

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ә. Бүркітбаев атындағы Өндірістік инженерия институты

ӘОЖ: 621.867.7

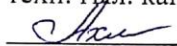
Қолжазба құқығында

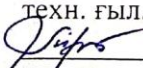
Әбілда Дәурен Қайратұлы

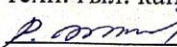
Магистр академиялық дәрежесін алу үшін дайындалған

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Жоба атауы	Гидроманипулятор құрылысына инновация жасау және негізгі параметрлерін дәлелдеу
Дайындау бағыты	6M071300 - «Көлік, көлік техникасы және технологиялары»

Ғылыми жетекші,
техн. ғыл. кандидаты
 Ш.Д.Ахметова
«__» _____ 2019 ж.

Рецензент
техн. ғыл. докторы, профессор
 М.С.Кульгильдинов
«__» _____ 2019 ж.

Норма бақылаушы,
техн. ғыл. кандидаты, доцент
 Р.А. Козбагаров
«24» 05 2019 ж.

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
Көлік техникасы кафедрасының
меңгерушісі
техн. ғыл. докторы
 С.А. Машеков
«03» 06 2019 ж.

Алматы 2019

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ә. Бүркітбаев атындағы Өндірістік инженерия институты

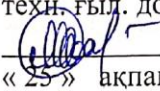
«Көлік техникасы» кафедрасы

6M071300 - «Көлік, көлік техникасы және технологиялары»

БЕКІТЕМІН

Көлік техникасы кафедрасының
меңгерушісі

техн. ғыл. докторы

 С.А. Машеков
« 25 » ақпан 2019 ж.

**Магистрлік диссертацияны орындауға
ТАПСЫРМА**

Магистрант *Әбілда Дәурен Қайратұлы*

Тақырыбы: *Гидроманипулятор құрылысына инновация жасау және
негізгі параметрлерін дәлелдеу*

Университет ректорының 2019 жылғы «25» 02 №1767-м бұйрығымен бекітілген

Аяқталған диссертацияны тапсыру мерзімі: 2019 жылғы «__» мамыр

Магистрлік диссертацияның бастапқы берілістері: *Гидравликалық
манипулятор туралы мәліметтер, техникалық оқулықтар*

Магистрлік диссертацияда қарастырылған мәселелер тізімі:

- а) *Қазіргі таңдағы гидравликалық кран-манипуляторлардың динамикалық-
беріктілігін талдау мәселелері*
- б) *Кран-манипулятордың металл құрылымының динамикалық жүктемесі
мен беріктігін бағалаудың математикалық модельдері мен әдістері*
- в) *Мобильді тасымалдау-технологиялық машиналардың гидравликалық
кран-манипулятор қондырғытарын динамикалық және беріктікке
талдауын жүргізуге арналған бағдарламалық кешен*
- г) *Мобильді тасымалдау-технологиялық машинадардың кран-манипулятор
жасабығының метал құрылымын динамикалық және беріктік талдау*

Сызба материалдарының тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс):

- а) *Жұмыс бойынша 15 бет презентациялық материал келтірілген*

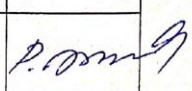
Ұсынылатын негізгі әдебиет: 31 атаумен көрсетілген

- 1 Абрамович, И.И. Грузоподъемные краны промышленных предприятий: справочник / И.И. Абрамович, В.Н. Березин, А.Г. Яуре. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.
- 2 Александров, А.В. Сопротивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин. – 3-е изд. испр. – М.: Высш. шк., 2003. – 560 с.
- 3 Александров, М.П. Грузоподъемные машины / М.П. Александров [и др.] – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.
- 4 Александров, М.П. Грузоподъемные машины / М.П. Александров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 552 с.
- 5 Александров, М.П. Подъемно-транспортные машины / М.П. Александров. – 6-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1985. – 520 с.
- 6 Андриенко, Н.Н. Стреловые самоходные краны: в 2 кн. / Н.Н. Андриенко. – О.: Астропринт, 2001. – 2 кн.
- 7 АО «Златмаш» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.zlatmash.ru.
- 8 Астахов, А.И. Автомобильные краны / А.И. Астахов. – М.: Высш. школа, 1969. – 320 с.
- 9 Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон; пер. с англ. А.С. Алексеева [и др.]; под ред. А.Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
- 10 Беликов, Г.В. Основы расчетов прочностной надежности специальных элементов конструкций автомобилей и тракторов / Г.В. Беликов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 98 с.

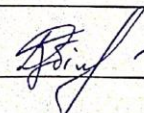
Магистрлік диссертация дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
1-тарау. Қазіргі таңдағы гидравликалық кран-манипуляторлардың динамикалық-беріктілік талдау мәселелері	11.03.2019 ж.	
2-тарау. Кран-манипулятордың металл құрылымының динамикалық жүктемесі мен беріктігін бағалаудың математикалық модельдері мен әдістері	19.04.2019 ж.	
3-тарау. Мобилді тасымалдау-технологиялық машиналардың гидравликалық кран-манипулятор қондырғытарын динамикалық және беріктікке талдауын жүргізуге арналған бағдарламалық кешен	22.04.2019 ж.	
4-тарау. Мобилді тасымалдау-технологиялық машиналардың кран-манипулятор жабдығының метал құрылымын динамикалық және беріктік талдау	29.04.2019 ж.	

Аяқталған магистрлік диссертация бөлімдеріне кеңесшілермен норма бақылаушының қойған **қолтаңбалары**

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер аты, әкесінің аты, тегі (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Норма Бақылаушы	Р.А. Козбагаров тех. ғыл. канд., доцент	24.05.19ж	

Ғылыми жетекші  Ш.Д.Ахметова

Тапсырманы орындауға алған білім алушы  Д.К. Әбілда

Күні 25.02.2019 ж.

АҢДАТПА

Гидравликалық манипулятор қондырғылары олардың әмбебаптығына байланысты кеңінен қолданылады. Гидравликалық манипуляторларды әзірлеу, жетілдіру және жөндеу кезінде қолданылатын негізгі құралдардың бірі металқұрылымның динамикалық беріктігін талдау болып табылады.

Динамикалық үлгі, ықшамдатылған беріктік үлгісі (жұқа қабырғалы өзектер теориясының ережелеріне негізделген), нақтыланған беріктік үлгісі (МШЭ негізделген), сонымен қатар жүзеге асырылатын қозғалыс сипатына жұмысшы сұйықтықты беру көрсеткіштері мен үйкеліс күштерінің әсерін ескеретін, гидроқозғалтқыштың математикалық үлгісінен тұратын кескіндемесі ерікті гидравликалық КМҚ кешенді математикалық үлгісі қалыптастырылды. Ұсынылған математикалық үлгі негізінде жылжымалы негіздемеде жұмыс жасайтын КМҚ мен қосылыста люфт болатын КМҚ үшін оның түрлері қалыптастырылды. Ұсынылған математикалық үлгілерді пайдалану арқылы жылжымайтын негіздегі КМҚ; жебенің топсалы қосылысындағы люфтісі бар КМҚ; қалқымалы құралда жұмыс жасайтын КМҚ, гидроцилиндрде үйкелісті ескере отырып қондырғы жұмысы қалыптастырылды. КМҚ мәліметтері үшін динамикалық-беріктік талдау жүзеге асырылды және метал құрылымының негізгі элементтерінің беріктігі туралы қорытынды жасалды.

АННОТАЦИЯ

Гидравлические крано-манипуляторные установки (КМУ) получили широкое распространение благодаря своей универсальности. Одним из основных инструментов, используемых при разработке, модернизации и ремонте кранов-манипуляторов, является динамико-прочностной анализ металлоконструкции.

Разработана комплексная математическая модель гидравлической КМУ произвольной конфигурации, включающая в себя динамическую модель, упрощенную прочностную модель (основанную на положениях теории тонко-стенных стержней), уточненную прочностную модель (основанную на МКЭ), а также математическую модель гидродвигателя, учитывающую влияние сил трения и параметров подачи рабочей жидкости на характер совершаемого движения. На основе предложенной математической модели разработаны ее модификации для КМУ, имеющей люфт в сочленении, и КМУ, работающей на подвижном основании. С использованием предложенных математических моделей смоделирована работа КМУ на неподвижном основании; КМУ с люфтом в шарнирном сочленении стрелы; КМУ, работающей на плавучем средстве; КМУ, с учетом трения в гидроцилиндре. Для данных КМУ выполнен динамико-прочностной анализ и сделаны выводы о прочности несущих элементов металлоконструкции.

ANNOTATION

Hydraulic crane-manipulator units (CMU) are widely used due to their versatility. One of the main tools used in the development, modernization and repair of cranes is dynamic strength analysis of metal structures.

A complex mathematical model of hydraulic CMU of any configuration, including a dynamic model, a simplified strength model (based on the theory of thin - wall rods), a refined strength model (based on FEM), as well as a mathematical model of the hydraulic motor, taking into account the influence of friction forces and parameters of the working fluid supply on the nature of the movement. Based on the proposed mathematical model developed modifications to the CMU, with the backlash in joints, and CMU operating on a movable base. Using the proposed mathematical models, the work of the CMU on a fixed base; CMU with a backlash in the hinge joint of the boom; CMU working on a floating vehicle; CMU, taking into account friction in the hydraulic cylinder is simulated. Dynamic - strength analysis was performed for the CMU data and conclusions were made about the strength of the bearing elements of the metal structure.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	9
1 Қазіргі таңдағы гидравликалық кран-манипуляторлардың динамикалық-беріктілік талдау мәселелері	11
1.1 Гидравликалық кран-манипуляторлар динамикасының және беріктігінің мәселелерін шешуде пайдаланылатын алгоритмдер	16
1.2 Есептеуіш бағдарламалар мен кешендерді пайдаланып, динамикалық және беріктік талдау	21
2 Кран-манипулятордың металл құрылымының динамикалық жүктемесі мен беріктігін бағалаудың математикалық модельдері мен әдістері	24
2.1 Есептеу барысында пайдаланылатын негізгі алгоритмдерді және жорамалдарды тандауды негіздеу	24
2.2 Мобильді машинаның кран-манипуляторлық қондырғысының математикалық моделі	27
2.3. Мобильді машинаның кран-манипулятор қондырғысының металл құрылымының динамикалық жүктемесін бағалау әдістемесі	36
2.4 Гидравликалық кран-манипулятор жабдығы буынларының кернеулі-бұзылған жағдайы мен ішкі күшті факторларды анықтау әдістемесі	50
3 Мобилді тасымалдау-технологиялық машиналардың гидравликалық кран-манипулятор қондырғытарын динамикалық және беріктікке талдауын жүргізуге арналған бағдарламалық кешен	65
3.1. Бағдарламалық кешеннің құрылымы мен жүзеге асыру ерекшеліктері	65
3.2. Пайдаланушының графикалық интерфейсте жұмысы	66
4 Мобилді тасымалдау-технологиялық машиналардың кран-манипулятор жабдығының метал құрылымын динамикалық және беріктік талдау	75
4.1. Екіжақты әрекет ететін бірштокты гидроцилиндрдің фрикциялы көрсеткіштерін тәжірибе арқылы анықтау	75
4.2 Жүкті көтеру кезінде кран-манипулятор жебесінің жүктеліміне гидроцилиндрдегі үйкеліс әсерін бағалау	77
4.3 АСТ-4-А машинасының кран-манипулятор жабдығының динамикалық және беріктік талдауы	79
Қорытынды	82
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	83

КІРІСПЕ

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Гидравликалық манипуляторлар қондырғылары олардың әмбебаптығына байланысты кеңінен қолданылады. Олар әртүрлі аспалы жабдықтармен пайдаланылады: ілгектер, қысқыштар, электр магниттері, құбырларға арналған сабы, бөшкелер, ағаштар, адамдарды көтеру үшін блоктар және басқалар; жүк тракторларына, борттық автокөліктерге, жартылай тіркемелерге, теміржол қондырғыларына және жүзгіш жабдығына орнатылады. Кран-манипуляторлар көмегімен құрылыс алаңдарына материалдар жеткізеді, тиеу-түсіру, тасымалдау және қоймалауды механизациялау, құбырларды, жолдарды, ғимараттар мен құрылыстарды салуды жүзеге асырылады; олар шикізат пен минералды өндіруде, сондай-ақ төтенше жағдайлардың салдарын жою үшін қолданылады.

Гидравликалық манипуляторларды әзірлеу, жетілдіру және жөндеу кезінде қолданылатын негізгі құралдардың бірі металқұрылымның динамикалық беріктігін талдау болып табылады. Бұл кран-манипулятордың әртүрлі компоненттерінің жүктелуі туралы ақпаратты алуға және оның негізінде құрылымды оңтайландыруға: көтерілген жүктің максималды салмағын жоғарылату, операциялардың дәлдігі мен жылдамдығын жоғарылату, КМҚ-ның сенімділігін, қауіпсіздігін және қызмет ету мерзімін жоғарылату, сондай-ақ оны өндіру мен техникалық қызмет көрсетудің бағасын төмендетуге мүмкіндік береді.

Әдетте, КМҚ жобалау сатысында бірнеше ұсынылған құрылымдық шешімдер зерттеледі және олардың әрқайсысында динамикалық-беріктік талдау жеке орындалады. Дегенмен, ол кран-манипулятордың әртүрлі пайдалану жағдайларында орындалған динамикалық беріктік есептеулер сериясын жиі қамтиды. Мысалы:

- көтерілген жүктің әр түрлі салмақ және әртүрлі кран жебесінің шығуы кезіндегі жұмыстары;
- жебені көтеру, түсіру, айналдыру операцияларын орындау;
- әртүрлі аспалы жабдықтармен жұмыс жасау;
- жылжымайтын және жылжымалы негізде жұмыс істеу;
- көлбеу тіректердің бетінде жұмыс жасау;
- металқұрылымның тірек элементтерінің ақауларын есепке ала отырып: топсалардағы ойнау, КМҚ жебелерінің коррозияны және механикалық зақымдануы және т.б.

Осылайша, жобалау сатысында динамикалық беріктік есептері бірнеше рет орындалады. Нәтижесінде, есептеудің жылдамдығы, сондай-ақ алғашқы деректерді дайындау және нәтижелерді талдау рәсімдерінің ұзақтығы маңызды рөл атқарады.

Практикада КМҚ-ны беріктікке есептеу үшін аналитикалық және сандық әдістер қолданылады. Аналитикалық есептеу, әдетте, статикалық параметрде орындалады. Бұл жағдайда динамикалық жүктемелер динамикалық

коэффициентті ескере отырып шамамен есептеледі. Сандық есептеу әдістері динамикалық жүктемелерді сенімдірек етіп, дәлірек нәтижелерге қол жетек.

Жұмыстың мақсаты – динамикалық жүктемелердің әсерін ескере отырып, дәлдікті арттыру және бастапқы деректерді дайындау және есептеу рәсімдерін орындау үшін талап етілетін уақытты қысқарту есебінен компьютерлік ортада гидравликалық КМҚ беріктігін есептеудің тиімділігін арттыру.

Мақсатқа жету үшін бірқатар өзара байланысты міндеттерді шешу қажет:

1 Математикалық модельдер мен әдістемелерді әзірлеу үшін:

- еркін конфигурациялы гидравликалық КМҚ динамикасын зерттеу (жұқа қабырғалы өзектер теориясының негізінде);

- КМҚ металл құрылымдары элементтерінің жүктелуінің оңайлатылған және нақтыланған талдауын зерттеу (соңғы элементтер әдісі негізінде);

- жұмыс сұйықтығын беру параметрлерімен байланысты шток қозғалысының жылдамдығын шектеуді және фрикциялық сипаттамаларын ескере отырып, гидроцилиндр дамытатын жүктемелерді бағалау.

2 Гидравликалық кран-манипуляторлардың кинематикалық схемаларын жасау процесін автоматтандыруға, динамика мен беріктілік міндеттерін шешуге мүмкіндік беретін ЭЕМ үшін мамандандырылған бағдарлама әзірлеу, алынған нәтижелерді талдау.

3 Гидравликалық КМҚ талдау үшін әзірленген бағдарламаны қолдану, олардың динамикалық жүктелуін келесі үдерістер мысалында зерттеу:

- әртүрлі бастапқы қалыптан жүкпен КМҚ жебесін көтеру;

- осы гидроцилиндрдің фрикциялық сипаттамаларын алдын ала эксперименталды бағалай отырып, онда үйкелуді есепке алып және есепке алмай, гидроцилиндр жүгі бар жебені көтеру;

- тозу процестерімен туындаған айналмалы бөлшектеуде жоғары люфты бар КМҚ жебесінің бұрылуы;

- жүкпен жұмыс істейтін, онда орнатылған КМҚ бар жүзбелі құралдың толқындарына жаю.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы:

Өздігінен конфигурацияланатын гидравликалық КМУ кешенді математикалық моделі әзірленді:

- математикалық динамикалық модель;

- жұқа қабырғалы өзектер теориясының ережелеріне негізделген қарапайым математикалық берік модель;

- соңғы элементтер әдісіне негізделген нақтыланған математикалық беріктілік моделі;

- гидроцилиндрдің математикалық моделі, оның фрикциялық сипаттамаларын және жұмыс сұйықтығын беру параметрлерімен байланысты жылдамдығын шектеуді ескеретін шток қозғалысы.

Жұмыстың құрылымы мен көлемі. Диссертациялық жұмыс кіріспеден, төрт тараудан, қорытындыдан тұрады. Жұмыс 84 - беттен, 62 – сурет.

1 Қазіргі таңдағы гидравликалық кран-манипуляторлардың динамикалық-беріктілігін талдау мәселелері

Қазіргі уақытта жүк көтергіш машиналар нарығында орындалуы, жүк көтергіш сипаттамалары, аспалы қондырғыштың қолдау түрлері, шасси типі және басқа да параметрлері бойынша ерекшеленетін гидравликалық кран-манипуляторлардың алуан түрлілігі ұсынылған. Металл құрылымның жүктелуін бағалау үшін КМҚ жобалау, жаңғырту, пайдалану және жөндеу кезінде қолданылатын бірқатар әдістер ұсынылды. Бұл әдістердің көпшілігі ЭЕМ үшін есептеуіш бағдарламалық кешендерде орындалады. Осы тараудың 1, 2 және 3-бөлімдерінде гидравликалық крандар-манипуляторлардың құрылымдарына шолу, КМҚ динамика және беріктілік есептерін шешу үшін негізгі алгоритмдерді зерттеу және осы алгоритмдерді іске асыратын бағдарламалық кешендердің функционалдық мүмкіндіктерін талдау орындалған. Тараудың 4 және 5-бөлімдерде баяндалған диссертациялық зерттеудің мақсаты мен міндеттері, қорытындыдан тұрады.

Гидравликалық кран-манипуляторлы қондырғыларда топсалардың екі түрі қолданылады (1.1 сурет):

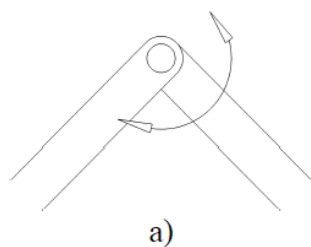
- көрші секциялардың қатысты айналуына жол беретін ілмекті (айналмалы немесе айналуы деп аталады);
- призмалық (сондай-ақ үдемелі немесе жылжымалы деп аталады), олардың бір-біріне қатысты жылжуын қамтамасыз етеді.



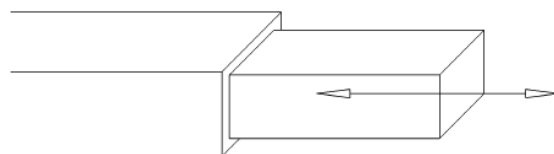
a-Unic UR-V504 ; б-FassiF105A.23

1.1 Сурет – Автомобиль негізіндегі кран-манипуляторлар және олардың кинематикалық сызбалары

Әр түрлі өндірушілердің кранды-манипуляторлы қондырғыларының модельдік қатарын талдай отырып, олардың жебелерінің конфигурациясында ұқсастықты анықтауға болады. Көп жағдайларда кранды-манипуляторлы қондырғы негізі айналмалы, екі немесе үш секциядан тұратын, орнатылған жебе бірізді түйінді топсалармен біріктіріледі.



