және басқару жүйесі симуляциясы қарастырылған жоқ. Сондай-ақ зертханалық немесе орбиталық сынақтар жүргізілмеген.

Болашақ зерттеу бағыттары ретінде келесі мәселелер ұсынылады:

- басқару алгоритмдерін динамикалық модельмен біріктіру және MATLAB/Simulink ортада модельдеу;

- қозғалыс дәлдігін арттыру үшін адаптивті басқару әдістерін енгізу;

- манипулятордың нақты ғарыштық ортада жұмыс істеуін сынақтан өткізуге арналған прототип жасау.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор(лар) мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржылық қолдауымен дайындалды. (AP23489937 «Әскери көлік техникасының механикалық өзін-өзі реттейтін беріліс қорабын әзірлеу» гранты).

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Alipbayev, K., Ivanov, K., Sultan, A., & Komekbayev, A. (2024). Research and design of an efficient adaptive drive with balancing friction coupling. *Istrazivanja i Projektovanja Za Privredu*, 22(2), 81–88. <https://doi.org/10.5937/jaes0-44991>
- Ivanov, K. (2019). Prospects of creation of mechanisms with two degree of freedom. In *Mechanisms and Machine Science: Advances in Mechanism and Machine Science* (pp. 937–946). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_93
- Ivanov, K. S., Ceccarelli, M., Yestemessova, G., Nurgizat, Y., & Balbayev, G. (2019). Design and characterization of a gearbox joint for manipulators. In *Mechanisms and Machine Science: Advances in Mechanism and Machine Science* (pp. 2261–2268). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_223
- Ivanov, K. S., Tulekenova, D. T., & Ceccarelli, M. (2021). An adaptive drive of spacecraft docking mechanism. In *Mechanisms and Machine Science: Mechanism Design for Robotics* (pp. 168–178). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75271-2_18
- Иванов, К. С., & Тулекенова, Д. Т. (2021). Адаптивный привод стыковочного механизма космического аппарата с фрикционной муфтой. *Вестник Алматинского Университета Энергетики и Связи*, (3), 48–55. https://doi.org/10.51775/1999-9801_2021_54_3_48 // Ivanov, K. S., & Tulekenova, D. T. (2021). *Adaptivnyi privod*



- stykovochnogo mekhanizma kosmicheskogo apparata s friktsionnoi muftoi [Adaptive drive of the spacecraft docking mechanism with a friction clutch]. Vestnik Almatinskogo Universiteta Energetiki i Svyazi, (3), 48–55. https://doi.org/10.51775/1999-9801_2021_54_3_48 (In Russ.).
- Swanke, J., & Jahns, T. M. (2021). Reliability analysis of a fault-tolerant integrated modular motor drive (IMMD) for an urban air mobility (UAM) aircraft using Markov chains. 2021 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). <https://doi.org/10.23919/EATS52162.2021.9704851>
- Kim, D.-H., Kim, J.-W., & Choi, S. B. (2020). Design and modeling of energy efficient dual clutch transmission with ball-ramp self-energizing mechanism. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69(3), 2525–2536. <https://doi.org/10.1109/tvt.2019.2963332>
- Kopecki, G. H. (2021). Aircraft control with the use of model reference adaptive control. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 93(9), 1395–1400. <https://doi.org/10.1108/AEAT-11-2020-0248>
- Lin, X., Feng, Q., Mo, L., & Li, H. (2019). Optimal adaptation equivalent factor of energy management strategy for plug-in CVT HEV. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 233(4), 877–889. <https://doi.org/10.1177/0954407018755612>
- Louback, E., Machado, F., Bruck, L., Kollmeyer, P. J., & Emadi, A. (2022, June 15). Real-time performance and driveability analysis of a clutchless multi-speed gearbox for battery electric vehicle applications. 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). <https://doi.org/10.1109/itec53557.2022.9814032>
- Machado, F., Kollmeyer, P., Barroso, D., & Emadi, A. (2021). Multi-speed gearboxes for battery electric vehicles: Current status and future trends. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2, 419–435. <https://doi.org/10.1109/ojvt.2021.3124411>
- Mantriota, G., & Reina, G. (2021). Dual-motor planetary transmission to improve efficiency in electric vehicles. Machines, 9(3), 58. <https://doi.org/10.3390/machines9030058>
- Trubachev, E. S. (2024). Software system SPDIAL. Bulletin of Kalashnikov ISTU, 27(2), 37–48. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2024-2-37-48>
- Иванов, К. С. (2019). Саморегулирующиеся механизмы. Монография. Алматы: Типография «ЦЭС». ISBN 978-601-7889-88-3. 28 с. // Ivanov, K. S. (2019). Samoreguliruyushchiesya mekhanizmy [Self-regulating mechanisms]. Almaty: Printing house “TsES”. ISBN 978-601-7889-88-3. 28 p. (In Russ.).

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Ораз Фариза Байдосқызы – Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті докторанты, кіші ғылыми қызметкер, Алматы, Қазақстан

Ораз Фариза Байдосқызы – докторант НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», младший научный сотрудник, Алматы, Казахстан

Oraz Fariza Baidoskyzy – Doctoral student of the Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, junior researcher, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: f.oraz@aes.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2483-1234>,



Оразалиева Арай Назарбайқызы – Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті докторанты, кіші ғылыми қызметкер, Алматы қ., Қазақстан

Оразалиева Арай Назарбайқызы – докторант НАО

«Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», младший научный сотрудник, г. Алматы, Казахстан,

Orazaliyeva Arai Nazarbaikyzy – Doctoral student of the Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, junior researcher, Almaty, Kazakhstan

e-mail: orazaliyevaaray@gmail.com,,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5480-4835>



Иванов Константин Самсонович – Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті профессоры, Алматы қ., Қазақстан

Иванов Константин Самсонович – профессор, НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан

Ivanov Konstantin Samsonovich – Professor of the Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan

e-mail: k.ivanov@aes.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3750-8081>



Алипбаев Куаныш Арингожаевич – Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті ғылым жөніндегі проректоры, Алматы қ., Қазақстан

Алипбаев Куаныш Арингожаевич – проректор по науке НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», PhD, г. Алматы, Казахстан

Alipbayev Kuanysh Aringozhaevich – vice-rector for science, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan

e-mail: k.alipbayev@aes.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1652-9470>