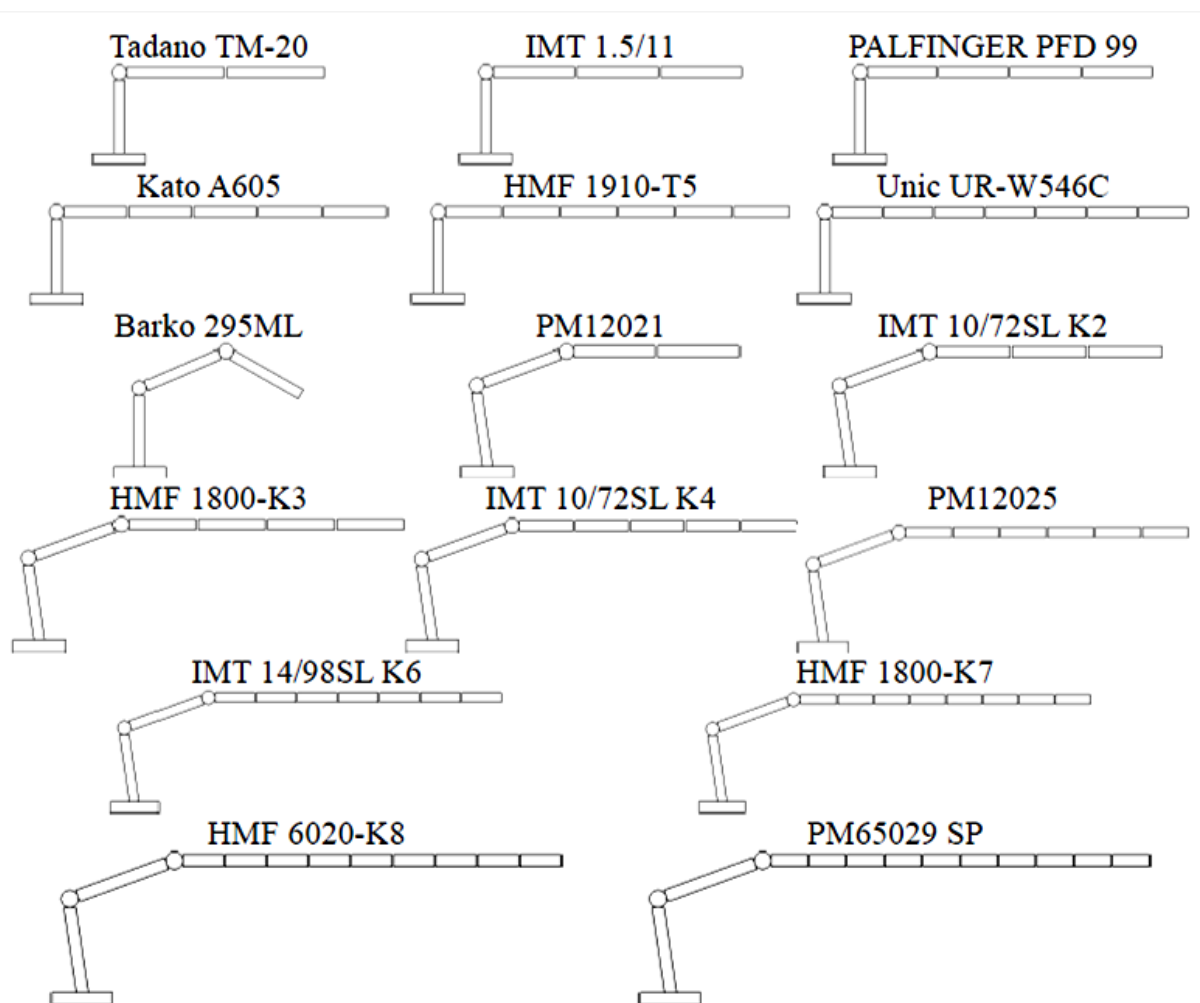
а)



б)

а- түйінді; б-призмалық

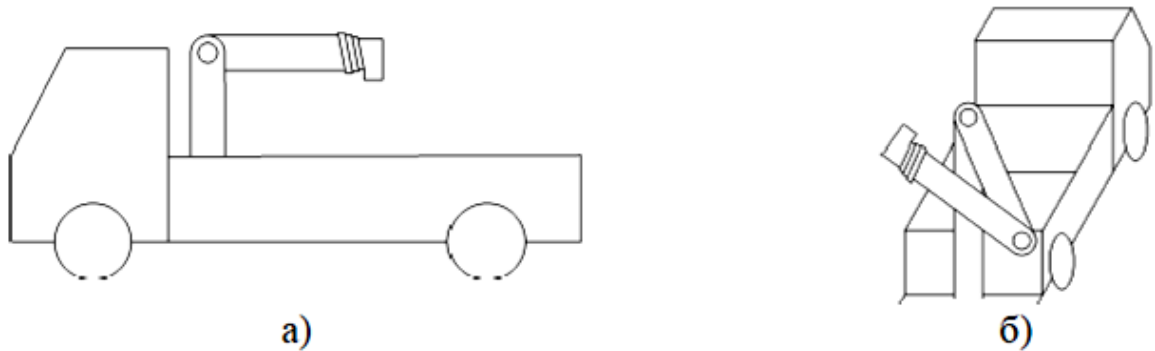
1.2 Сурет – КМҚ жабелердің құрылымларында қолданылатын біріктіру



1.3 Сурет – Кран-манипуляторлық қондырғылардың кең таралған кинематикалық сызбалары бар нұсқасы

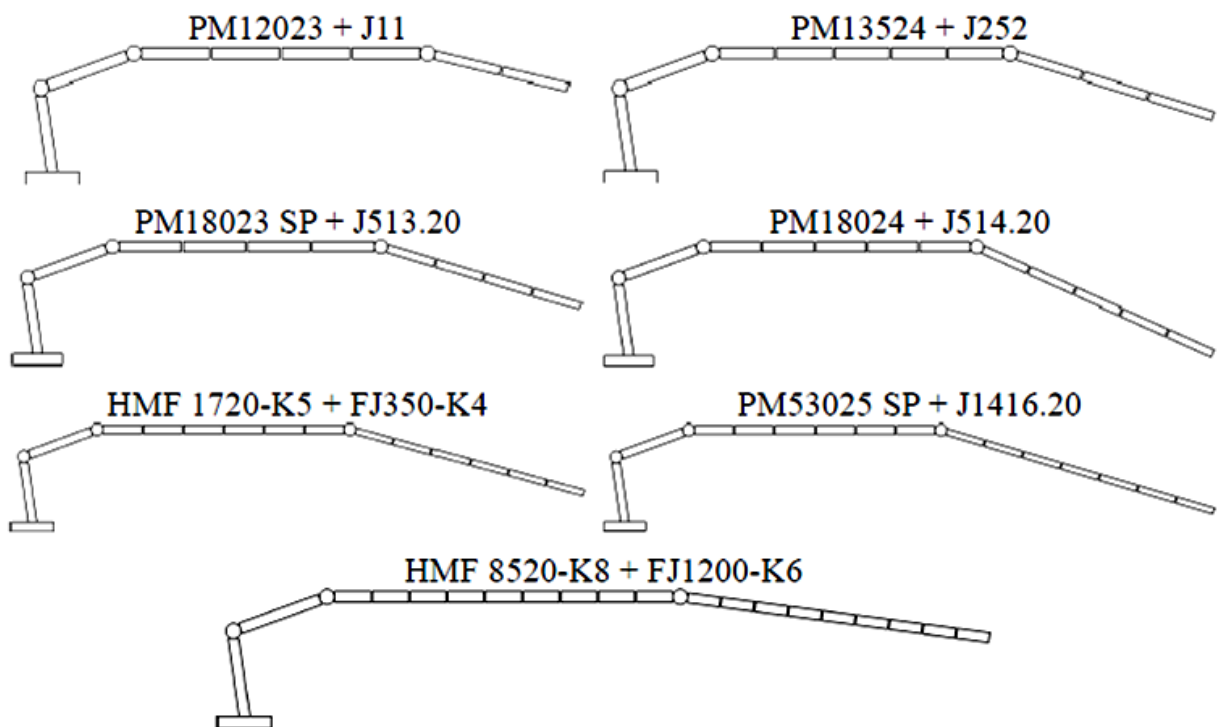
Соңғы секция жиі телескопиялық және бірден тоғыз аралығына дейін жылжымалы элементтен тұрады (сурет 1.3). Мұндай құрылым қысылған жағдайларда жұмыс істеу үшін манипуляторларды тиімді пайдалануға, сондай-ақ жебені жұмыс істемейтін күйде жинақы салуға мүмкіндік береді, бұл әсіресе оны тасымалдау кезінде ыңғайлы. Жебе орналасуының 2 транспорттық айырмашылығы қарастырылады [1]: L-бейнелі және Z-бейнелі (1.4-сурет). Автомобиль шассиіне орнатылған кезде, L-бейнелі жиналатын кран-

манипулятор әдетте, көлік жағдайында, автомобиль рамасында көлденең орналасады, ал Z-тәрізді жиналмалы - рама бойынша көлденең. Манипуляторлардың кейбір модельдеріне қосымша телескопиялық секцияларды басқару мүмкіндігі, оның көтерілу бұрышына байланысты [1] (1.5-сурет).



а-L-бейнелі; б-Z-бейнелі

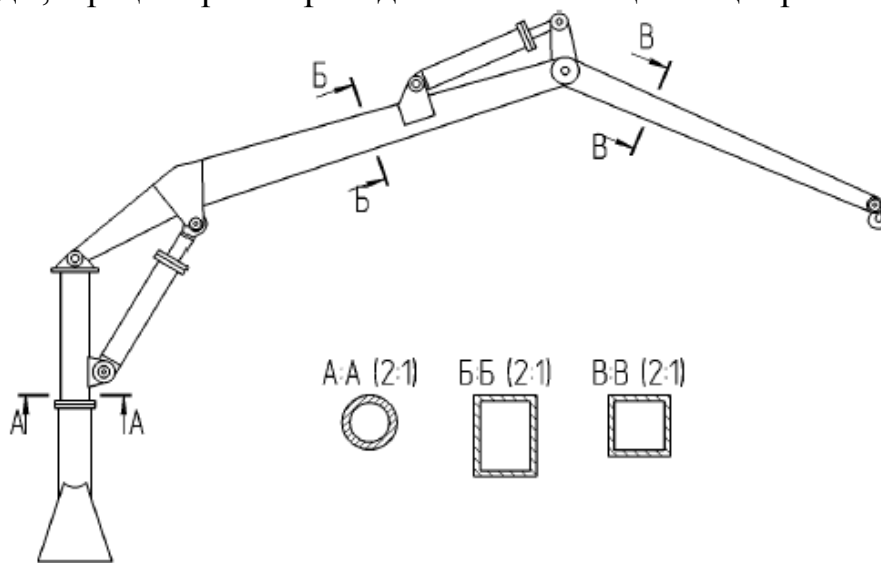
1.4- сурет – Тасымалдау кезінде жебені бүктеу



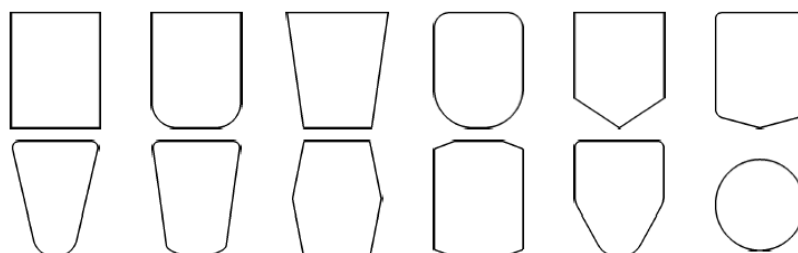
1.5 Сурет – Әр түрлі кинематикалық кран-манипуляторлардың қосымша телескопиялық секциясы орнатылған сызбасы

Кран жебесінің әрбір секциясы манипулятордың металл құрылымындағы алюминий қорытпалы крандарын пайдалану перспективалы болып табылады. Олардың артықшылықтары төмен тығыздықты (болатқа қарағанда үш есе аз), жоғары коррозияға төзімділігін,сынған сыну үрдісі және салыстырмалы

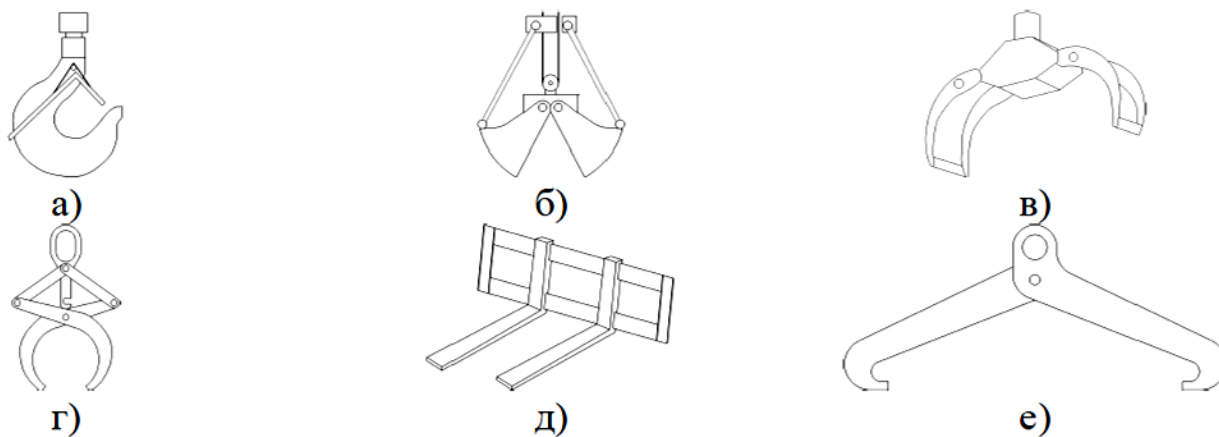
жоғары беріктігі жоқ. Алюминий қорытпаларының кемшіліктері жоғары құны, салыстырмалы түрде төмен серпімді модулі, әлсіз шаршау кедергісі [16]. Қазіргі уақытта алюминий қорытпалары кейбір кран-манипуляторларда қолданылады, бірақ олар әлі күнге дейін болат сияқты кең таралған емес.



1.6 Сурет – Кран-манипуляторлы көліктің дәнекерлеуге арналған көлденең қималары



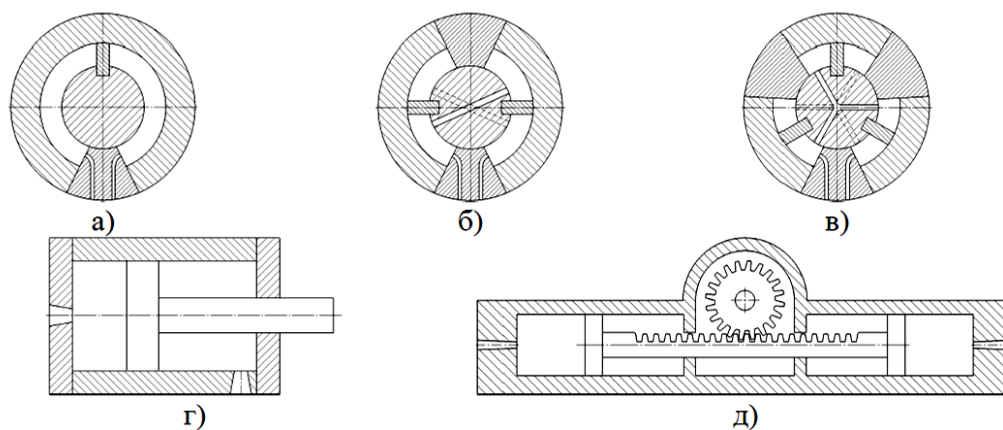
1.7 Сурет – Гидравликалық кран-манипуляторлардың профильдерінде қолданылатын бағандар мен жебелерді бұру үшін пайдаланылатын құрылымдар



а – ілмек; б – грейферлік ілініс; в- бөренелерге арналған қармауыш; г- құбырларға арналған қармауыш; д- шанышқы қармау; е- бөшкелерге арналған қармауыш

1.8-сурет – Манипуляторлардың аспалы жабдықтарының кейбір түрлері

Гидравликалық жетек кран-манипуляторларының құрылысы кезінде төмен салмақ пен өлшемдердің жоғары берілетін қуатпен үйлесуіне байланысты кеңінен қолданылды. Оның артықшылықтары сондай-ақ кең ауқымды шексіз айнымалы жылдамдықты бақылауды, қозғалтқышты және жұмыс органын шамадан жүктеуден, қозғалыстың қарапайым қалпына келтіру мүмкіндігін, біркелкі жеделдету мен тоқтатуды, қарапайымдылығын қамтамасыз етеді [28]. Жұмыс сұйықтығының энергиясын трансляциялық және айналмалы қозғалыс энергиясына айналдыру үшін гидравликалық цилиндрлер мен айналмалы гидравликалық қозғалтқыштар қолданылады (1.9-сурет).

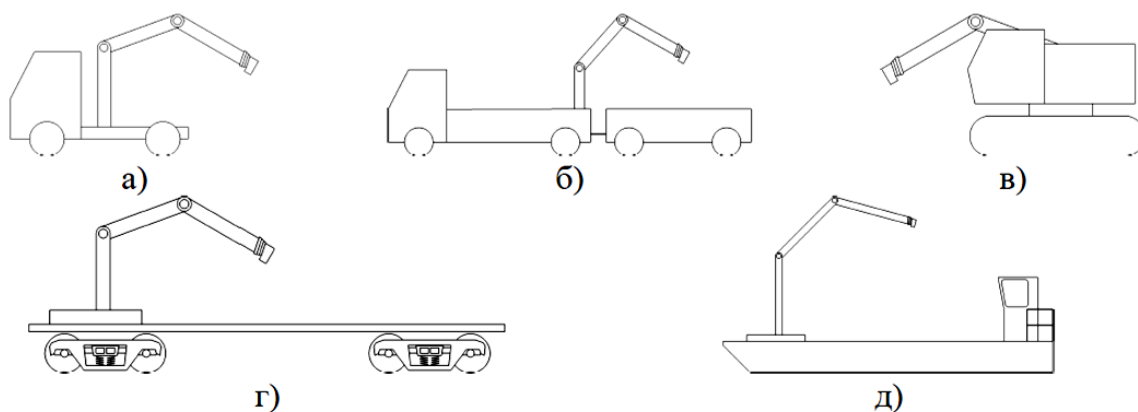


а, б, с - бірөлшемді, екі және үш пластина айналмалы гидравликалық қозғалтқыштар; г - қосарланған гидравликалық цилиндр; д - айналмалы гидравликалық қозғалтқыш

1.9 Сурет – Кран-манипуляторлардың гидравликалық қозғалтқыштары

Олардың ішінде кран-манипулятор құрылысында біртұтас екі жақты гидравликалық цилиндр (сурет 1.9, d) және тірек тісті доңғалақты гидравликалық қозғалтқыш бар (1.9-сурет). Жылжымалы айналмалы гидравликалық қозғалтқыштармен салыстырғанда, олардың негізгі артықшылығы (сурет 1.9, а - б) - айнарудың үлкен бұрышы, ол 360° асып кетуі мүмкін және рельстің ұзындығына және диаметріне байланысты 360 градустан асатын және темір жол ұзындығына және тісті берілу диаметріне байланысты, ең көп бұрылу бұрышы, ал жалғыз пластина, екі пластина және үш пластинадағы гидравликалық қозғалтқыштар үшін айнарудың ең үлкен бұрышы тиісінше 270° , 150° және 70° аралығында шектеледі [26].

Крандар көлік құралына немесе іргетасқа орнатылады [27]. Жылжымалы шассиге орнату артықшылық береді, себебі ол жүктеуші кранды бір нысаннан екіншісіне тез ауыстыруға және жаңа жерге келгенде дереу жұмыс істеуге мүмкіндік береді; сондай-ақ оны құрылыстағы объектілерге материалдарды жеткізу үшін пайдалану. Көлік тракторына кран орнату кезінде, әдетте, жүргізуші кабинасының арт жағына орналастырылады (1.10-сурет, а). Ал борттық машинада орнатылған кезде жүк тіркемесін тиеу және түсіру мүмкіндігін қамтамасыз ету үшін борттық платформаның соңында орналасуға ұмтылады (1.10-сурет, б).



а, б- автокөлік шассиі; в-ішіндегі шасси; г- темір жол жабдығы;
д - өзгермелі қондырғытар

1.10-сурет – Кран манипуляторлардың негіздері

Автокөлік шассиінен басқа, кран-манипуляторлар да іздестірілген автокөліктерге, темір жол көлігіне және жүзбелі кемелерге орнатылады (1.10-сурет, с, д, е).

Конфигурациялардың алуан түрлілігі крандарды жұмыстың кең ауқымын орындауға мүмкіндік береді: материалдарды құрылыс алаңдарына жеткізу, қоймалардағы тиеу-түсіру жұмыстарын механикаландыру, құбырларды салу кезінде, шикізат пен минералды өндіру, жол құрылысы, сондай-ақ апаттық жағдайлардың салдарын жою [26].

1.1 Гидравликалық кран-манипуляторлар динамикасының және беріктігінің мәселелерін шешуде пайдаланылатын алгоритмдер

Гидравликалық крандарды талдау үшін пайдаланылатын көптеген әдістер робототехника саласында пайда болды, өйткені крандардың крандарының құрылымдары робот манипуляторларымен ұқсас. Мұндай алгоритмдердің ең көп шолуы ғылыми басылымдарда ұсынылған [2].

60-70-жылдардағы қатты денелердің динамикасында ерте зерттеулер өткен ғасырда манипулятордың динамикасының мәселелерін шешуге арналған алгоритмдер пайда болды. Олардың көпшілігі Лагранж-Эйлер теңдеуіне негізделген және есептеу қиындықтары $O(n^4)$ болды. Есептік қуаттың болмауы және осы алгоритмдердің төмен жылдамдығы жиі центрифуга мен Кориолис күштерін қосудан бас тартуға мәжбүр болды. Бұл әр есептеу қадамында талап етілетін есептік операциялардың санын едәуір азайтты және нақты уақыт режимінде манипуляторды манипуляциялау үшін осы алгоритмдерді пайдалануға мүмкіндік берді [12].

Рекурсиялық алгоритм құру маңызды жетістік болды.

Динамиканың кері мәселесін шешу үшін сызықтық есептік күрделілігі бар Ньютон-Эйлер (RNEA - рекурсивті Ньютон Эйлер алгоритмі). Бұл әдіс бүгінгі күні өзекті болып қала береді, алайда қазіргі заманғы бағдарламалық

жасақтама жүйелерінде ол қолданылатын түпнұсқалық алгоритм емес, оны жақсартады. Әдістің идеясы ілмектердегі жалпыланған ығысуды, жылдамдықтарды және жеделдетуді білу, сондай-ақ манипулятордың негізін бекітетін болса, өз кезегінде жылдамдық пен оның жылдамдығын есептеуден бастап, базадан қармауышқа дейін есептеу мүмкін болады; содан кейін ілмектердегі сілтемелер мен белгісіз жалпыланған күштерге әрекет ететін инерция күшін анықтау үшін керісінше.

Алгоритм жылдамдығы RNEA ұлғайтылды есебінен көшу есебінен жаһандық координаттар жүйесінде координаттар жүйесімен байланысты, манипулятор байланысты, бірқатаринерция тензорлары және сілтемелердің ауырлық орталықтарының позициялары, ілмектердің байланыстыру нүктелерінің координаттары және т.б.

$O(n)$ есептеу операциялары үшін кері динамикасын шешу үшін альтернативті рекурсивті алгоритм ұсынылды және Лагранж теңдеуіне негізделген, бірақ есептеу нүктесінен RNEA алгоритміне қарағанда тиімді болмады.

Зерттеуде динамиканың тура есебін шешудің төрт әдісі әзірленді. Бірінші үшеуінде белгісіз жалпылама үдемелерге қатысты сызықтық теңдеулер жүйесін шешу ұсынылды, ол үшін манипулятордың инерция матрицасының элементтерін және күш факторларын ескеретін вектордың компоненттерін анықтау алдын ала талап етілді. Барлық үш алгоритмде күш факторларын ескеретін вектор Ньютон-Эйлер әдісі арқылы анықталды. Инерция матрицасының бағандары бірінші әдіс келесі бастапқы шарттар үшін RNEA көмегімен динамиканың кері есебінің шешімі арқылы анықталды: барлық жалпыланған жылдамдық нөлге тең; барлық жалпыланған үдеулер бір бірліктен басқа нөлге тең. Екінші әдіс көп жағдайда біріншісін қайталайды, алайда массалардың матрицасын есептеу кезінде оның симметрия қасиеті ескерілді, бұл аз есептеулерді орындауға мүмкіндік берді. Үшінші әдіс инерция матрицасының әр бағанын анықтау кезінде RNEA алгоритмі үшін бастапқы жағдай манипулятордың бір бөлігі жанады. Ал бір бөлігі біртұтас қатты дене ретінде қозғалады. Массалардың матрицасын есептеу алгоритмі кейінірек қатты дененің құрамдық алгоритмінің (CRBA - Composite Rigid Body Algorithm) атауын алды. Теңдеулер жүйесін шешу қажеттілігі $O(n^3)$ алғашқы үш әдісін-күрделі етеді. Төртінші әдіс итерациялық және $O(n^2)$ есептеу күрделілігіне ие, алайда аз еркіндік дәрежесі бар манипулятор үшін, мысалы $n=6$, үшінші әдістен екі есе баяу болады.

Зерттеулерде тензорлық Алгебра аппаратын пайдалану RNEA және CRBA алгоритмдеріндегі есептеу операцияларының санын қысқартуға мүмкіндік берді.

Динамиканың тура есебін шешу үшін жұмыста $Q(n)$ - топсалы біріктірілген дененің күрделі алгоритмі (ABA - Articulated Body Algorithm) ұсынылды, сондай-ақ Фезерстоун алгоритмі ретінде белгілі. Алгоритмнің негізінде топсалы-топтастырылған дененің инерциясы туралы түсінік жатыр: i -м топсалы топтастырылған денемен манипулятордың кинематикалық тармағы

деп аталады, манипулятордың і-ші буынында бастау алады және құрылымның қалған бөлігінен бөлек қарастырылады. Оның инерциясы манипулятордың і-ші буынына қоса берілген жүктеме мен осы буынды жеделдету арасындағы байланысты сипаттайды, ол барлық манипулятордың бөлігі ретінде емес, тек і-ші топсалы-біріктірілген дененің бөлігі ретінде қарастырылады. АВА алгоритмінің бірінші нұсқасы тек бір еркіндік дәрежесі бар топсалармен жұмыс істей алады. Бұл шектеуді еңсеру және алгоритмнің жұмыс жылдамдығын арттыру алгоритмнің келесі модификацияларында сәтті болды.

Зерттеу негізгі назар топсалы-біріктірілген тел. инерциялық сипаттамаларын есептеу процедурасын жеңілдетуге аударылды. [24] жұмыста $Q(N)$ процессорларда орындалатын есептеу операцияларының Q үшін манипулятор динамикасының тура есебін шешетін параллельді есептеулер үшін АВА нұсқасы сипатталған. Манипуляторлардың кинематикасы мен динамикасының математикалық өрнектерін жазудың арнайы түрі кең таралған - spatial vector algebra. Онда жылдамдықтар, жылдамдықтар, күштер мен сәттерді сипаттау үшін алты симметриялы векторлар қолданылады. Сондай-ақ, манипулятордың буындарының инерциялық сипаттамаларын, координаттар жүйелері арасындағы ауысуларды сипаттау үшін 6×6 өлшемдік матрицалар зерттеулерде берілген математикалық аппарат алгоритмдерді жазуды қалай жеңілдететінін, математикалық модельдерді оның физикалық көрінісімен байланыстыруға, бірдей есептерді шешетін әртүрлі Алгоритмдер арасындағы өзара байланысты орнатуға және оларды салыстыру үшін құрал болуға мүмкіндік бергенін сипаттау келтіріледі.

Жұмыс барысында манипулятордың Инерция матрицасының қалыптасуының төрт жаңа әдісі ұсынылды, оның кинематикалық сұлбасы spatial vector algebra көмегімен тармақталмаған. Алғашқы үш әдіс қосымша шығынсыз Якоби матрицасын есептеуге мүмкіндік береді, бұл манипулятордың жұмыс кеңістігінде Инерция матрицасын жасауға мүмкіндік береді. Төртінші әдіс Якоби матрицасын есептемейді, бірақ алты еркіндік дәрежесі бар манипулятор үшін ұсынылған ең тиімді болып табылады және CRBA қарағанда 23% аз есептеу операцияларын талап етеді. Бұл әдіс Spatial Composite Rigid Body Method атауын алды, өйткені көптеген CRBA алгоритмін қайталайды, ал негізгі айырмашылықтары spatial vector algebra аппаратын пайдалану және ауырлық орталығына қатысты емес, координаттардың жергілікті жүйесін есептеудің басталуына қатысты құрамдас қатты дененің инерция тензорын есептеу болып табылады. Зерттеу барысында бұл алгоритм манипулятордың Инерция матрицасын есептеу үшін өзгертілген.

RNEA, CRBA және АВА алгоритмдері манипулятор динамикасының мәселелерін шешу үшін маңызды. АВА және CRBA динамикасының тікелей проблемасын шешу үшін қолданылғандықтан, олар әртүрлі 9 зерттеулермен салыстырылады.

CRBA әдісі жалпыланған координаттар кеңістігінде манипулятордың инерция матрицасын қалыптастырады. Оның есептеу қиындықтары $O(n)$ тармағының тереңдігі бір кинематикалық ағаш үшін, $O(n^2)$ -ге дейін

филиалдарсыз кинематикалық тізбегі үшін өзгереді. Инерция матрицасын қалыптастырудан басқа, динамиканың тікелей проблемасын шешу үшін, сонымен қатар, $O(n^3)$ дейін есептеулердің жалпы санын арттыратын сызықты теңдеулер жүйесін шешу қажет.

АВА алгоритмінің сызықтық есептеу қиындыққа ие болғанына қарамастан, манипуляторлар үшін аздаған еркіндік дәрежелері бар CRBA негізіндегі шешім жылдамдығын жоғалтады.

АВА алгоритмінің сызықтық есептеу қиындыққа ие болғанына қарамастан, манипуляторлар үшін аздаған еркіндік дәрежелері бар CRBA негізіндегі шешім жылдамдығын жоғалтады. АВА әдісінің бірінші рет қолданылуы NTI12 үшін CRBA негізіндегі шешімге қарағанда тиімді болды [140]. Алгоритмдердің жақсартылған нұсқалары жарияланды, бұл көрсеткіш бірнеше рет өзгерді: $n \geq 10$, $n > 8$.

Бірқатар ғылыми жұмыстар АВА және CRBA алгоритмдерінің дәлдігін зерттеуге арналған. CRBA негізіндегі шешім АВА негізіндегі дәлме-дәлден айтарлықтай төмен болуы мүмкін. Бұл композитті қатты күйдегі алгоритм жағдайында желілік теңдеулер жүйесін шешу қателіктің едәуір артуына әкелуі мүмкін, егер манипулятордың инерция матрицасы әлсіз шарты бар болса. Бұл құбылыс ұзақ уақыт бойы байқалмады, өйткені зерттеуге алынған қолданыстағы өндіріс манипуляторларының инерция матрицасы нашар емес.

АВА алгоритміндегі қателіктердің көбеюі орындардағы кейбір операцияларды қайта ұйымдастыру кезінде және жергілікті сілтеме жүйелерінің «сәтсіз» орналасуын таңдау кезінде де көрсетілді. Эксперименттік көзқарас манипулятордың инерция матрицасының шартты жағдайын зерттеу үшін қолданылған. N сілтемелерінің санының көбеюімен массалық матрицаның шарттығы $O(N)$ -дан $O(N^4)$ дейін артады және жазық манипулятордың құрылымсында қырық сілтеме болған кезде қазірдің өзінде 32-биттік құбылмалы нүкте есептеулеріне сыни болуы мүмкін екендігі көрсетілген. Сондай-ақ, бұл құбылыс манипулятордың физикалық қасиеттерін көрсетеді және тіпті массалық матрицаны пайдаланбайтын және желілік теңдеулер жүйесін нақты анықтамайтын алгоритмдерде де көрінетін болады.

1 RNEA және CRBA алгоритмдері манипулятордың негізі бекітілген дегенді білдіреді. Егер осы шектеулерді айналып өту қажет болса, манипулятордың негізі мен негізі арасында алты градус бостандықтары бар топсаның қосымша орнатылуы, Мұндай топсаны үш ілмекті ілмектер немесе бір сфералық үш призмалық ілмектердің комбинациясы ретінде ұсынуға болады. Сфералық ілгекпен жүзеге асады, себебі ол топсалы құлыптың (гимбальды құлыптың) пайда болуына жатпайды. RNEA, CRBA және АВА әдісі филинсіз немесе кинематикалық ағашсыз кинематикалық тізбектегі манипулятор үшін динамикалық мәселені шешуге мүмкіндік береді және жабық ілмектерді қолдамайды. Көп жағдайда гидротехникалық кран-манипуляторлардың динамикасын зерттеу үшін жеткілікті: белгілі бір деңгейде олардың кинематикалық сызбалары кинематикалық тізбектердің формасына ие. Кинематикалық схемаға жүктемені басқару құрылғысын модельдеу кезінде

қосымша филиалдар пайда болады. Гидравликалық цилиндр элементтерінің инерциалды сипаттамаларын ескеру қажет болса, манипулятордың кинематикалық схемасында тұйық контур қалыптасады.

2 Бұл мәселені шешу үшін екі тәсіл әзірленген. Бірінші тәсіл - ілмектер бойында тұйық ілмектерді «қиып алу». Сонымен қатар кинематикалық схема динамикалық талдау үшін RNEA, CRBA және ABA алгоритмдерін пайдалануға мүмкіндік беретін кинематикалық тізбектің немесе ағаштың формасын алады. «Кесу» ілмектерінің әрекеті белгісіз күш факторларымен ауыстырылған кезде техника кеңінен қолданылады, онда еркіндік дәрежесі азайған жүйеге өту «артық» жалпыланған координаттарын білдіру арқылы жүзеге асырылады.

3 «Кесу» жабық контурларды, басқа жалпылама координаттар арқылы. Бұл теңдеулер санын азайтады және бөлшектердің «дивергенциясы» мәселесі жоғалады.

4 «Кесу» ілмектер. Алайда жалпыланған байланысты тәуелділіктер координаталар аналитикалық түрде алынуы керек, бұл әрдайым мүмкін емес.

5 Екінші тәсіл - кинематикалық схемадағы барлық ілгектерді алып тастау және манипуляторды байланысты емес қатты заттар жиынтығы ретінде көрсету. Техникасында теңдеулер жүйесі құрылады, ол әрбір дене үшін алты қозғалыс теңдеуін және байланыстың ілгектерімен бекітілген теңдеулерді қамтиды. Теңдеулер жүйесі бірінші көзқарасқа қарағанда үлкенірек болады, бірақ сонымен бірге өте аз, бұл оны аз уақытты ескеретін алгоритмдер көмегімен тиімді шешуге мүмкіндік береді..

6 Топсаларда шағын аралық рұқсат етілсе, импульстік әдіс пен айыппұл әдісі қолданылуы мүмкін. Топтық топсаның қиғаштары көбейгенде, топсаның байланысы күшейтетін күш күшейеді. Сол сияқты, импульстік әдіспен, белгілі бір шекті мәннен асып кетсе, бір-бірімен ұстап тұру үшін топсамен байланыстырылған импульстар қолданылады [19].

Серпінді буындары бар манипулятор үшін динамика есебін шешудің қиындығы мен уақыты да айтарлықтай артады. Демек, буындардың деформациялануын ескеретін алгоритмдерді қолдану қажет, егер бұл негізделген болса.

Бастапқы мәліметтерді дайындау кезінде кран-манипулятор құрылымы элементтерінің инерциялық сипаттамаларын анықтау міндеті туындайды. Көп жағдайда ол күрделі геометрияның салдарынан қолайлы дәлдікпен аналитикалық түрде шешілуі мүмкін емес. Мұндай жағдайларда нысандардың инерциялық параметрлерін олардың 3D-модельдері негізінде есептейтін алгоритмдер қолданылады. Компьютерлік графикада объектінің бетінде салынған үшбұрыштар торының көмегімен көлемді денелердің геометриясы кең таралған. Жұмыста еркін нүктені таңдап, онымен үшбұрышты тор тораптарын қосу және алынған тетраэдрлердің инерциялық сипаттамалары негізінде объектінің инерциялық қасиеттерін анықтау ұсынылды. Тиімді және іске асыру оңай бола отырып, бұл әдістеме кең таралып, әртүрлі алгоритмдерде қолданылды. Жеке алынған тетраэдрлер мен пирамидалардың инерциялық

сипаттамаларын анықтау үшін Гаусс - Остроградский теоремасын көлемді интегралдардан жалпақ интегралдарға өту үшін қолдануға және Грин теоремасына аудан бойынша интегралдан қисық сызықты интегралдарға өту үшін қолдануға негізделген тәсіл ұсынылған. Бұл әдіс идеясының одан әрі дамуы тетраэдра жағдайы үшін жеңілдетілген есептеулер қатарын зерттеуде қолданылды. Айқын түрінде байланысты осьтік және орталықтан тепкіш инерция сәтін ықтиярлы тетраэдра жылғы координаттар оның шыңы алғаш рет ұсынылды жұмысында. Тетраэдрдің Инерция тензорының компоненттерін анықтауға арналған бірыңғай формула, оның шыңдарының бірі санаудың басында орналасқан зерттеуінде алынған. Өзектер, пластиналар, қабықтар сияқты құрылымдардың базалық элементтеріндегі кернеуді анықтаудың аналитикалық әдістері Ресей және шетелдік әдебиетте мұқият зерттелген және жарықтандырылған [17].

Кран - манипулятор жебесінің көтергіш құрылымсының негізін өзектер құрайтындықтан, әдетте жұқа қабырғалы тұйық контурмен, онда есептеу үшін өзектің классикалық теориясын және тұйық профилі бар жұқа қабырғалы өзектер үшін Уман теориясын пайдаланады. Өзектер, пластиналар мен қабықтар теориясында, Серпімділік және икемділік теориясында алынған нәтижелер негізінде кран құрылымсы элементтерінің жүктелуін бағалау және жобалау әдістемесі әзірленді: телескопиялық жебелер, жебелік қондырғытар, гидроцилиндрлер және т. б. Осы әдістердің дамуына елеулі үлес қосқан ресейлік ғалымдар арасында Гохберг М. М., Брауде В. И., Звягин И. Е., Вершинского А.В. және Семенова В.П.; Абрамовича И.И., Березина В.Н. және Яуре А.Г.; Жавнера В.Л. және Крамского Э.И. [25]; Лагерева А.В.

Сандықтың әдістерді әзірлеу, әсіресе соңғы элемент әдісі, кез-келген қиындықты дерлік құрылымдардың динамикалық және беріктік талдауын жүргізуге мүмкіндік берді [9]. Дегенмен, тапсырманың түріне және қабылданған жорамалдарға байланысты, зерттелетін объектінің пайдаланылған соңғы элементтердің түрі және шешім алгоритмі, FEM арқылы есептеулер ресурстық қарқынды болуы мүмкін және ұзақ уақыт алады. Қарқынды дамып және FEM-нің өсіп келе жатқан танымалдығы аясында аналитикалық әдістер өзектілігін жоғалтпады және құрылымдарды жобалауда жиі пайдаланылды, ал сандық әдістер тексеру есебін орындау үшін пайдаланылды. Қазіргі уақытта Ресей Федерациясының аумағында кран-манипулятор қондырғыларының металл құрылымдарының элементтерін есептеу ережелерін регламенттейтін негізгі нормативтік құжат SNiP II-23-81 (2011 ж.) «Болат құрылымдары» болып табылады. Бұдан басқа, кран-манипуляторларды жобалау кезінде инженерлер көтергіш-көлік машиналары бойынша анықтамалық құжаттарды басшылыққа алады [6].

1.2 Есептеуіш бағдарламалар мен кешендерді пайдаланып, динамикалық және беріктік талдау

Заманауи инженерлік есептеулер сирек арнайы бағдарламалық

камтамасыз етуді пайдаланусыз жүзеге асырылады. Инженерлік мәселелердің кең ауқымын шешу үшін көптеген бағдарламалық өнімдер әзірленді. Олардың кейбіреулері гидравликалық кран-манипуляторлардың динамикалық жүктемесін зерттеу үдерісінің тиімділігін едәуір арттыра алады.

Динамика мен беріктік мәселелерін шешуге арналған бағдарламалық жасақтама жүйелерінің арасында тәуелсіз қосымшалар бар, әдетте, графикалық пайдаланушы интерфейсі бар және басқа бағдарламалық өнімдерге ендіруге арналған модульдер мен кітапханалар бар.

Инженерлік п саласында жабық және ашық бағдарламалық камтамасыз етумен қондырғыталған бағдарламалық камтамасыз ету қолданысқа ие болды.

Инженерлік есептеулер саласында жабық және ашық бағдарламалық камтамасыз етумен қондырғыталған бағдарламалық камтамасыз ету қолданысқа ие болды. Бағдарламаның бастапқы кодының ашықтығы фактісі, егер қажет болса, өз архитектурасын зерттеуге тілек білдірушілерге, өз бетімен қателіктерді түзетуге және лицензия шартының талаптарына сәйкес оның функционалдығын кеңейтуге мүмкіндік береді. Алайда, осы операцияларды жүзеге асыру уақытты және арнайы білімді талап ететіндіктен, бұл мүмкіндіктер көбінесе талап етілмейді және бағдарламалық камтамасыз етуді таңдаған кезде жиі өңделеді.

Гидравликалық манипулятор крандарының серпінділігі мен беріктігін талдау үшін қолайлы тәуелсіз бағдарламалық өнімдердің арасында Simpack, Universal Mechanism, LMS және MSC Software Corporation әзірлеген және қолдайтын инженерлік бағдарламалық өнімдер желісін ажыратуға болады.

Simpack, Universal Mechanism және LMS Virtual.Lab Motion модулінің бағдарламалық камтамасыз ету жүйесінің функционалдылығы өте ұқсас және мыналарды қамтиды: әртүрлі топсалармен байланыстырылған қатты дене жүйелерін динамикалық талдау; түрлі қуат факторларын қарастыру; үш өлшемді байланыс мәселесін шешу; соңғы элемент үлгілерінің кернеу-штамм күйін есептеу; құрылымдардың беріктігін есептеу; CAD модельдерінен 3D модельдерді импорттау және т.б. LMS, Simpack және Universal Mechanism өнімдері автомобиль және теміржол көлігінің құрылымдық элементтерін талдау үшін шешімдерді ұсынады.

MSC Software Corporation бір-бірімен интеграцияланған бірнеше бағдарламалық өнімдер шығарады. Adams бағдарламалық модулі қатқыл жүйелерді динамикалық талдау үшін пайдаланылады. Әдетте, әртүрлі конструкторлық жағдайлардағы жүктемені анықтау үшін пайдаланылады және олардың ең маңыздысы кейінгі элементтерді талдауды қолдану арқылы толығырақ зерттеледі. Адамс / Флекстің кеңеюі, қатты бөлшектермен бірге соңғы элементтер элементімен ұсынылған серпімді денелерді жобалау схемасына қосу мүмкіндігін береді. Adams / Control және Adams / Mechatronics зерттелген модельді бақылауды жүзеге асырады және оның компоненттерінен кері байланыс алады.

Adams модуліндегі динамикалық талдау нәтижесінде алынатын жүктемелер MSC Nastran процессоры арқылы соңғы элементтерді талдау үшін

келесі файлды экспорттауға болады. Бастапқы деректерді түпкілікті элемент әдісі бойынша өңдеу және есептеу нәтижелерін талдау алдын ала / постпроцессорлы MSC Patran-ге мүмкіндік береді [31].

Гидравликалық кран-манипуляторлар динамикасын зерттеу үшін ерекше қызығушылық Вортекс бағдарламалық пакеті болып табылады. Кешеннің мамандануы машиналар мен механизмдердің мінез-құлқының нақты уақытында модельдеу болып табылады. Vortex Dynamics Software модулі түрлі күш факторларын және дене байланысының өзара әрекетін ескере отырып, топсалармен байланыстырылған қатты денелердің динамикалық талдауына мүмкіндік береді. Модульдің басқа ерекшеліктері жүк жүктемесінің көтерілуімен байланысты проблеманы шешуге негізделген жүктемені өңдеу құрылғысының сапасын талдауды, сондай-ақ есептеу уақытын қысқарту үшін есептеулерді параллелдеу мүмкіндігін қамтиды.

Vortex Editor модулі - модельдеу орындалатын виртуалды жұмыс кеңістігінің редакторы; сондай-ақ тетіктерді жасау мен түзету үшін қолданылады. Қозғалтқыштар үшін Vortex Dynamics және Vortex Articulating Boom Truck Crane модульдері ілгіштермен байланыстырылған қатты денелердің динамикасын зерттеу үшін ұқсас бағдарламалық жүйелерден ерекшеленеді. Көліктерге арналған көлбеу динамика көлік құралын тез жасайды және оны симуляторда тексеруге мүмкіндік береді. Дайын дайындаушы компоненттер модельді дамытуды жеделдету үшін қолданылады.

2. Кран-манипулятордың металл құрылымының динамикалық жүктемесі мен беріктігін бағалаудың математикалық модельдері мен әдістері

Жылжымалы көлік техникасының қондырғылары. Бұл тарауда түрлі конфигурациялардағы гидравликалық кран-манипуляторлардың металл конструкцияларының динамикалық жүктемесін бағалау үшін пайдаланылатын математикалық модельдер мен әдістер көрсетілген.

Осы тараудың 1 - бөлімінде гидравликалық SOLIDWORKS-дің динамикалық-беріктігі есептелген әдісінде қолданылатын негізгі жорамалдар мен алгоритмдерді таңдауға негіз бар. Екінші секцияда КМҚ құрылымдық моделі ұсынылған, сондай-ақ метал кран кранының компоненттерінің инерциальды сипаттамаларын есептеу кезінде қолданылатын математикалық аппарат қысқаша сипатталған және осы элементтердің эталондық жүйелері арасында көшу сипатталған.

Осы тараудың 3-бөлімінде динамика мәселесіне арналған. Әр түрлі күш факторларын (гидравликалық қозғалтқыштар, гравитация және инерция күштері, арматикалық буындардағы үйкеліс күштері және т.б.) және қозғалыс теңдеуін сандық интегралдауды ескере отырып, әр түрлі күш факторларын (тікелей, кері және гибриді) шешудің әдістері қарастырылады.

Динамика мәселесін шешу нәтижесінде алынатын деректер 4-бөлімде талқыланатын КМҚ металл құрылымының элементтерін жүктеу деңгейін есептеу үшін бастапқы нүкте болып табылады. Жүктеудің негізгі көрсеткіштері - құрылымдық элементтердің учаскелеріндегі нүктелердегі кернеулер және ішкі күш факторлары. Оларды анықтау үшін жіңішке қабырғалы роликтер теориясы ережелерін ескеретін әдіс ұсынылады. Сонымен қатар соңғы элемент әдісіне негізделген балама әдіс. Осы тараудың негізгі ережелері [21].

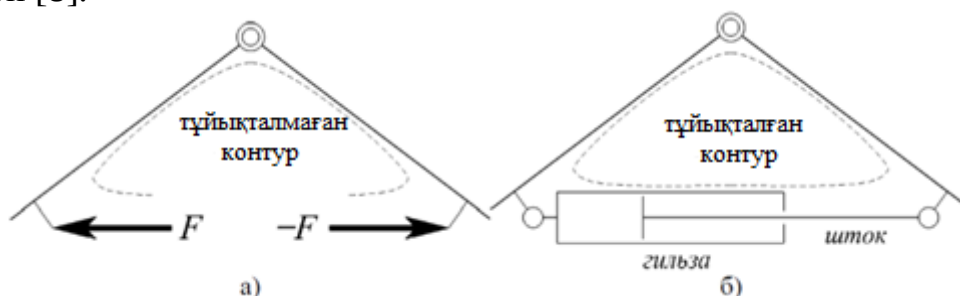
2.1 Есептеу барысында пайдаланылатын негізгі алгоритмдерді және жорамалдарды таңдауды негіздеу

1 тарауда берілген әдеби дерек көздеріне шолу динамика және беріктік есептерінің шешімін табу барысында әр түрлі есептеу алгоритмдері қолданылатынын көрсетті, олар қабылданатын жорамалдардың жылдамдығымен және шешу дәлдігімен және басқа да параметрлермен ерекшеленеді. Әзірленетін жобалау кезеңінде гидравликалық КМҚ динамикалық-беріктік талдау кешеніне бағдарламалық жасақтаманың сипаттамасы келесілерді есептеу барысында алгоритмдер мен жорамалдарды негізделген таңдау жасауға мүмкіндік береді:

- Кран-манипуляциялық қондырғының буындарының деформацияланбайтыны туралы жорамалды қабылдау КМҚ динамикалық және беріктік есептерін қолайлы дәлділікпен орындауға мүмкіндік береді. Бұл жағдайда үлгілі құрылымның еркіндік дәрежесінің санының 6 немесе

одан артық мөлшерде кемуі есебінен есептеу уақыты буындардың серпімділігін ескеретін тәсілмен салыстырғанда бірнеше мәрте қысқарады.

- Кран-манипулятордың конструкцияларындағы гидравликалық қозғалтқыштың ең көп тараған түрі - екі жақты әсерлі бір штокты гидравликалық цилиндр болып табылады, гидравликалық цилиндрлерді бекіту нүктелерінде бағдар бөліктеріне қолданылатын жұп қарсы бағытталған күштерді модельдеу ұсынылады (2.1 а-сурет). Бұл әдіс кинематикалық сызбада жабық контур болмағандықтан, гидравликалық цилиндрді ілмектермен байланыстырылған қосылысымен ұсынылған әдісінен айырмашылығы динамиканың мәселесін шешу үшін күрделі және ресурстық қарқынды жабық контурлар және белгісіз жабылу күштерін іздеу, жалпыланған координаттарға көшу әдісі, еркін органдардың жүйесінде кинематикалық шектеулерді енгізу әдісіне негізделетін алгоритмдерді пайдалануға жол бермейді. Алайда, гидравликалық цилиндрдің инерциалық сипаттамаларын есепке алмай қалу шешімнің дәлдігіне айтарлықтай теріс әсер етпейді, себебі КМҚ қолданылатын гидравликалық цилиндрлердің компоненттері (инерциясының кран-манипулятордың массасы мен компоненттері шағын болуына байланысты) әдетте, ескермеуге рұқсат етіледі. Есептеу алгоритмдерінің есептік күрделілігіне сүйене отырып және манипулятордың инерция матрицасының қисықсыздығының сипатын ескере отырып, егер сіз жабық тізбектердің пайда болуына әкелетін тәсіл қолдануға бас тартсаңыз, динамиканың тікелей мәселесін шешудегі есептік операциялардың саны 3-4 еседен артық азаяды - КМҚ үшін 3-12 сілтемеден 5-10 есе көп [8].



а – қарама-қарсы бағытталған күштер жұбы; б - топсамен бекітілген қатты денелер жұбы

2.1 Сурет - Гидроцилиндрді модельдеу

- Тұйық контурларға арналған CRBA және ABA жоқ қатты денелердің динамикасының тікелей шешімін табу үшін арналған екі негізгі алгоритмнің біреуін қолдану ұсынылады, себебі оған негізделген шешім аз дәрежелі еркіндік дәрежелері бар жүйелер үшін есептеу операцияларын 25% -ға дейін азайтуды талап етеді.

- Гидроцилиндрдің қозғалыс жылдамдығын шектеу үшін жұмыс сұйықтығының параметрлеріне байланысты итерациялық әдістер мен айыппұл әдісі қолданылуы мүмкін. Мұндай жағдайларда соңғы әдіс қолданылуы керек:

төмен дәлдікке қарамастан (айыппұл әдісі кинематикалық шектеулерді реттелетін қателіктермен бақылап отыруға мүмкіндік береді), КМҚ үшін динамикасының мәселесін 9-12 градусқа дейінгі еркіндікпен шешу кезінде КМҚ қозғалыс теңдеулер жүйесінің біржолғы шешімін талап етеді. Жақындату стратегиясына қолайлы итерациялық алгоритм таңдау 500-4000-нан астам қайталауды талап ете алады, олардың әрқайсысында манипулятордың қозғалыс теңдеулер жүйесін шешудің тәртібі бар.

- Бірдей гидроцилиндрде жұмыс істейтін үйкеліс күші айтарлықтай өзгеруіне байланысты (жұмыс сұйықтығының сипаттамалары өзгерген кезде, ол жұмыс барысында қыздырылған, байланыс беттерінің тозуы, тығыздағыш материалының қартаюуы және т.б.) және оның КМҚ металды элементтерінің кернеулі күйін қалыптастыруға қосқан үлесі бұл шамамен есептеу. Мұндай жағдайларда, есептеудің дәлдігіне жылдамдық бойынша Штрибек қисық теңдеуіне негізделген үйкеліс үлгісі оңтайлы болып табылады. Сыртқы жүктеменің үйкеліс күшінің шамасына әсерін ескеретін күрделі модельдерден айырмашылығы, бұл жүктемені динамикалық мәселенің шешілетін жүйесінде табу үшін қосымша теңдеулерді құруды талап етпейді, бұл теңдеулердің санын 2 есеге дейін азайтады және осы теңдеулер жүйесінің шешімдері - 8 есеге дейін азайтады.

- Кран-манипулятордың бағанасының кескіндері мен кескіндері әдетте көлденең қимада жіңішке қабырғалы жабық профильге ие болғандықтан, жіңішке қабырғалы қарнақтарының теориясына негізделген әдістерді олардағы кернеулерді бағалау үшін пайдалануға болады. Бөлімдер әдісін қолдану ұсынылады: оған негізделген беріктік мәселесін шешу алгоритмі сызықтық есептік күрделілігі бар және қарнақ элементтерін пайдалана отырып, МШЭ есептеулерінен айырмашылығы роликтің учаскелерінің қаттылық сипаттамаларын анықтауды, сондай-ақ сызықтық теңдеулерді шешу жүйесін қалыптастыруды және шешуді талап етпейді. Сонымен бірге, неғұрлым күрделі геометриялық металл құрылымының элементтері үшін, сондай-ақ беріктікті есептеу дәлдігін арттыру қажет болғанда, соңғы элемент әдісін қолдану ақылға қонымды. Беріктік тапсырмаларын орындау барысында шешімін табу уақыттың ішінде жүктеу жағдайларын өзгерту үшін бірнеше рет орындалатындықтан, КМҚ байланыстарының геометрия және материалдық қасиеттері өзгеріссіз қалады, ең қиыны қиындықтарды анықтау (секция әдісімен есептеу үшін секциялар мен қималардың қасиеттері) МШЭ есептеу үшін ШЭ үлгілерінің сипаттамалары) бір рет анықталуы мүмкін. Бұл беріктік есептеудің есептік күрделілігін айтарлықтай азайтады және оны негізгі элементтер мен нақты уақыттағы төмен бөлшектердің ШЭ үлгілері үшін жасауға мүмкіндік береді. Осындай тәсілді пайдалану қатты дискіде салыстырмалы түрде баяу оқу және жазу операцияларын санын азайтуға мүмкіндік береді, осылайша есептік уақытты көбіне 1-2 дана тәртіпте азайтады, ол шешілген динамикалық мәселенің әрбір сатысында беріктігі есептеледі, содан кейін үнемдейді қатты дискіге алынған нәтижелер көрсетіледі.

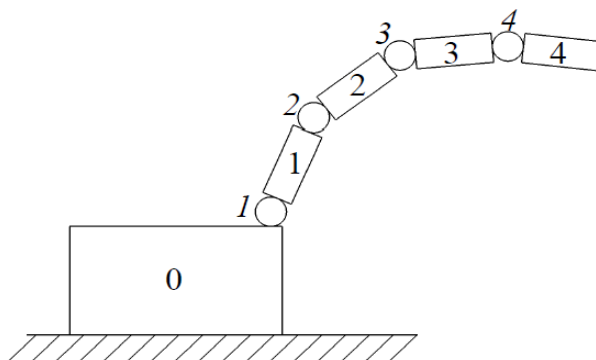
- Жіңішке қабырғалы өзектердің, соңғы элементтердің үлгілері мен

металл конструкцияларының басқа элементтерін олардың геометриясына және материалдың тығыздығы туралы мәліметтерге негізделген инерциалық сипаттамаларын автоматты анықтау үшін 2.2.2 тарауда қарастырылған алгоритмдерді қолдану ұсынылады. Ал жіңішке қабырғалы жабық циклмен кескіндердің қиылысу бөліктерінің геометриялық сипаттамаларын анықтау үшін, әмбебап техника секциялық геометрияның төртбұрышты сызықтардың жиынтығымен және Майкл ШЭллейдің алгоритмінің екі өлшемдік нұсқасын қолдану арқылы негізделе алады.

2.2 Мобильді машинаның кран-манипуляторлық қондырғысының математикалық моделі

2.2.1 Кран-манипуляторлық қондырғының құрылымдық үлгісі

Гидравликалық кран-манипулятор топсалармен жалғастырылған (2.2-сурет) абсолютті қатты денелердің (буындар) жүйесі ретінде қарастырылған.



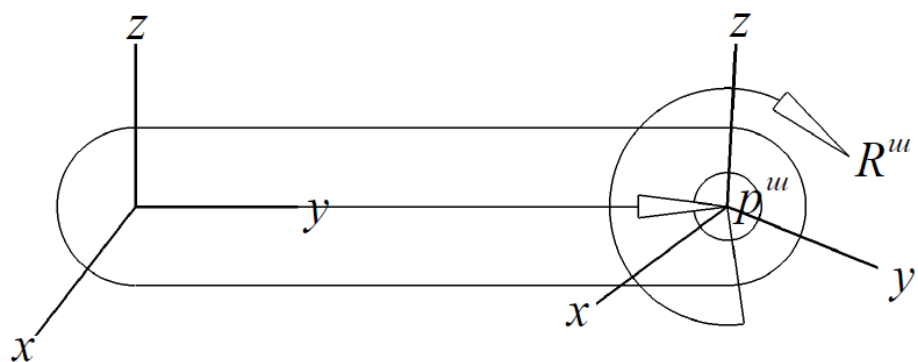
2.2 Сурет – Крана-манипулятордың құрылымдық моделі

Буындардың біреуі қатты бекітілген және кран-манипулятордың негізі (базасы) болып табылады. Буындардың номенклатурасы негізінен жүктерді қармау құрылғысына дейін нөлден басталады (2.2-сурет).

Кран-манипулятор қондырғыларында ілмектердің екі түрі болады: түйінді және призмалық (1.2-сурет). Түйінді бунақталу көршілес буындарға бір-біріне қатысты айналмалы қозғалыс жасауға мүмкіндік береді және призмалық – үдемелі қозғалыс жасайды.

Буындардың екі түрі де бірдей еркіндік дәрежесіне ие. Демек, тұрақты негіздемесі кран-манипулятордың еркіндік дәрежелері саны топсалар санына сәйкес келеді. Буындар сияқты топсалар негізінен манипулятордың жүк тиеу құрылғысына дейін нөмірленеді, бірақ нөмірлеу бірден басталады (2.2-сурет).

Әр байланыстың және әр топсаның жергілікті координат жүйесімен байланысы бар. Алдыңғы буындардағы координат жүйесіндегі топсаның орналасу орны вектор p^m және бұрылыс матрицасы R^m өлшемі 3×3 өлшеммен берілген (2.3-сурет).



2.3 Сурет – Орын ауыстыру векторы және бұрылыс матрицасы көмегімен буынның координаттар жүйесіндегі топса қалпын белгілеу

x , y және z өстерінің айналасынан бұрылыс матрицасы келесі түрде болады:

$$R_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix},$$

$$R_z(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

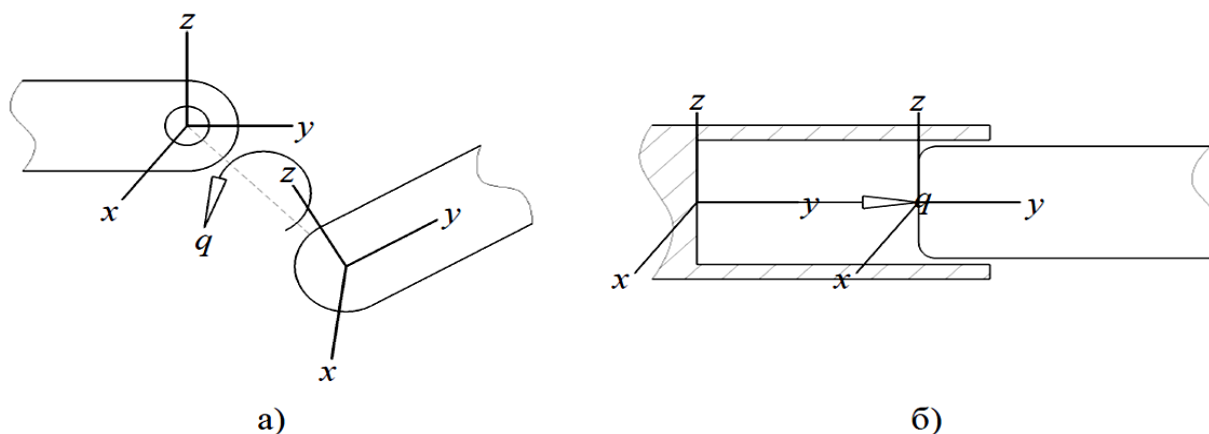
мұндағы φ – бұрылу бұрышы.

Топсаның координат жүйесінің бағыты пайдаланушы тандаған үш ось айналасында бұрылу комбинациясымен белгіленеді. Алынған айналу матрицасы айналдыру матрицасын осьтердің айналасына дәйекті түрде көбейту арқылы алынады. Мысалы, y , x , z осін айналғанда, ол келесідей болады:

$$R^w = R_y(\varphi_y) R_x(\varphi_x) R_z(\varphi_z).$$

Түйінді топсаның шеңберінің айналу осі немесе призмалық топсаның қозғалыс бағыты жергілікті схемадағы вектордың s секторымен берілген. Ілгегіден кейінгі байланыстың координаталық жүйесінің орны ілмектің бұрылуымен, егер ол орын ауыстыратын болса немесе оны призмалық болса, топсаға жылжыту арқылы анықталады (2.4-сурет).

Топсалардағы қозғалыстар мен бұрылыстар жалпылама түрде әрекет етеді координаттары q және олардың туындылары жалпыланған жылдамдықтар $\dot{q}$ және жеделдетулер $\ddot{q}$ рөлінде рөл атқарады. Топсадағы жалпылама күш τ - бұл күш кран-манипулятор арқылы жетілдірілген призмалық түйіскен қосылыс күші немесе моменті болады. Әрбір топсаның динамикалық міндетінің түріне қарай жалпыланған жеделдету $\ddot{q}$ немесе жалпыланған күш τ белгілі және жалпылама қозғалу q және жылдамдық $\dot{q}$ әрқашан белгілі.

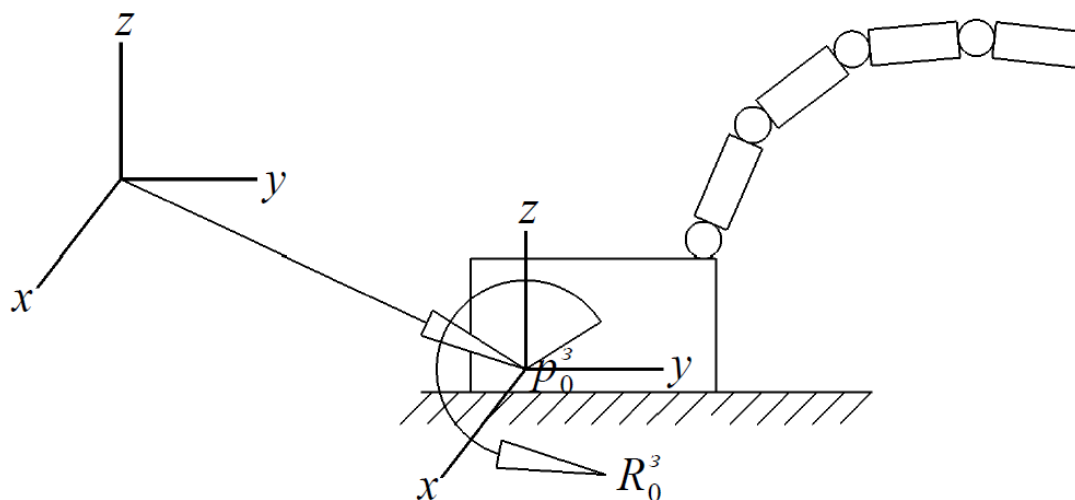


а - түйінді бунақ; б - призмалық бунақ

2.4 Сурет – Топсадан кейінгі санақ буыны жүйесінің орналасуы

Инерциальдық сипаттамалар әр буын үшін белгіленеді: m масса, c ауырлық ортасының қалпы, J инерция тензоры гравитация орталығына қатысты. Инерциальдық сипаттамалар жергілікті координат жүйесінде берілген. Сілтемені жылжытқанда немесе айналдырғанда олар өзгеріссіз қалады.

Ғаламдық координаттар жүйесіндегі кран-манипулятор базасының анықтамалық жүйесінің позициясы вектордың ығысуымен p_0^3 және матрицаның айналдыру R_0^3 көмегімен беріледі (2.5-сурет).



2.5 Сурет – Кран - манипулятордың негізін глобалдық координат жүйесінде ауыстыру векторы мен айналу матрицасын қолданып орнату

Осылайша, кран-манипуляторының динамикасының мәселесін шешу үшін бастапқы деректер келесі түрде болады:

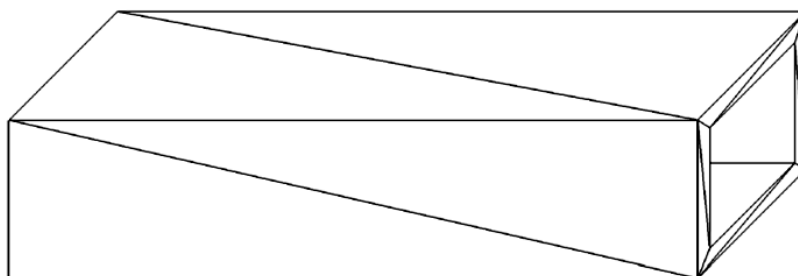
- сілтемелердің инерциялық сипаттамалары;
- топсалар мен сілтемелердің салыстырмалы орналасуы;
- жалпыланған координаттар, жылдамдықтар, жалпыланған жеделдету мен жалпылама күштер;

• ғаламдық координат жүйесіндегі кран-манипулятордың қондырғыларының негізі.

2.2.2 Көлемді 3D-модельдер негізінде кран-манипулятор қондырғысының инерциялық сипаттамаларын анықтау әдістемесі

Жалпы жағдайда, кран-манипулятордың байланыстары кешенді геометриялық пішіннің өзара байланысқан сипаттамалық құрылымдық элементтерінің сериясынан тұратын сындарлы түрде ұсынылуы мүмкін. Пайдаланушы STL форматындағы мәтіндік және екілік файлдардан сілтемелер элементтерінің 3D-модельдерін жүктей алады. Бұл үлгілер кран-манипулятордың бум бөлімінің бөліктері немесе элементтері болады және олар бағдарламаның көрінуін және қолайлылығын арттыру үшін пайдаланылады, сондай-ақ оларды есептеу кран-манипулятордың байланыстарының инерциялық сипаттамалары қажет.

STL файлындағы үш өлшемді үлгі үшбұрыш жиынтығымен берілген (2.6-сурет)



2.6 Сурет – STL файлында үшбұрыштар жинағымен қорапты қима білігін ұсыну

Әр үшбұрыш үшін оның шыңдары координаты туралы ақпарат сақталады.

v_1 , v_2 , v_3 және сыртқа қалыпты n векторы. Қатты инерциялық сипаттамаларын есептеу кезінде ол материалдың тығыздығы ρ үш өлшемді моделінің көлемі бойынша тұрақты деп саналады.

Алгоритм негізінде ұсынылған әдіс алынған. Бұл үшбұрыш жиынтығы шектелген сусымалы органның инерциялық сипаттамалары беті моделі және өз бетінше таңдаған нүктесі O болады. Осылайша, дене салмағы массасы белгілі тетраэдр сомасы ретінде есептеледі үшбұрыштар қалыптастырған тетраэдрлар инерциялық сипаттамаларының негізінде табуға боладығын көрсетеді. Мұнда ол туынды бойынша үшбұрыштың сыртқа қалыпты, нүктесі O бағытталған болса тетраэдр салмағы теріс болып саналады

Қатты заттың инерция тензорының компоненттері ұқсас түрде есептеледі. Ерікті тетраэдрдің массасы мен ауырлық орталығы оның шыңдары координаттарына негізделеді:

$$m = \rho \left| \frac{1}{6} \det(v_1 - v_0, v_2 - v_0, v_3 - v_0) \right|, c = \frac{1}{4}(v_0 + v_1 + v_2 + v_3).$$

Тетраэдра белгісі ол салынған үшбұрыштың сыртқы қалыпты векторының скалярлық өнімі арқылы анықталады және О нүктесінен О үшбұрышының бір шетіне дейінгі векторды анықтайды.

О нүктесінің ұстанымы еркін түрде тандалғандықтан, оны бастапқыда орналастыру үшін есептеулерді жеңілдету ұсынылады. Содан кейін белгілерді ескере отырып, ауырлық және салмақ орталығын анықтаудың формуласы келесі түрде болады:

$$m^{\pm} = \rho \operatorname{sign}(v_1 \cdot n) \left| \frac{1}{6} \det[v_1, v_2, v_3] \right|, c = \frac{1}{4}(v_1 + v_2 + v_3). \quad (2.1)$$

Жалпы, көлемді фигураның инерция сәттерін анықтауға арналған формулалар:

$$\begin{aligned} J_{xx} &= \iiint_V \rho(y^2 + z^2) dx dy dz, & J_{xy} &= \iiint_V \rho x y dx dy dz, & J_{xz} &= \iiint_V \rho x z dx dy dz, \\ J_{yx} &= J_{xy}, & J_{yy} &= \iiint_V \rho(y^2 + z^2) dx dy dz, & J_{yz} &= \iiint_V \rho y z dx dy dz, \\ J_{zx} &= J_{xz}, & J_{zy} &= J_{yz}, & J_{zz} &= \iiint_V \rho z^2 dx dy dz. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Координаттары бойынша орналасқан тетраэдрдің инерциясының сәттері келесі формула бойынша есептеледі:

$$J^{\pm} = \frac{m^{\pm}}{20} (f(v_1) + f(v_2) + f(v_3) + f(v_1 + v_2 + v_3)), \quad (2.3)$$

мұндағы f - формулада (2.2) тиісті инерция моменнті үшін өрнектің интегралдық функциясы берілген.

Формулалар (2.1) - (2.3) массаны, ауырлық орталығын және элементтердің инерция тензорын анықтауға мүмкіндік береді

$$m^{\pm} = \sum_i m_i^{\pm} \quad c^{\pm} = \frac{\sum_i c_i m_i^{\pm}}{m},$$

$$J_{xx}^{\pm} = \sum_i J_{xx}^{\pm}, J_{yy}^{\pm} = \sum_i J_{yy}^{\pm}, J_{zz}^{\pm} = \sum_i J_{zz}^{\pm},$$

$$J_{xy}^{\pm} = J_{yx}^{\pm} = \sum_i J_{xy}^{\pm}, J_{xz}^{\pm} = J_{zx}^{\pm} = \sum_i J_{xz}^{\pm}, J_{yz}^{\pm} = J_{zy}^{\pm} = \sum_i J_{yz}^{\pm}.$$

Инерция тензоры есептелу басында келесі түрдегідей болады:

$$J_0^{\pm} = \begin{bmatrix} J_{xx}^{\pm} & -J_{xy}^{\pm} & -J_{xz}^{\pm} \\ -J_{yx}^{\pm} & J_{yy}^{\pm} & -J_{yz}^{\pm} \\ -J_{zx}^{\pm} & -J_{zy}^{\pm} & J_{zz}^{\pm} \end{bmatrix}.$$

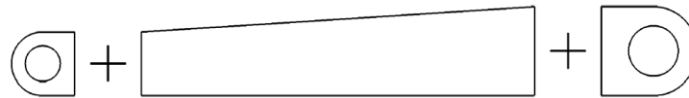
Инерция тензоры гравитация орталығына Гюйгенс-Штайнер

теоремалары көмегімен ауысады [83]:

$$J^3 = J_0^3 - m^3 \begin{bmatrix} c_y^{3^2} + c_z^{3^2} & -c_x^3 c_y^3 & -c_x^3 c_z^3 \\ -c_y^3 c_x^3 & c_x^{3^2} + c_z^{3^2} & -c_y^3 c_z^3 \\ -c_z^3 c_x^3 & -c_z^3 c_y^3 & c_x^{3^2} + c_y^{3^2} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

m^3 , c^3 , J^3 алынған мәндер элементінің қажетті инерциялық сипаттамалары болып табылады.

Кран-манипулятордың буыны күрделі геометриялық пішіні 2.7-суретте көрсетілгендей бірнеше элементті қамтиды.



2.7 Сурет – Үш элементтен құралатын буын: өзек және екі саңлау

Әрбір элементтің инерциялық сипаттамалары белгілі болатын жергілікті координат жүйесі бар: массасы m_i^3 , ауырлық орталығы c_i^3 , және гравитация орталығындағы инерция тензоры J_i^3 . Байланыстың координат жүйесіндегі әрбір элементтің позициясы оны ауыстыру векторы p_i^3 , және айналу матрицасы R_i^3 арқылы анықталады. Кран-манипулятор динамикасының мәселесін шешу кезінде осы деректерді болашақта пайдалану үшін жергілікті координат жүйесінде композитті қатты ретінде байланыстың инерциялық сипаттамаларын анықтау қажет.

Буын массасы мына формула бойынша анықталады:

$$m = \sum_i m_i. \quad (2.5)$$

Буынның координаталық жүйесінде i -ші элементінің ауырлық орталығының орналасуын табу үшін роторлық матрицаның көмегімен Ректордың айналу матрицасы R_i^3 көмегімен вектордың айналдыруын c_i^3 және оны элементтің координат жүйесінің орын ауыстыру p_i^3 мәнімен алмастыру қажет:

$$c_i^{3,3} = p_i^3 + R_i^3 c_i^3.$$

Ауырлық күші орталығы:

$$c = \frac{\sum_i c_i^{3,3} m_i^3}{m}. \quad (2.6)$$

Байланыс жүйесінің ауырлық орталығына қатысты буынның i -ші

элементтің инерция тензоры Гюйгенс-Штайнер теориясы негізінде гравитацияның айналу матрицасы және ауырлық орталығына көшу арқылы тензорлы айналуын дәйектілікпен қолданылуы арқылы анықталады.

i -ші элементтің инерциялы тензорының буынының координаталық жүйесіндегі айналуының өзгеруі мына қатынаспен анықталады:

$$J_i^{\alpha,\beta} = R_i^{\alpha} J_i^{\alpha} R_i^{\beta T}.$$

Буынның сілтеме жүйесінде дененің ауырлық орталығынан буынның ауырлық орталығына дейінгі векторы келесі формаға ие:

$$r^i = c - c_i^{\alpha,\beta}.$$

Элементтің инерциялы тензорыннан буынның ауырлық орталығына жылжыту:

$$J_{c,i}^{\alpha,\beta} = J_i^{\alpha,\beta} - m_i \begin{pmatrix} r_{i,y}^2 + r_{i,z}^2 & -r_{i,x}r_{i,y} & -r_{i,x}r_{i,z} \\ -r_{i,y}r_{i,x} & r_{i,x}^2 + r_{i,z}^2 & -r_{i,y}r_{i,z} \\ -r_{i,z}r_{i,x} & r_{i,z}r_{i,y} & r_{i,x}^2 + r_{i,y}^2 \end{pmatrix}.$$

Буынның инерция тензоры ауырлық орталығына қатысты есептеледі:

$$J = \sum_i J_{c,i}^{\alpha,\beta} \quad (2.7)$$

Формулалар (2.5) - (2.7) бойынша табылған m , c , J шамалары буынның қажетті инерциялық сипаттамалары болып табылады.

2.2.3 Кран-манипулятор қондырғысының буындарының динамикасын модельдеу барысындағы ғаламдық және жалпылама координаттар жүйесінің байланысы

Кейбір жағдайларда буын ғаламдық координаттар жүйесіннен жергілікті жүйесіне немесе керісінше өту қажет. Мысалы, белгілі бір жалпыланған координаттарын пайдаланып, ғаламдық координат жүйесінде буын нүктесінің траекториясын анықтау міндеті болса; немесе егер буында әрекет ететін күш-қуат жаһандық координат жүйесінде көрсетілген болса және осы буынның тепе-теңдік теңдестері жергілікті буында жазылған.

Мәселені шешу үшін бастапқы деректер:

- p_i^{III} , R_i^{III} – жүйеде i -ші топсаның ығысу векторы мен айналу матрицасы алдыңғы буын координаттары;
- q_i – циклде немесе i -ші призматикалық топсаның ішінде жылжу;

- $p_i^{G^3}, R_i^{G^3}$ – ауыстыру векторы және негізгі айналу матрицасы манипуляторды ғаламдық координат жүйесінде орнату.

Табу қажет:

- $p_i^{G^3}, R_i^{G^3} - i$ -ші буынның ғаламдық координат жүйесі орын ауыстыру векторы мен айналу матрицасын;

- $p_i^{G^{\text{ш}}}, R_i^{G^{\text{ш}}} - i$ -ші топсаның ғаламдық координат жүйесі орын ауыстыру векторы мен айналу матрицасын;

Ғаламдық координат жүйесіндегі кран-манипулятордың негізі белгілі болғандықтан, вектордың r буынында жергілікті буын жүйесінде көрсетілген еркін нүкте үшін оның координаттары r^G жаһандық координат жүйесінде табылуы мүмкін:

$$r^G = p_0^{G^3} + R_0^{G^3} r. \quad (2.8)$$

Формула бойынша (2.8) жаһандық координат жүйесіндегі алғашқы топсаның орналасу ережесі анықталады:

$$p_1^{G^{\text{ш}}} = p_0^{G^3} + R_0^{G^3} p_1^{\text{ш}}. \quad (2.9)$$

Бірінші топсаның айналу матрицасы жаһандық координат жүйесінде базаның айналуының және базаның жергілікті айналудың комбинациясы ретінде есептеледі:

$$R_1^{G^{\text{ш}}} = R_0^{G^3} R_1^{\text{ш}}. \quad (2.10)$$

Келесі буынды призмалық байланыс болса топсаның осі бойымен жылжытамыз, немесе түйінді болса айналдырамыз.

Призмалық бірлескен жағдайда, жаһандық координат жүйесіндегі буын орналасуы келесі формулалармен анықталады:

$$p_1^{G^3} = p_1^{G^{\text{ш}}} + R_1^{G^{\text{ш}}}(q_1 * s_1), \quad (2.11)$$

$$R_1^{G^3} = p_1^{G^{\text{ш}}}.$$

Түйінді біріккен жағдайда буынның орналасуы:

$$p_1^{G^3} = p_1^{G^{\text{ш}}}, \quad (2.12)$$

$$R_1^{G^3} = R_1^{G^{\text{ш}}} R_{s_1}(q_1),$$

мұндағы $R_{s_1}(q_1) - s_1$ векторының φ бұрышына айналу матрицасы.

Осылайша, формулалар (2.9) - (2.12) бізге жаһандық координаттар жүйесіндегі бірінші нөмірлі топсаның және бірінші нөмірлі буынның орнында

ұстанымды анықтауға мүмкіндік береді. Сол сияқты, кран-манипулятордың барлық буындарының және топсаларының ғаламдық анықтамалық жүйесінде ауыстыру үшін векторлары мен айналу матрицасы кезек есептеледі:

- i -ші топсаның орны:

$$p_i^{G \text{ ш}} = p_{i-1}^{G 3} + R_{i-1}^{G 3} p_i^{\text{ш}}, \quad (2.13)$$

$$R_i^{G \text{ ш}} = R_{i-1}^{G 3} R_i^{\text{ш}};$$

- i -ші буынның орны, призматикалық байланыс кезінде:

$$p_i^{G 3} = p_i^{G \text{ ш}} + R_i^{G \text{ ш}}(q_i * s_i), \quad (2.14)$$

$$R_i^{G 3} = R_i^{G \text{ ш}};$$

- i -ші буынның орны, түйіндік байланыс кезінде:

$$p_i^{G 3} = R_i^{G \text{ ш}}, \quad (2.15)$$

$$R_i^{G 3} = R_i^{G \text{ ш}} R_{s_i}(q_i).$$

Егер координат жүйесіндегі i -ші буынның орын ауыстыру векторы мен айналу матрицасы белгілі болса, жергілікті буын нүктелерінің r және ғаламдық буын нүктесінің r^G координаттары арасындағы байланыс формулалармен анықталады:

$$r^G = p_i^{G 3} + R_i^{G 3} r,$$

$$r = (R_i^{G 3})^T (r^G - p_i^{G 3}).$$

Жаһандық F^G және жергілікті F координат жүйелеріндегі күштер векторы арасындағы байланыс:

$$F^G = R_i^{G 3} F,$$

$$F = (R_i^{G 3})^T F^G.$$

Осылайша, i -ші буын үшін жергілікті сандық координаттар жүйесінен кейбір мөлшерді жаһандық немесе керісінше түрлендіруді орындау қажет болса, $p_i^{G 3}$ ауыстыру векторының және осы буындағы $R_i^{G 3}$ айналу матрицасы жүйесінің координаттарын білу жеткілікті. Егер бұл шамалар белгісіз болса, олар формулалар бойынша табу (2.13) - (2.15); бұл жағдайда, егер $p^{G 3}, R^{G 3}$ алдыңғы буындағылар мен $p^{G \text{ ш}}, R^{G \text{ ш}}$ топсаларының мәндері белгісіз болса, олар кран-манипулятор өндірғыларының негізінен бастап есептелетін болады.

2.3 Мобильді машинаның кран-манипулятор қондырғысының металл құрылымының динамикалық жүктемесін бағалау әдістемесі

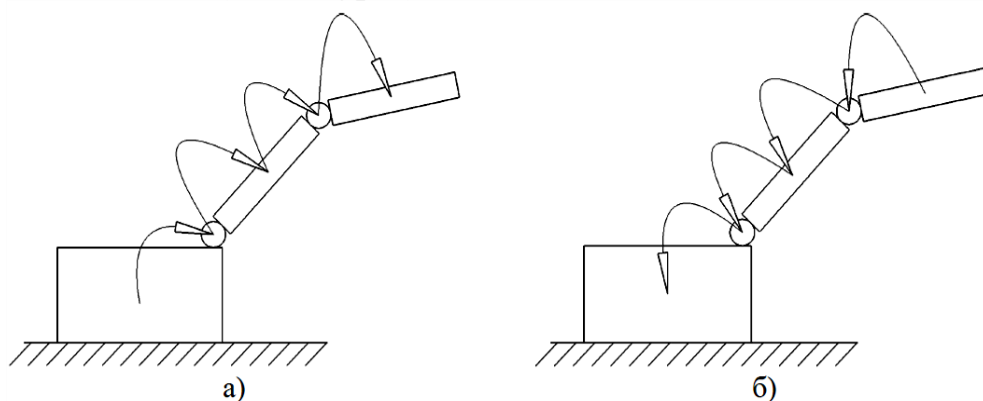
2.3.1 Кран-манипулятор қондырғыларының динамикасының кері есептерін шешу

Кран-манипуляторды орнатудың динамикалық жүктемесін бағалау динамика мәселесін шешуге негізделген. Динамиканың кері мәселесінде жалпылама жеделдету $\ddot{q}_i$ белгілі, қажетті жалпыланған жүктемені τ_i табу. Мұны шешу үшін Ньютон - Эйлер рекурсивті алгоритмін пайдалану ұсынылады (RNEA - Recursive Newton-Euler Algorithm).

Бұл алгоритм екі кезеңнен тұрады: алға және артқа жүрістер, сондай-ақ алға және кері рекурсия деп аталады.

Алға жүрістің міндеті - буынның ауырлық орталықтарында жылдамдық пен жеделдетуді есептеу. Кран-манипулятордың негізіндегі әрбір нүктеде жылдамдық пен жеделдету нөлге тең, өйткені қатаң бекітілген. Әрбір келесі буында бұл мәндер жылдамдық пен жеделдету негізінде және алдыңғы буын жылдамдығын, сондай-ақ топсадағы жылдамдық $\dot{q}$ пен жеделдетуді $\ddot{q}_i$ қосу жылдамдығын анықталады (2.8, а-сурет).

Кері жағы топсалар арқылы берілген жүктемені табуға мүмкіндік береді. Осындай жүктеменің τ топсаның осінде проекциясы қажетті мәнге сәйкес келеді. Бұл шара топсалар үшін соңғы кезден бастап кезекпен орындалады. i -ші қосылыс арқылы берілетін жүктеме Ньютон-Эйлер теңдеулері арқылы i -ші буын үшін жазылған (2.8,б-сурет).



а - түзу жүру, жылдамдық пен үдеуді есептеу; б - кері жүріс, үдеуді есептеу

2.8 Сурет – Ньютона-Эйлер алгоритмінде операцияларды орындау рету

Кран-манипулятор қозғалысы барысында, көптеген параметрлер ғаламдық координаттар жүйесіне қатысты өз мәндерін өзгертеді: мысалы, буындардың ауырлық орталықтарының позициялары, буындардың инерциясының тензорлары және т.б. Бұл әр қадамда олардың мәндерін жаңартуды талап етеді. Алайда буындардың мәндері жергілікті сілтеме жүйелері бойынша өзгеріссіз қалады. Сондықтан, жергілікті координат

жүйелерінде есептеуді жүзеге асыру үшін RNEA алгоритміндегі есептік тұрғыдан тиімдірек болады.

Келесі белгілерді енгізіңіз:

$v_i^3, \omega_i^3, a_i^3, \varepsilon_i^3$ – i -ші буынның басында сызықтық және бұрыштық жылдамдық, сызықты және бұрыштық үдеу;

$v_i^{\text{III}}, \omega_i^{\text{III}}, a_i^{\text{III}}, \varepsilon_i^{\text{III}}$ – i -ші топсаның шыққан жерінде сызықты және бұрыштық жылдамдық, сызықты және бұрыштық үдеу.

Байланыстың кез-келген нүктесінде r жылдамдығын және үдеуін келесі формулалармен анықтайды:

$$\begin{aligned} v_i^{3,r} &= v_i^3 + \omega_i^3 \times r, \\ \omega_i^{3,r} &= \omega_i^3 \\ a_i^{3,c} &= a_i^3 + \omega_i^3 \times (\omega_i^3 \times c) + \varepsilon_i^3 \times c \\ \varepsilon_i^{3,c} &= \varepsilon_i^3, \end{aligned} \quad (2.16)$$

Тәуелділіктерді (2.16) қолдану арқылы, біз буынның ауырлық орталығындағы c_i жылдамдық пен үдеуді есептейік:

$$\begin{aligned} v_i^{3,c} &= v_i^3 + \omega_i^3 \times c, \\ \omega_i^{3,c} &= \omega_i^3 \\ a_i^{3,c} &= a_i^3 + \omega_i^3 \times (\omega_i^3 \times c) + \varepsilon_i^3 \times c \\ \varepsilon_i^{3,c} &= \varepsilon_i^3, \end{aligned} \quad (2.17)$$

$i1$ -ші қосылыстың артындағы i -ші топсаның жылдамдығы мен үдеуі формула (2.16) арқылы есептеледі және айналмалы матрицаны пайдаланып топсаның координат жүйесіне айналдырылады:

$$\begin{aligned} v_i^{\text{III}} &= (R_i^{\text{III}})^T (v_{i-1}^3 + \omega_{i-1}^3 \times p_i^{\text{III}}), \\ \omega_i^{\text{III}} &= (R_i^{\text{III}})^T \omega_{i-1}^3 \\ a_i^{\text{III}} &= (R_i^{\text{III}})^T (a_{i-1}^3 + \omega_{i-1}^3 \times (\omega_{i-1}^3 \times p_i^{\text{III}}) + \varepsilon_{i-1}^3 \times p_i^{\text{III}}) \\ \varepsilon_i^{\text{III}} &= (R_i^{\text{III}})^T \varepsilon_{i-1}^3 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Призматикалық топсадағы кейін i -ші буынның бастапқы нүктесінің жылдамдығы мен үдеуі:

$$\begin{aligned} v_i^3 &= v_i^{\text{III}} + \omega_i^{\text{III}} \times (s_i^{\text{III}} \cdot q_i) + s_i^{\text{III}} \times s_i^{\text{III}} \cdot q_i \\ \omega_i^3 &= \omega_i^{\text{III}} \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$a_i^3 = a_i^{\text{III}} + s_i^{\text{III}} \cdot q_i + \omega_i^3 \times (\omega_i^{\text{III}} \times (s_i^{\text{III}} \cdot q_i)) + \varepsilon_i^{\text{III}} \times (s_i^{\text{III}} \cdot q_i) + 2\omega_i^{\text{III}} \times (s_i^{\text{III}} \cdot q_i) \\ \varepsilon_i^3 = \varepsilon_i^{\text{III}},$$

Түйінді топсадан кейінгі i -ші буынның бастапқы нүктесінің жылдамдығы мен үдеу:

$$\begin{aligned} v_i^3 &= (Rs_i(q_i))^T v_i^{\text{III}}, \\ \omega_i^3 &= (Rs_i(q_i))^T (\omega_i^{\text{III}} +), \\ a_i^3 &= (Rs_i(q_i))^T a_i^{\text{III}}, \\ \varepsilon_i^3 &= (Rs_i(q_i))^T (\varepsilon_i^{\text{III}} + (s_i \cdot q_i) + \omega_i^{\text{III}} \times (s_i \cdot q_i)), \end{aligned} \quad (2.20)$$

Осылайша, Ньютон-Эйлер алгоритмінде тікелей рекурсия мынадай операцияларды қамтиды:

- 1) буынның санақ басында жылдамдық пен үлеу 0 нөлге тең болады буын қатты бекітілуі керек;
 - 2) келесі буынның басында жылдамдық пен үдеуді формулалар (2.18) - (2.20) бойынша есептеу;
 - 3) төмендегі буындағы ауырлық орталығындағы жылдамдық пен үдеу формула бойынша анықтаңыз (2.17);
 - 4) соңғы болып табылмаған жағдайда, әрбір кейінгі буын үшін 2-4 операцияларын орындайды
- Қайтару Ньютон-Эйлер теңдеуін қолдануға негізделген i -ші буын үшін теңдеудің жазылуы:

$$\begin{aligned} F_{i-1}^{\text{III}, \rightarrow} + F_i^3 + F_i^{\text{III}, \leftarrow} &= m_1 a_i^{3,c}, \\ M_{i-1}^{\text{III}, \rightarrow} + M_i^3 + M_i^{\text{III}, \leftarrow} &= J_i \varepsilon_i^{3,c} + \omega_i^{3,c} \times (J_i \omega_i^{3,c}), \end{aligned} \quad (2.21)$$

мұнда $F_{i-1}^{\text{III}, \rightarrow}$, $M_{i-1}^{\text{III}, \rightarrow}$ – $i-1$ топсасындағы келесі буын ілмектің әрекет ететін күші мен моменті; $F_i^{\text{III}, \leftarrow}$, $M_i^{\text{III}, \leftarrow}$ – $i-1$ топсасындағы алдыңғы буын ілмектің әрекет ететін күші мен моменті; F_i^3 , M_i^3 – i -ші буынды сыртқы жүктемеден қолданылып, нәтижесінде алынған күш және момент.

Ньютон-Эйлер теңдеуін соңғы буынды n нөмірімен жазамыз i -ші буын үшін қолданылған формулаға ұқсас. $F_i^{\text{III}, \leftarrow}$ және $M_i^{\text{III}, \leftarrow}$ компоненттері нөлге тең, себебі бұл буында топса болмауы керек. Алынған RNEA алгоритмінің кері жұмысын орындау сатысында және әрбір буын үшін нәтижелі күш F_n^3 пен моментің M_n^3 сыртқы жүктемеден белгілі, немесе есептелген. Осылайша, бұрынғы топсаның жүктемесі белгісіз компоненттерін тікелей (2.21)

формуладан табамыз:

$$F_{n-1}^{w,\rightarrow} = -F_n^3 + m_1 a_i^{3,c}$$

$$M_{n-1}^{w,\rightarrow} = -M_n^3 + J_n \varepsilon_n^{3,c} + \omega_n^{3,c} \times (J_n \omega_n^{3,c}).$$

Топсаның бұрынғы және келесі тармақта әрекет ететін күші бір-бірімен байланысты.

Призмалық қосылыстар үшін әрекет ететін жүктемені табу алдыңғы буында күш $F_i^{w,\rightarrow}$ пен моментің $M_i^{w,\rightarrow}$ уақытының басына жылжу қажет топсаның тірек нүктесі және буын жүйесіндегі алдыңғысын керіге түрлендіру керек:

$$F_i^{w,\leftarrow} = -R_i^w F_i^{w,\rightarrow}, \quad (2.22)$$

$$M_i^{w,\leftarrow} = -R_i^w \left(M_i^{w,\rightarrow} - F_i^{w,\rightarrow} \times (s_i \cdot q_i) \right),$$

Осындай жолмен, алдыңғы шегелердегі топсаның ілгегіне әрекет ететін күш анықталады. Дегенмен, берудің орнына күш $F_i^{w,\rightarrow}$ пен моментің $M_i^{w,\rightarrow}$, факторларының топтамасындағы бұрылу бұрышы q_i арқылы айналу операциясы қолданылады:

$$F_i^{w,\leftarrow} = -R_i^w (R s_i(q_i) F_i^{w,\rightarrow}), \quad (2.23)$$

$$M_i^{w,\leftarrow} = -R_i^w (R s_i(q_i) M_i^{w,\rightarrow}),$$

I-ші топсасында кран-манипулятордың гидравликалық жетегі арқылы дамытылған τ_i жүктемесі оған әрекет ететін тиісті күш факторының топсалы осіндегі проекциямен анықталады. Призмалық қосындыда қорытылған жүктеме формуламен анықталады:

$$r_i = -F_i^{w,\leftarrow} \cdot s_i, \quad (2.24)$$

Түйінді топсадағы жүктеме τ_i :

$$r_i = -M_i^{w,\leftarrow} \cdot s_i, \quad (2.25)$$

RNEA алгоритмінің кері рекурсиясының толық түрі төмендегідей ретте болады:

1. Соңғы буын үшін Ньютон-Эйлер теңдеуін жасаңыз (2.21). Олардың алдындағы қосындыдан байланысқа әрекет ететін күш пен моментті анықтаңыз.

2. (2.22), (2.23) формулаларды пайдаланып алдыңғы байланыстағы

бұрынғы қосындыдан әрекет ететін күш пен моментті есептеңіз.

3. (2.24), (2.25) формулалар бойынша бұрынғы қосындыдағы жалпыланған күшті анықтау.

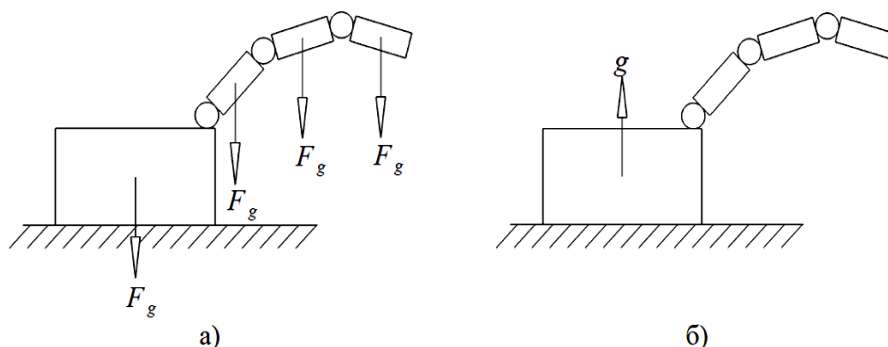
4. Егер бұрынғы байланыс кран-манипулятордың негізі болмаса, оған алдыңғы теңдеуден (2.21) бастап, әрекет ететін күшті анықтаңыз және ол үшін 2-4 тармақтарды орындаңыз.

RNEA алгоритмінде алға рекурсиясы алдымен орындалады, содан кейін кері рекурсия ретімен орындалады. Алгоритмнің нәтижесі бойынша барлық белгісіз жалпыланған жүктемелер τ_i анықталады.

2.3.1 Мобильді машинаның кран-манипулятор қондырғысының буындарына әсер ететін пайдалану жүктемесін ескеру

Кран-манипулятор машинаның жұмыс істеу режимдері мен режимдерінен туындаған түрлі қуат факторларыны әсер етеді. Оларға мыналар жатады: ауырлық күші, жүк салмағы, жел жүктемесі және басқалары.

Кран-манипулятордың құрылысына ауырлық күшінің әсерін модельдеудің екі жолы бар (2.9-сурет).



а - әр буынға ауырлық күшін түсіру; б - жалған жеделдету тапсырмасы

2.9 Сурет – Ауырлық күшінің әсерін ескеру тәсілдері

Ең интуитивті тұрғыда түсінікті түрі $F^{3,g}$ ғаламдық санақ жүйесінде тігінен төмен бағытталған, әр жүйенің ауырлық орталығына негізделеді:

$$F^{3,g} = mg,$$

мұндағы g - ғаламдық координат жүйесіндегі гравитациялық еркін түсу векторы.

$F^{3,g}$ күштерінің әсері кері рекурсия реттіліктерінде ескеріледі: Ньютон-Эйлер теңдеуінің (2.21) сол жақ бөлігіне сыртқы жүктеменің құрамдас бөлігі ретінде кіреді. Бұл теңдеу жергілікті буын жүйесімен байланысты болғандықтан, гравитациялық еркін түсу векторды өзгерту қажет глобалдық координат жүйесіне қатысты буынның айналу матрицасын қолданылады:

$$F^{3,g} = (R^{G3})^T(mg). \quad (2.26)$$

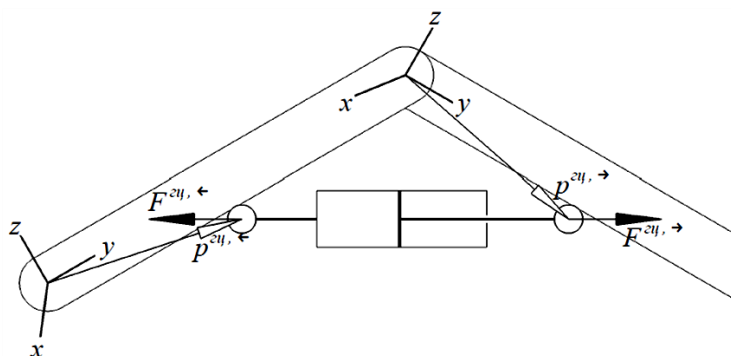
Осылайша, формула (2.21) және (2.26) көмегімен гравитацияның әсерін есепке алу үшін 2.2.3-бөлімде сипатталған әдістемені пайдалана отырып, ғаламдық координаттар жүйесінде оның бағытын анықтау қажет.

Гравитацияны есепке алудың неғұрлым тиімді тәсілі кран-манипулятордың бекітілген негізін гравитацияның жылдамдығына және оған қарама-қарсы бағытқа тең сызықты еркін түсуге орнату болып табылады:

$$a_0^3 = -(R_0^{G3})^T g,$$

RNEA алгоритмінің тікелей бағыты жүзеге асырылғаннан кейін әрбір байланыс жылдамдығын гравитациялық еркін түсу көлемі автоматты түрде азаяды, ал кері кері рекурсия кран-манипулятордың барлық буындарына гравитация әсерін ескере отырып, кері динамикасы шешеді.

Бұл әдістің сөзсіз артықшылығы - әрбір буынның әрқайсысы үшін оның жаһандық тірекке және оның әрекет ететін ауырлық күшінің шамасына қатысты бағдарлығын бөлек анықтау қажеттілігінің жоқтығы. Сонымен қатар тікелей регрессия нәтижесінде алынған байланыстарды сызықтық жылдамдату мәндері әрі қарай пайдаланылмайды, өйткені олар нақты құлдыраудың еркін құлдырауының мәнімен ерекшеленеді.



2.10 Сурет – Гидроцилиндр жағынан кран-манипулятор буынына әсер ететін күштер

Кері есепте гидравликалық жетектің элементтерінің жүктеме динамикасы белгісіз. Дегенмен, олар динамиканың тікелей және гибридік мәселелері бойынша анықталады, оларды шешуге арналған алгоритмдер арнайы бастапқы шарттармен динамиканың кері міндетін шешу тәртібін қамтиды (2.3.3-бөлім, 2.3.4-бөлім). Бұл жағдайда гидравликалық цилиндрлермен әзірленген жүктің әсерін ескеру қажет. i -ші гидравликалық цилиндрден күштің жұптары бойынша $F_i^{гц \rightarrow}$ және $F_i^{гц \leftarrow}$ бойынша әсері бір-біріне қарама-қарсы бағытталған ось бойымен бағытталады ескеріледі (2.10-сурет).

Гидравликалық цилиндр элементтеріне әсер ететін инерция күштері

олардың салыстырмалы кішкентайлығына байланысты ескерілмейді. Бастапқы деректерді анықтау күштер $F_i^{ГЦ \rightarrow}$, $F_i^{ГЦ \leftarrow}$: гидравликалық цилиндр әзірленген күш $F_i^{ГЦ}$; жергілікті алдыңғы $p_i^{ГЦ, \leftarrow}$ нүктесімен, кейінгі нүктелерінің координаттары $p_i^{ГЦ, \rightarrow}$.

Жаһандық санақ жүйесіндегі буындардың координата нүктелерімен байланысуы:

$$p_i^{ГЦ, \leftarrow} = p_i^{ГЦ} + R_i^{G3} p_i^{ГЦ, \leftarrow},$$

$$p_i^{ГЦ, \rightarrow} = p_i^{ГЦ} + R_i^{G3} p_i^{ГЦ, \rightarrow}.$$

Гидравликалық цилиндр осіне бағытталған вектор:

$$u_i^{ГЦ} = p_i^{ГЦ \rightarrow} - p_i^{ГЦ \leftarrow},$$

Буындардың координаталық жергілікті жүйелерінде көрсетілген гидравликалық цилиндр байланыстары бойынша әрекет ететін күші:

$$\begin{aligned} F_i^{ГЦ \rightarrow} &= (R_i^{G3})^T \left(F_i^{ГЦ} \frac{u_i^{ГЦ}}{|u_i^{ГЦ}|} \right), \\ F_i^{ГЦ \leftarrow} &= (R_{3-1}^{G3})^T \left(-F_i^{ГЦ} \frac{u_i^{ГЦ}}{|u_i^{ГЦ}|} \right), \end{aligned} \quad (2.27)$$

Гидравликалық цилиндрлік шоктың кеңейту жылдамдығы $v_i^{шт}$ шектеулі, себебі сорғының ағыны Q_i^{max} соңғы мәні бар. Егер сұйықтық гидравликалық цилиндрдің штоксыз қуысына енгізілсе, онда максимум ұзартылған ұзартқыштың ұзақтығы формула бойынша анықталады:

$$v_i^{шт, max} = \frac{4Q_i^{max}}{\pi D_i^2},$$

Шток қуысына сұйықтықты айдағанда:

$$v_i^{шт, max} = \frac{4D_3^{max}}{\pi(D_i^2 - d_i^2)},$$

мұндағы Q_i^{max} – гидравликалық цилиндрді беретін сорғының максималды ағыны; D_i – гидравликалық цилиндрдің ішкі диаметрі; d_i – гидравликалық цилиндрдің штогының диаметрі.

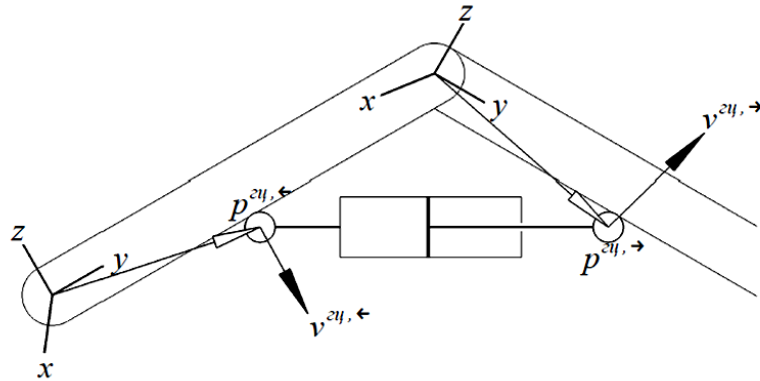
Бұл шектеулерді енгізу үшін тыйым салулар әдісі қолданылады:

кеңейтудің максималды жылдамдығынан асып кетсе, тежеуіш күші гидравликалық цилиндр штогында жұмыс істей бастайды, оның мәні келесі формула бойынша анықталды:

$$F_i^{\text{гц,тр}} = \begin{cases} (v_i^{\text{шт,max}} - v_i^{\text{шт}})k_i^{\text{гц,тр}}, & \text{немесе } v_i^{\text{шт}} > v_i^{\text{шт,max}} \\ 0 & \end{cases}, \quad (2.28)$$

мұндағы $k_i^{\text{гц,тр}}$ – қолданылатын тежеу күші шамасын анықтайтын айып коэффициенті.

Штоктың ұзарту жылдамдығын $v_i^{\text{шт}}$ табу үшін, гидравликалық цилиндрдің қосылыс нүктелері мен буын арасындағы жылдамдық анықтау, және гидравликалық цилиндрдің осьтеріндегі айырмашылық векторын жобалау керек (2.11-сурет).



2.11 Сурет – Штоктың жылжу жылдамдығын анықтау

Ғаламдық санақ жүйесінде гидравликалық цилиндрмен буын нүктелерінің жылдамдығы

$$v_i^{G \text{ гц,} \leftarrow} = (R_{i-1}^{G3})(v_{i-1}^3 + \omega_{i-1}^3 \times p_i^{\text{гц,} \leftarrow}),$$

$$v_i^{G \text{ гц,} \rightarrow} = (R_i^{G3})(v_i^3 + \omega_i^3 \times p_i^{\text{гц,} \rightarrow}),$$

Гидравликалық цилиндрдің ұзартқыш штогінің жылдамдығы

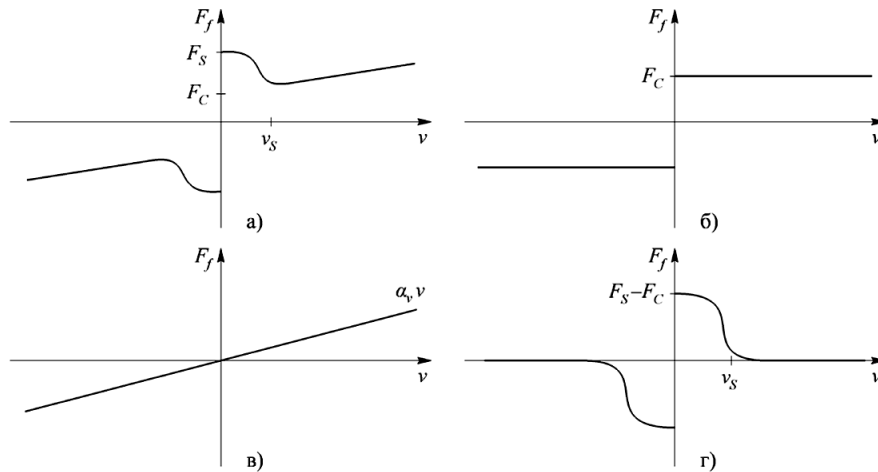
$$v_i^{\text{шт}} = (v_i^{G \text{ гц,} \rightarrow} - v_i^{G \text{ гц,} \leftarrow}) \frac{u_i^{G \text{ гц}}}{|u_i^{G \text{ гц}}|},$$

Гидравликалық цилиндрдегі $F_i^{\text{гц,тр}}$ цилиндріндегі тежегіш күш, формула бойынша анықталады

Гидравликалық цилиндрдегі үйкелу күші штоктың қозғалыс жылдамдығы Штрибектің қисық графигіне (сурет 2.12, а) байланысты анықталады, мәнін төмендегі формуламен табамыз [10]:

$$F_i^{\text{гц,трот}}(v_i^{\text{шт}}) = F_c + (F_s - F_c)e^{\left(\frac{v_i^{\text{шт}}}{v_s}\right)^g} + a_v v_i^{\text{шт}}, \quad (2.29)$$

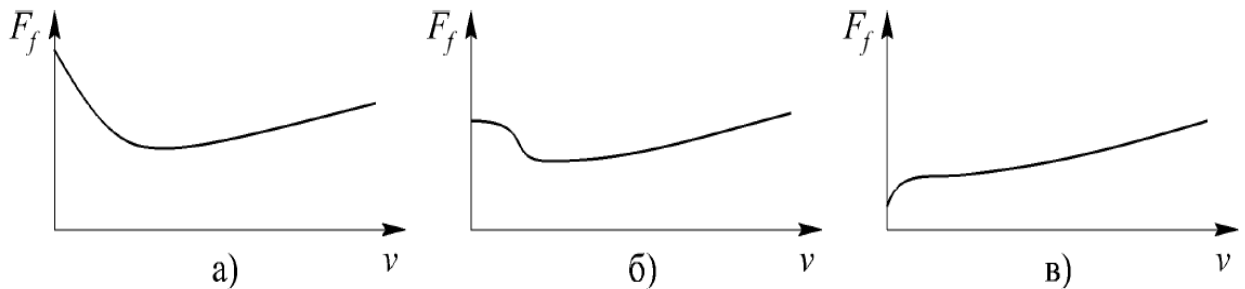
мұндағы F_c - кулондардың үйкеліс күші (2.12, б-сурет); a_v - үйкелістің тұтқырлық коэффициенті (2.12, с-сурет); F_s , v_s , δ – Штрибек әсерінің параметрлері (2.12, г - сурет).



а - Штрибек қисығы; б - кулондық үйкеліс; в - тұтқыр үйкелу; г - Штрибек әсері

2.12 Сурет – Үйкеліс күштің жылдамдыққа тәуелділігі

Штрибек қисығының пішіні көптеген факторларға байланысты, алайда байланыс беттерінің майлау сипаты шешуші болып табылады (2.13-сурет).



а – жеткіліксіз майлау; б – қалыпты майлау; в – жеткілікті майлау

2.13 Сурет – Жанасу аумағында әр түрлі майлау сипатындағы Штрибек қисығының формасы

Бір штокты екі еселенген гидравликалық цилиндрде, штоктың қозғалыс бағытына байланысты, нәтижесінде келтірілген үйкеліс күштері бір-бірінен айтарлықтай ерекшеленуі мүмкін [5]. Бұл жағдайда үйкеліс күшінің жылдамдыққа тәуелділігін сипаттау үшін екі қисық сызықты қолданыңыз: F (v шт) штоктың кеңейтілуіне және F (v шт) алу үшін.

$$F_i^{\text{гц,трот}}(v_i^{\text{шт}}) = \begin{cases} F_{\text{выдв}}(v_i^{\text{шт}}), & \text{егер } 0 < v \\ F_{\text{втяг}}(v_i^{\text{шт}}), & \text{егер } v < 0. \end{cases} \quad (2.30)$$

$v_i^{\text{шт}} = 0$ нүктесіндегі функцияның (2.30) үзіліссіздігі айналмалы жылдамдықпен штоктың қозғалысын модельдеу кезінде теріс әсердің пайда болуына әкелуі мүмкін. Оларды жою үшін жылдамдыққа пропорционалды үйкеліс күшінің шамамен жақындағаны туралы жақын арадағы нөлдік үйкеліс жылдамдық аймағы бөлінеді ($|v_i^{\text{шт}}| \leq \varepsilon$, мұндағы ε реттелетін параметр) [14]:

$$F_i^{\text{гц,тр}}(v_i^{\text{шт}}) = \begin{cases} F_{\text{выдв}}(v_i^{\text{шт}}) & \varepsilon < v \\ F_{\text{выдв}}(\varepsilon)(v_i^{\text{шт}}/\varepsilon) & 0 \leq v \leq \varepsilon \\ F_{\text{втяг}}(-\varepsilon)(-v_i^{\text{шт}}/\varepsilon) & -\varepsilon \leq v \leq 0 \\ F_{\text{втяг}}(v_i^{\text{шт}}) & v < -\varepsilon \end{cases} \quad (2.31)$$

Буындарда гидравликалық цилиндрден әрекет ететін нәтиже күштері кран-манипулятор, буындардың жергілікті координат жүйесінде көрсетілген:

$$F_i^{\text{гц},\rightarrow} = (R_i^{G3})^T (F_i^{\text{гц}} + F_i^{\text{гц,тр}} + F_i^{\text{гц,тр}}) \cdot \frac{u_i^{G_{\text{гц}}}}{|u_i^{G_{\text{гц}}}|},$$

$$F_i^{\text{гц},\leftarrow} = (R_{i-1}^{G3})^T (-(F_i^{\text{гц}} + F_i^{\text{гц,тр}} + F_i^{\text{гц,тр}})) \cdot \frac{u_i^{G_{\text{гц}}}}{|u_i^{G_{\text{гц}}}|}$$

Жүктемені есептеу әдісі, гидравликалық қозғалтқышты бұру құралдарымен әзірленген, гидравликалық цилиндрлерге қолданылғын жоғарыда көрсетілген әдістермен ұқсас. Ол соңыда ерекшеленеді, өйткені гидротехниканың жағынан кран-манипуляторды орнататын байланыстарда әрекет ететін күш факторларының сапасында бірнеше концентрацияланған моменттер әрекет етеді.

Ауырлық күштерімен және гидравликалық қозғалтқыштармен әзірленген күштерден басқа, берілген сыртқы жүктеменің i -ші буынды қолдану мүмкіндігі бар пайдаланушыға концентрацияланған күштер $F_{i,j}^{3,\text{польз}}$ түрінде, артықшылықтары моменттері $M_{i,j}^{3,\text{польз}}$, жеңілдіктер нүктелерінде моменттік пайдаланушысында $p_{i,j}^{3,\text{польз}}$, күштік пайдаланушысында $p_{i,j}^{3,\text{польз}}$ қолданылады.

Осылайша, қозғалтқыштардың күші мен қолданушы жүктемесі (2.21) формула бойынша анықталады

$$F_i^{3,\text{внеш}} = F_i^{3,g\leftarrow} + F_{i+1}^{\text{гц},\leftarrow} + F_i^{\text{гц},\rightarrow} + \sum_j F_{i,j}^{3,\text{польз}}$$

$$M_i^{3,\text{внеш}} = F_{i+1}^{\text{гц},\leftarrow} \times (c_i^3 - p_{i+1}^{\text{гц},\leftarrow}) + F_i^{\text{гц},\rightarrow} \times (c_i^3 - p_{i+1}^{\text{гц},\rightarrow}) + \sum_j M_{i,j}^{3,\text{польз}} +$$

$$+ \sum_j F_{i,j}^{3,\text{польз}} \times (c_i^3 - p_{i,j}^{3,\text{польз}}).$$

Егер пайдаланушы қоса берген шоғырланған күштер мен моменттер жаһандық координаттар жүйесінде көрсетілсе, онда (2.32) өрнекке қою алдында оларды буынды есептеудің жергілікті жүйесіне түрлендіру қажет:

$$\begin{aligned} F_{i,j}^{3,польз} &= (R_i^{G3})^T F_{i,j}^{G3,польз} \\ M_{i,j}^{3,польз} &= (R_i^{G3})^T M_{i,j}^{G3,польз} \end{aligned}$$

Түйінді шарнирлерде айналу және призмалық қозғалу үйкеліс күшінің әсерімен жүреді. i -ші призмалық қосылыста үйкеліс күшінің шамасы мынадай формула бойынша анықталады:

$$F_i^{ш,трени} = -\alpha_i \dot{q}_i,$$

мұндағы α_i – i -ші топсадағы үйкеліс коэффициенті.

Түйінді топсадағы үйкеліс күшінің әсерінен пайда болатын момент:

$$M_i^{ш,трени} = -\alpha_i \dot{q}_i,$$

Ньютон-Эйлер алгоритмін пайдалана отырып, оларды (2.24) және (2.25) өрнектерімен немесе (2.21) өрнектерімен ауыстыру арқылы динамиканың кері мәселелерін шешу кезінде бу күштерін ескеру қажет. Екінші нұсқа да есептік тұрғыдан оңтайлы болып табылады, өйткені жүктеме жұмысты жергілікті координаталық жүйелерге түрлендіруді талап етеді. Үйкеліс күштерін ескере отырып, призмалық топсаның өрнегінен (2.24) мына форманы аламыз:

$$\tau_i = F_i^{ш,трени} = -F_i^{ш,\leftarrow} \cdot s_i$$

Өрнек (2.25) түйінді топсалары үшін арналған:

$$\tau_i + M_i^{ш,трени} = -M_i^{ш,\leftarrow} \cdot s_i.$$

Осылайша, i -ші буынның сыртқы жүктемесінен туындайтын күш пен моментте гравитация әрекеті, гидравликалық цилиндрлердің күші және тұтынушы белгілеген шоғырланған күш факторлары бар. Олар формула бойынша есептеледі (2.32) және динамиканың кері мәселелерін шешуде (2.21) ескеріледі. Жылдамдығын арттыру үшін түйіндеде пайда болатын күш факторлары Ньютон-Эйлер рекурсивті алгоритмінің (2.24) және (2.25) өрнектерінде ескереді.

2.3.3 Кран-манипуляторлық қондырғы үшін тура есептің шешімін табу

Динамиканың тікелей проблемасын шешу үшін бастапқы деректер

болып табылады: q_i жалпыланған координаталар, $\dot{q}_i$ жалпыланған жылдамдықтар және τ_i жалпылама жүктемелер. Қажетті жалпылама үдеуді $\ddot{q}_i$ табыңыз.

Кран-манипулятордың қозғалыс теңдеуі:

$$\{\tau\} = [H(q)]\{\ddot{q}\} + \{c(q, \dot{q}, f^{\text{внеш}})\},$$

мұнда $\{\tau\}$ - жалпылама күштердің векторы; $[H]$ - шаршы симметриялық матрица компоненттер жалпыланған координаттардың векторына тәуелді кран-манипулятордың инерциясы; $\{\ddot{q}\}$ - жалпылама үдету векторы; $\{C\}$ - сыртқы жүктемеге, жалпыланған координаттарға және жалпыланған жылдамдықтарға байланысты вектор.

Теңдеулер жүйесін шешу (2.33) бізге мәселені анықтауға мүмкіндік бермейтін жалпыланған векторын $\{q\}$ табуға мүмкіндік береді. Теңдеулер саны дәреже санымен бірдей, кран-манипулятор қондырғысының n еркіндігі.

Вектордың компоненттерін есептеу үшін барлық жалпыланған үдету $\ddot{q}_i$ - нөлге дейін теңдеулерін керек. Бұл жағдайда теңдеудің оң жақ бөлігінде (2.33) бірінші термин нөлге айналады, оның нәтижесінде келесі:

$$|\tau| = \{C\}. \quad (2.33)$$

Ньютон - Эйлер әдісімен кері динамикасының бастапқы бастапқы жағдайларының шешімі вектордың $\{\tau\}$ компоненттерін және векторды $\{C\}$ табуға мүмкіндік береді.

Инерция матрицасының элементтерін анықтау үшін $[H]$ біз нөлге тең етіп қабылдаймыз, барлық жалпылама жылдамдықтар $\dot{q}_i$ және сыртқы жүктеме $f^{\text{внеш}}$ түрінде болады. Бұл жағдайда (2.33) теңдеуде векторы жоғалады және ол келесі түрде болады:

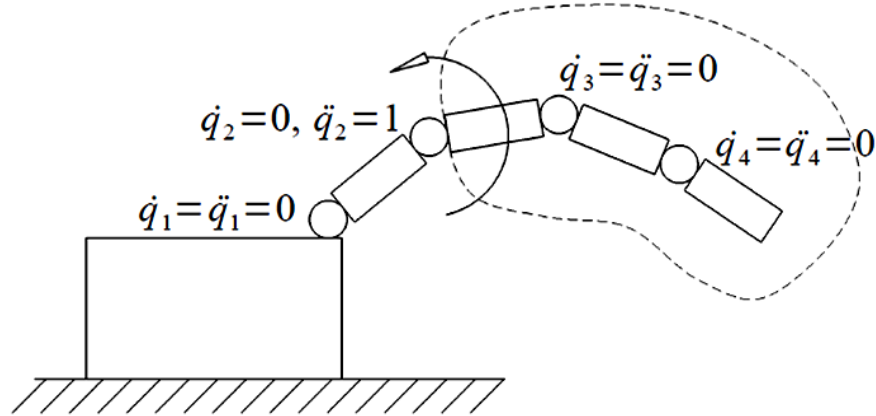
$$|\tau| = [H]\{\ddot{q}\}$$

Егер i -ші матрица бағанын қоспағанда, барлық жалпылама жеделдету нөлге тең болады және i -ші бірлікке тең болады, онда мұндай бастауыш жағдайлар үшін динамиканың кері есептерін шешу вектордың компоненттерін анықтауға мүмкіндік береді, сәйкесінше, матрицаның i -ші бағаны $[H]$. Бұл процедураны орындау $i = 1 \dots n$ үшін n рет, кран-манипулятордың инерция матрицасының барлық элементтері табылды.

Матрицаның i -ші бағанының компоненттерін есептеу кезінде, барлық түйіндердегі жылдамдықтар нөлге тең болғанда және i -ші қоспағанда барлық түйіндердегі жеделдету нөлге тең болғанда, кран-манипулятордың бір бөлігі i -ші топсаның алдында демалады. i -ші біріктіру - біртұтас дене тәрізді қозғалысты қамтамасыз етеді (2.14-сурет).

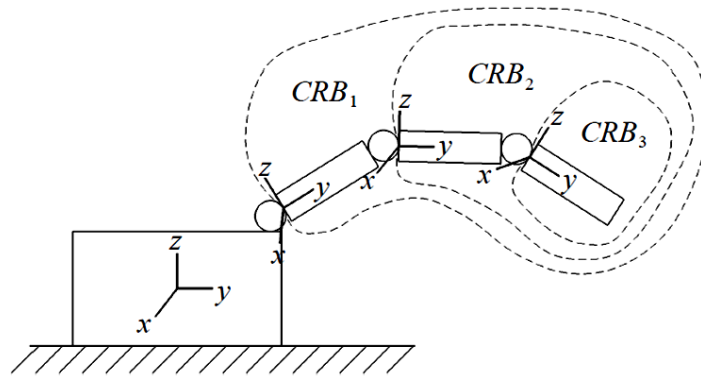
Сонымен қатар, RNEA алгоритмінде толық алға және кері бағытты

орындаудың қажеті жоқ. Оның орнына қосылысының артында орналасқан композициялық қатты заттың инерциалық сипаттамаларын есептеу керек, оған Ньютон-Эйлер тендеуін жазамыз және келесі қосылыстарынан бастап, кері байланыстың бір бөлігін орындаймыз. Бұл идея инерция матрицасының компоненттерін анықтау үшін CRBA алгоритмі негізінде орындалады[244].



2.14 Сурет – КМҚ біртұтас дене ретінде бірнеше байланыстарының қозғалысы

CRBA - i -дан n -ға дейінгі қосылыстарды қамтитын күрделі қатты денені тағайындайық. i -ші композициялық қатты заттың жергілікті координат жүйесінің шығу тегі i -ші буынның координат жүйесінің шығуымен үйлеседі (2.15-сурет).



2.15 Сурет – Композициялық қатты күйдегі манипулятор: төмендегі әрқайсысы алдыңғы бөлігі болып табылады

Соңғы композициялық қатты денелердің CRB_n инерциалды сипаттамалары соңғы байланыстың инерциялық сипаттамаларына сәйкес келеді:

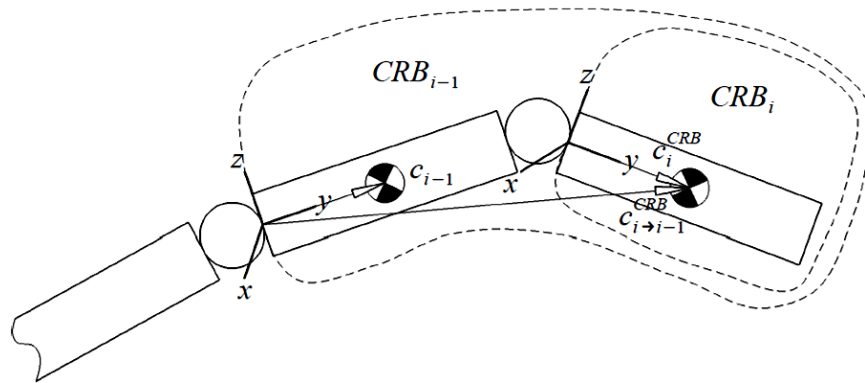
$$m_n^{CRB} = m_n^3, c_n^{CRB} = c_n^3, J_n^{CRB} = J_n^3. \quad (2.34)$$

Әрбір бұрынғы композициялық CRB_{i-1} қатты затының инерциалды

сипаттамаларын анықтау үшін, онда қамтылған композициялық CRB_i қатты затының инерциялық параметрлерінің табылған мәндерін пайдалану ұсынылады:

$$m_{i-1}^{CRB} = m_{i-1}^3 + m_i^{CRB}. \quad (2.35)$$

Корпустың қатты $i-1$ корпустың ауырлық ортасының c_{i-1}^{CRB} орналасуын анықтау үшін жергілікті координат жүйесінде композиттік кристалдардың ауырлық орталығының орналасуын $c_{i \rightarrow i-1}^{CRB}$ алдын-ала анықтау қажет (2.16-сурет).



2.16 Сурет – Алдыңғы біреудің жергілікті координат жүйесінде келесі композициялық қатты дененің ауырлық орталығының орналасуы

Егер i -ші қосылыс түйінді болса, онда

$$C_{i \rightarrow i-1}^{CRB} = p_i^{\text{ш}} + (R_i^{\text{ш}} R_{si(q)}) c_i^{CRB}. \quad (3.36)$$

Егер i -ші қосылыс призмалық болса, онда

$$C_{i \rightarrow i-1}^{CRB} = p_i^{\text{ш}} + (R_i^{\text{ш}})(S_i^{\text{ш}} \cdot q_i + c_i^{CRB}). \quad (3.37)$$

Композициялық қатты $i - 1$ дененің ауырлық орталығы

$$C_{i \rightarrow i-1}^{CRB} = \frac{c_{i-1}^3 \cdot m_{i-1}^3 + c_{i \rightarrow i-1}^{CRB} \cdot m_i^{CRB}}{m_{i-1}^{CRB}}. \quad (3.38)$$

i -ші құрамдас қатты дененің инерция тензоры үшін бұрылу және C_{i-1}^{CRB} ауырлық орталығына ауыстыру керек. Вектор CRB_i – ауырлық ортасынан CRB_{i-1} келесі ауырлық ортасына бағыталған:

$$h_i = C_{i-1}^{CRB} - c_{i \rightarrow i-1}^{CRB}. \quad (3.39)$$

Инерция тензорының CRB_{i-1} компоненттерін есептеу үшін формулалар,

i -ші қосылыс призмалық болған жағдайда

$$J_{i-1}^{CRB} = [R_i^{\text{III}} R_i^{\text{III}}(q_i)] J_i^{CRB} [R_i^{\text{III}} R_{si}^{\text{III}}(q_i)^T] + m_i^{CRB} \begin{bmatrix} h_{i,y}^2 + h_{i,z}^2 & -h_{i,x}h_{i,y} & -h_{i,x}h_{i,z} \\ -h_{i,y}h_{i,x} & -h_{i,x}^2 + h_{i,z}^2 & -h_{i,y}h_{i,z} \\ -h_{i,z}h_{i,x} & -h_{i,z}h_{i,y} & h_{i,x}^2 + h_{i,y}^2 \end{bmatrix}, \quad (2.40)$$

$$J_{i-1}^{CRB} = [R_i^{\text{III}}] J_i^{CRB} [R_i^{\text{III}}] + m_i^{CRB} \begin{bmatrix} h_{i,y}^2 + h_{i,z}^2 & -h_{i,x}h_{i,y} & -h_{i,x}h_{i,z} \\ -h_{i,y}h_{i,x} & -h_{i,x}^2 + h_{i,z}^2 & -h_{i,y}h_{i,z} \\ -h_{i,z}h_{i,x} & -h_{i,z}h_{i,y} & h_{i,x}^2 + h_{i,y}^2 \end{bmatrix}, \quad (2.41)$$

CRBA алгоритміндегі (2.34) - (2.41) формулалары бойынша барлық құраешы қатты денелердің инерциялық сипаттамалары соңғы CRB_n бастап және бірінші CRB₁-ге аяқталатын кезекпен анықталады.

i -ші топсаның негізі демалған кезде CRBA алгоритмінің i -топсасында, $\dot{q}_i = 0$; $\ddot{q}_i = 0$ композициялық қатты заттың ауырлық орталығында жылдамдық пен үдеу CRB_i (2.19), (2.20), (2.16) формулалар бойынша есептеледі. Ньютон-Эйлер теңдеуінен (2.21) i -ші топсасы арқылы берілетін жүктеме анықталады. Кран-манипулятордың негізіне қарай i -ші кезеңнен бастап жеңілдетілген (сыртқы жүктемені және бекітілген буындар үшін инерция күштерін ескерместен) RNEA алгоритмінің кері жұмыс істеу реті орындалады, бұл нәтиже $\tau_i \dots \tau_1$ мәнін қайтарады.

CRBA алгоритмінің барлық итерациясы нәтижесінде кран-манипулятордың инерция матрицасының жоғарғы үшбұрышты элементтерінің мәндері есептеледі. Төменгі үшбұрышты элементтердің мәндері матрицаның симметриялық қасиеттері негізінде анықталады [7].

Осылайша, тікелей динамика мәселесін шешу үшін CRBA алгоритмін қолдану арқылы манипулятордың инерция матрицасының компоненттерін есептеу керек, RNEA әдісін пайдаланып векторды табамыз, белгісіз жалпылама жеделдету векторына қатысты теңдеуді шешеміз (2.33).

2.4 Гидравликалық кран-манипулятор жабдығы буынларының кернеулі-бұзылған жағдайы мен ішкі күшті факторларды анықтау әдістемесі

Кран-манипулятор жебе құрылымының негізін қалыптастыратын буындар, қағида бойынша, профилі тұйықталған жұқа қабырғалы өзектер болып табылады. Жұқа қабырғалы өзектер теориясы қималарда әрекет ететін ішкі күшті факторларды анықтауға мүмкіндік береді және олардың негізінде қиманың кез-келген нүктесінде кернеуді есептеуге мүмкіндік ұсынады. Кран-манипулятор қарқыны тапсырмасын шешу нәтижесінде алынған шешімдер жалпыланған үдеулер мен жалпыланған күштер аталған тапсырма үшін кіріс мәліметтері ретінде қолданылады.

Кез келген пішінді жұқа қабырғалы профилде кернеулерді анықтау

үшін 2.4.3-2.4.5 тарауларында сипаттамасы көрсетілген әмбебап әдістеме ұсынылған. Кран-манипулятордың буынсы жұқа қабырғалы өзек арқылы ұсыну мүмкін емес болған жағдайда, 2.4.6. тарауда көрсетілген баламалы әдістеме қолданылады.

2.4.1 Кран-манипулятор жабдығының метал құрылымының беріктігін талдау кезінде буынның математикалық үлгісі

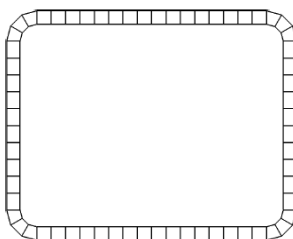
Манипулятордың әрбір буынсы қатты денелердің кейбір 3D-үлгілерінен басқа, қимасында кернеу анықталатын бір өзекті қамтиды. Өзек бір немесе бірнеше учаскеден тұрады. Өзектің бір учаскесі бойы оның көлдене қима өлшемдері тізбекті заң бойынша өзгеріске ұшырайды (2.17-сурет).



2.17 Сурет – Екі учаскеден тұратын өзек пен тесіктің екі 3D-үлгісінен тұратын буын

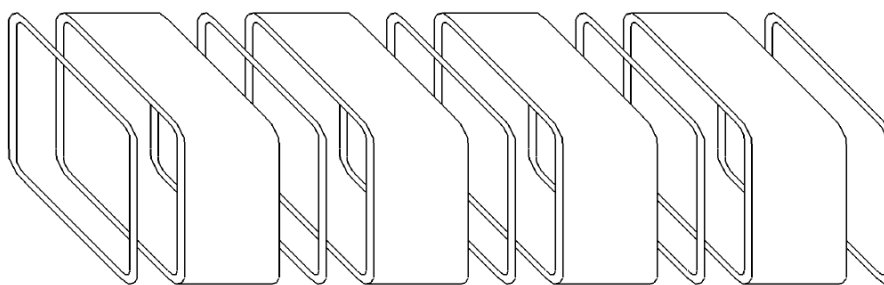
Өзектің әрбір учаскесімен жергілікті координаттар жүйесі байланысты болады, оның жағдайы буынны есептеу жүйесінде $R^{уч}$ бұрылыс матрицасы мен $p^{уч.см}$ ығысу векторына тәуелді болады.

Бір тұйықталған профилден тұратын өзектің көлденең қимасы төртбұрыштар жиынтығы арқылы сипатталады. Әрбір төртбұрыштың екі сыртқы бөлігі басқа төртбұрыштармен шектес екі бөлігі болады (сурет 2.18).



2.18-сурет – Қима геометриясының көрінісі

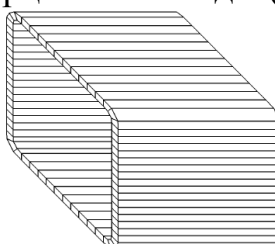
Қима геометриясын құру автоматты жүзеге асырылады - бастапқы мәліметтер ретінде қима түрі мен оның өлшемдері көрсетіледі. Өзек учаскесінің геометриясын құру үшін төмендегілер көрсетілу қажет: оның ұзындығы, көлденең қима түрі, учаске басы мен соңында қима өлшемдері, учаске ұзындығы бойы көлденең қималар саны. Өзек учаскесі көлденең қималар арқылы элементтерге бөлінеді (2.19-сурет).



2.19 Сурет - Көлденең қималар арқылы элементтерге бөлінген өзек

Есептеу кезінде әрбір көлденең қимада кернеулер мен кернеуде әрекет ететін ішкі күшті факторлардың мәндері анықталады, ал көлденең қималар арасында аталған мәліметтер интерполяцияланады.

Өзек элементінің үшөлшемді үлгісі көршілес көлденең қималардың тиісті шыңдарын біріктіру арқылы алынады (2.20-сурет).



2.20 Сурет - Көршілес көлденең қималар геометриясы негізінде автоматты қалыптастырылған өзек элементінің 3D- үлгісі

2.2.2. тарауда көрсетілген алгоритмдер арқылы материал тығыздығының мәндері мен геометриясы негізінде өзек элементтерінің инерция сипаттамалары, сонымен қатар құрамдас дене ретінде тұтас өзектің инерция көрсеткіштері есептеледі.

2.4.2 Кран-манипулятор жабдығы буынларында ішкі күштерді анықтау

n көлденең қималар арқылы $n-1$ элементтерге бөлінген өзек учаскесін қарастырайық (2.21-сурет).

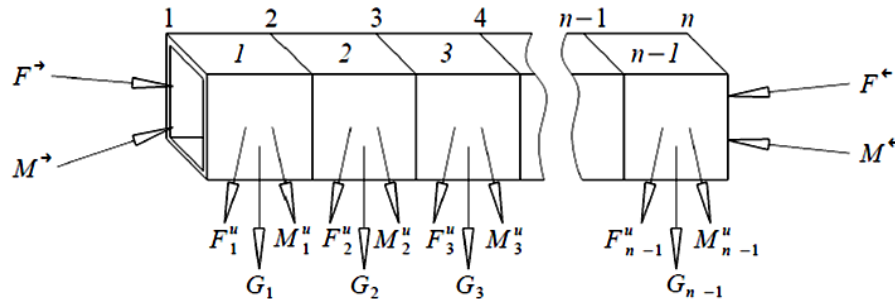
Өзектің әрбір элементіне инерциялық күштер F'' мен моменттер M'' , сонымен қоса ауырлық күші G әсер етеді. Күшті факторлар деректерінен басқа, өзек элементтеріне шоғырланған күштер мен пайдаланылатын жүктемелер моменттері әсер етеді. Сонымен қатар гидроцилиндрлер мен топсалардан берілетін күштер әсер етеді. Өзек учаскесінің басы мен аяғына тепе-тең әрекет ететін күш пен момент есептелетін жүктемелер әсер етеді.

Өзек қималарында ішкі күштерді есептеу әдістемесі RNEA алгоритміндегі кері жүріске ұқсас болып келеді. Ең алдымен соңғы қимадағы

ішкі күшті факторлар анықталады - олар өзек учаскесі ұшында әрекет ететін жүктеме сәйкес келеді:

$$F^{сеч}_n = F^{\leftarrow},$$

$$M^{сеч}_n = M^{\leftarrow}.$$



2.21 Сурет - Өзек қималарында ішкі күшті факторларды анықтауға арналған есептік сызба

Әрбір алдыңғы қимада олар өзек элементінің ауырлық орталығына қатысты жазылған Ньютон-Эйлер теңдеуіне сәйкес анықталады:

$$-F_{i-1}^{сеч} + F_i^{сеч} + F_{i-1}^{эл.внеш} = m_{i-1}^{эл} a_{i-1}^{эл},$$

$$-M_{i-1}^{сеч} + M_i^{сеч} + M_{i-1}^{эл.внеш} = J_{i-1}^{эл} \varepsilon_{i-1}^{эл} + \omega_{i-1}^{эл} \times (J_{i-1}^{эл} \omega_{i-1}^{эл}),$$

мұндағы $F_{i-1}^{сеч}$, $M_{i-1}^{сеч}$, $F_i^{сеч}$, $M_i^{сеч}$ - элементтің ауырлық орталығына келтірілген жақын орналасқан қимадағы күштік факторлар, $\omega_{эл}$, $a_{эл}$, $\varepsilon_{эл}$ - бұрыштық жылдамдық, элементтің ауырлық орталығындағы бұрыштық және тізбекті үдету; $m_{эл}$, $J_{эл}$ - инерция салмағы мен моменті; $F_{эл,внеш}$, $M_{эл,внеш}$ - элементтің ауырлық орталығына келтірілген элементке әсер ететін тепе-тең әрекет ететін күш мен сыртқы жүктеме моменті.

Өзек элементіне ауырлық күшінің әрекеті сыртқы жүктеме векторында ескеріледі $F_{эл,внеш}$. Ауырлық күшінің векторы формула бойынша анықталады:

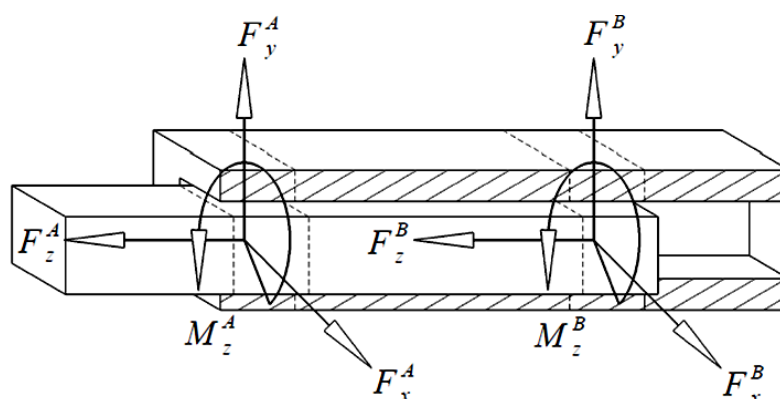
$$G = (R^{G_3} R^{уч.ст})^T (m^{эл} \vec{g}). \quad (2.42)$$

Жаһандық координаттар жүйесінде буынның бұрылыс матрицасының құрамдас бөлшектері белгісіз болған жағдайда R^{G_3} , олар 2.2.3.т. сипатталған алгоритм бойынша анықталады.

Буынны есептеу басында үдеу мен жылдамдық белгісіз болған жағдайда, олар алгоритмнің тікелей рекурсиясы RNEA арқылы есептеледі. Олардың негізінде (2.16) формула бойынша әрбір элементтің ауырлық орталығындағы үдеу мен жылдамдық анықталады.

Өз кезегінде RNEA алгоритмінің кері жүрісі топсалар бөлігінен өзекке әрекет ететін күштерді анықтауға мүмкіндік береді. Мұндай жағдайда сыртқы және ішкі бөлімнің қарым-қатынасы жүзеге асырылатын салалар арасындағы телескопты жебенің призмалық топсасындағы реакциясын тарату керек.

Берілген тапсырма статикалық шешілмейтін болып табылады. Статикалық белгісіздікті шешу мақсатында төмендегі жайт қабылданады:
 $F^A = F^B$, $M^A = M^B$.



2.22 Сурет – Телескопты жебенің ішкі және сыртқы бөлігінің қарым-қатынас салаларындағы күштер

Нәтижесінде белгісіздер саны алтыға дейін қысқарады және ішкі және сыртқы арқалықтың қарым-қатынас саласындағы реакция статиканың тепе-теңдік теңдеулері арқылы анықталады.



а - топсаға келтірілген; б - шток пен гидроцилиндрге әсер ететін

2.23 Сурет – Гидроцилиндр қалыптастыратын күш:

Динамиканың кері немесе кешенді тапсырмасын шешу нәтижесінде алынған мүшелерінде гидрожетек қалыптастыратын жалпыланған күштерді шток пен гидроцилиндр қаңқасына әсер ететін нақты күштерге түрлендіру керек (2.23-сурет).

Топса мен гидроцилиндрден күштер тепе-тең әрекет ететін күштер мен моменттер векторы $F^{эл, \text{внеш}}$ және $M^{эл, \text{внеш}}$ өзектің тиісті элементтері

үшін сыртқы жүктемемен қосылады немесе өзектің бір ұшына әсер ететін күш құрамына енеді.

2.4.3 Кран-манипулятор жабдығы буынларындағы қалыпты кернеуді анықтау

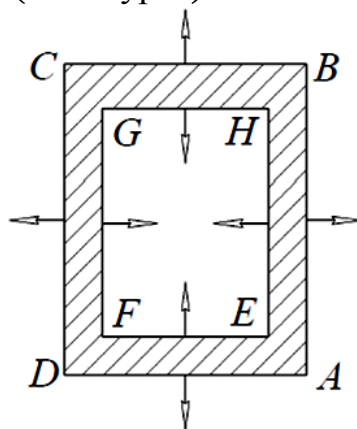
x, y координаттармен өзектің қиылысу нүктесіндегі қалыпты кернеулер қиманың негізгі орталық өстерінің координаттар жүйесінде жазылған формула бойынша анықталады [3]:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{J_x} y - \frac{M_y}{J_y} x, \quad (2.43)$$

мұндағы A – қима ауданы; J_x, J_y – қиманың инерция моменті; N, M_x, M_y – көлденең күш пен иілім моменттер.

Формуласы (2.4.5) мен әрі қарай КМК металл құрылымының өзекті элементтерінің кернеулі жағдайын есептеу барысында тығыз бұрауда туындайтын қосымша кернеулерді ескерілмейді, себебі жұқа қабырғалы тұйықталған профилдің қарастырылатын жағдайында олар шағын болады және ашық жұқа қабырғалы профилмен салыстырғанда көрініс табатын жергілікті сипатқа ие, себебі олардың ҚҚС қосатын үлесі зор болып келеді [4].

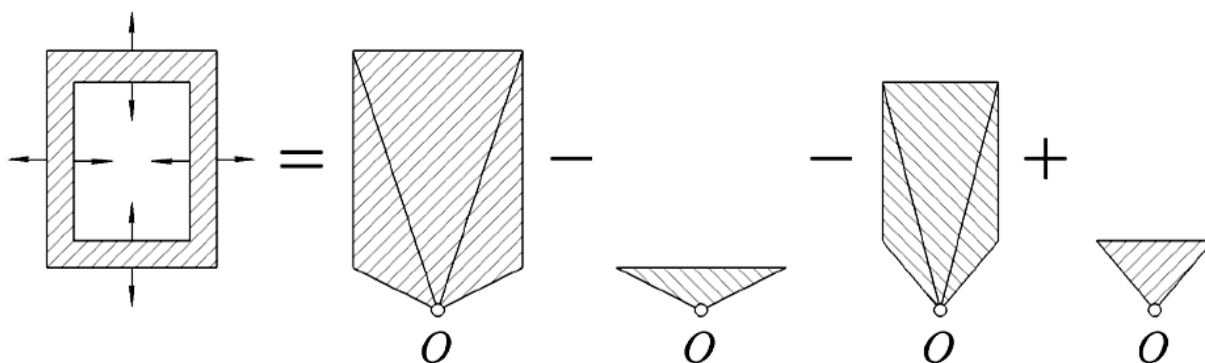
Қима ауданы, инерция моменті мен ауырлық орталығы екіөлшемді жағдай үшін ШЭллэй алгоритмі арқылы қима геометриясы негізінде анықталады [15]. Бастапқы мәліметтер ретінде бекітілген сыртқы нормалымен кесінділер жиынтығы арқылы ұсынылған қиманың сыртқы және ішкі контуры қолданылады (2.24-сурет).



2.24 Сурет – Кесінділер жиынтығы бекітетін қима

Қима ауданы кесінділер жиынтығымен шектелген, тегіс пішін ауданы ретінде анықталады: контур кесіндісі мен ерікті алынған O нүктесі арқылы қалыптасқан үшбұрыштардың жалпы аудандарының соммасы. Қима контурының i -ші бөлімінің сыртқы нормалы O нүктесіне қарай бағытталған

жағдайда, i -ші үшбұрыштың ауданы теріс мәнге ие болады (2.25-сурет).



2.25 Сурет – Бекітілген сыртқы нормалмен кесінділер жиынтығымен шектелген тегіс пішін ауданын анықтау

Кез келген үшбұрыш шыңдарының координаттары негізінде үшбұрыш ауданы формула бойынша анықталады.

$$A = \frac{1}{2} |(v_1 - v_0) \times (v_2 - v_0)|. \quad (2.44)$$

Үшбұрыштың ауырлық орталығының жағдайы

$$C = \frac{1}{3} (v_0 + v_1 + v_2). \quad (2.45)$$

О нүктесінің жағдайы ерікті таңдалуына байланысты, оны есептеу басына орналастыру оңтайлы болып табылады. Бұл жағдайда (2.43) және (2.44) формулалары төмендегідей түрленеді

$$A_i = \frac{1}{2} |v_1 \times v_2|, c_i = \frac{1}{3} (v_1 + v_2).$$

Ішкі контур бағыты сағат тіліне қарама-қарсы тәртіпте орналасқан, ал сыртқы контур бағыты сағат тілі бойынша орналасқан жағдайда (2.24-сурет), i -ші үшбұрыш үшін белгі сыртқы нормал негізінде емес, векторлы түрлендіру негізінде анықталады:

$$A_i^{\pm} = \frac{1}{2} v_1 \times v_2.$$

Қиманың ауырлық ауданы мен орталығы

$$A = \sum A_i^{\pm}, c = \frac{\sum c_i \cdot A_i^{\pm}}{A}.$$

Тегіс пішіннің инерция моменттерін анықтауға арналған формулалар төмендегідей болып келеді:

$$J_x = \iint_A y^2 dx dy, J_y = \iint_A x^2 dx dy, J_{xy} = J_{yx} = \iint_A x \cdot y dx dy. \quad (2.46)$$

Үшбұрыш шыңдарының бірі есептеу басында орналасқан жағдайда, үшбұрыштың инерция моменті төмендегі формула бойынша анықталады [18]:

$$J_i = \frac{A_i^{\pm}}{12} (f(v_{i,1}) + f(v_{i,2}) + f(v_{i,1} + v_{i,2})),$$

мұндағы f – (2.45) формуласындағы инерция моментіне сәйкес келетін интеграл асты функциясы.

Ауырлық орталығына қатысты есептелген қиманың инерция моменті:

$$J_x^c = J_x - A c_y^2, J_y^c = J_y - A c_x^2, J_{xy}^c = J_{xy} - A c_x c_y.$$

Қиманың ауырлық орталығына келтірілген ішкі күштік факторлар:

$$F^c = F^0, M^c = M^0 + F^0 \times c.$$

Қиманың кез келген нүктесіндегі қалыпты кернеулер формула бойынша негізгі өстерді анықтамай есептеледі:

$$\sigma = \frac{N^c}{A} + \frac{M_x^c J_y^c + M_y^c J_{xy}^c}{J_x^c J_y^c - J_{xy}^c{}^2} y - \frac{M_y^c J_x^c + M_x^c J_{xy}^c}{J_x^c J_y^c - J_{xy}^c{}^2} x.$$

Көптеген жағдайда кран-манипулятор жебесінің қимасының симметриясы бір өсіті болады. Мұндай жағдайда негізгі өстердің оған сәйкес, ал екіншісі ортогонал болады. Яғни қиманың негізгі өстерінің жағдайы қалыптасқан тәртіпте анықталады және қалыпты кернеуді есептеу үшін ықшамдатылған формуланы қолданамыз (2.42).

2.4.4 Кран-манипулятор жабдығы буындарының жанама кернеулерін анықтау

Жанама кернеуді есептеу кезінде барлық есептеу қиманың негізгі орталық координаттар жүйесінде жүзеге асырылады. Негізгі өстердің жағдайы алдын-ала анықталмаса, оны теңдеу бойынша анықтаймыз:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2J_{xy}^c}{J_y^c - J_x^c},$$

мұндағы θ – қиманың координаттар жүйесіне қатысты негізгі өстердің бұрылыс бұрышы.

Негізгі орталық координаттар жүйесіндегі қиманың инерция

моменттері

$$J_x = \frac{J_x^c + J_y^c}{2} + \frac{J_x^c - J_y^c}{2} \cos 2\theta - J_{xy}^c \sin 2\theta, J_y = J_x^c + J_y^c - J_x.$$

Негізгі орталық координаттар жүйесін есептеу басында есептелген күшті факторлар:

$$F = [R_z(\theta)]^T F^c, \quad M = [R_z(\theta)]^T M^c,$$

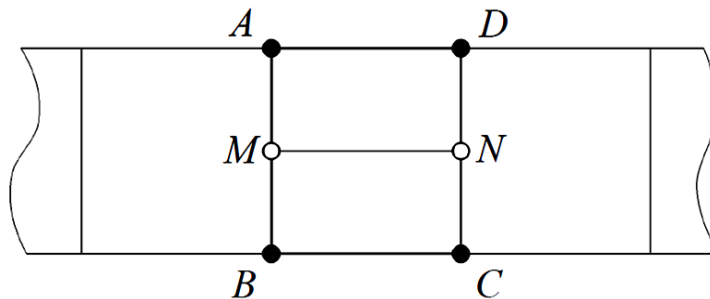
мұндағы $[R_z(\theta)]$ – z өзек өсіне қатысты θ бұрышқа бұрылыс матрицасы.

Жұқа қабырғалы тұйықталған профилдерді есептеу кезінде жанама кернеулер контурдың орталық тізбегіне жанама бағытталады және қабырға қалыңдығы бойынша өзгермейді деген тұжырым негізге алынады. Мұндай жағдайда «жанама кернеулер ағыны» түсінігі қолданылады. Оның мәні формула бойынша анықталады:

$$q = \tau \cdot t$$

мұндағы τ – жанама кернеулер; t – профиль қабырғасының қалыңдығы.

Өзектің көлденең қимасы бөлінген $ABCD$ төртбұрыштарының бірін қарастырайық (2.26-сурет). Төрт бұрышты тор AB және CD көршілес төртбұрыштардың шекаралас бөліктері орталық тізбекке әрқашан перпендикуляр орналасатындай автоматты түрде құрылады. Сондықтан AB және CD бөліктерінің орталықтарын жалғайтын MN бөлігі қима контурының орталық тізбегінде орналасады, ал M және N нүктелеріндегі қима қалыңдығы AB және CD бөліктерінің ұзындығына сәйкес келеді:



2.26 Сурет – Өзек қимасын қалыптастыратын төртбұрыштардың бірі

$$v_M = \frac{v_A + v_B}{2}, \quad v_N = \frac{v_C + v_D}{2}, \quad (2.47)$$

$$t_M = |AB| = |v_A - v_B|, \quad t_N = |CD| = |v_C - v_D|,$$

мұндағы $v_A, v_B, v_C, v_D, v_M, v_N$ – A, B, C, D, M, N нүктелерінің координаттары.

Тұйықталған профилдің жұқа қабырғалы өзегін бұраған жағдайда жанама кернеулер орташа тізбектің ұзындығы бойынша шамасы өзгермейтін және төмендегі теңдеумен анықталатын ағын қалыптастырады:

$$q^{M_z} = \frac{M_z}{2 A_m}$$

мұндағы A_m – контурдың орташа тізбегімен шектелген пішін ауданы; M_z – қиманы бұрау орталығындағы айналым моменті.

(2.46) формуласы бойынша контурдың орташа тізбегінің жоғарғы координаттарын есептеу арқылы, A_m ауданының мәні есептеу басында орналасқан O нүктесі мен орталық тізбек кесінділері қалыптастырған үшбұрыштардың жалпы аудан соммасы ретінде анықталады.

Жанама күш әсерінен жанама кернеу ағыны жұқа қабырғалы тұйықталмаған қимаға арналған Журавский формуласы бойынша анықталады [20]:

$$q Q_x = \frac{Q_x S_y^{omc}}{J_y}, \quad q Q_y = \frac{Q_y S_x^{omc}}{J_x},$$

мұндағы Q_x, Q_y – көлденең күштер; S_y^{omc}, S_x^{omc} – қиманың кесілген бөлігі инерциясының статикалық моменттері.

Жанама кернеулер ағынын есептеу үшін бастапқы нүктенің жанама кернеулер нөлге тең болатын ашық профилдің бос ұшы болып табылады.

Жалпы алғанда тұйықталған профиль үшін есептеу мәні белгісіз, сондықтан есептеу мақсатында төмендегі алгоритм қолданылады [28]:

1. Кез келген нүктеде қиманы «кесу» мен алынған ашық профилде Журавский формуласы бойынша жанама кернеу ағынын анықтау q_o .

2. Алынған ашық профилдің кесінді ұштары q_o және q_c біріккен әрекет еткен жағдайда, жанама кернеу ағынының тұрақты шамасын анықтау q_c .

3. Тұйықталған контурда жанама кернеудің нақты ағынын q_o және q_c ағындар соммасы ретінде анықтау.

Қима бөлінген барлық төртбұрыштарды сағат тілі бойынша 1-ден бастап n дейін нөмірлеу. Бірінші төртбұрыштың АВ тізбегі бойынша «қиманы» орындау арқылы контурды ашық етеміз.

Әрбір төртбұрыш үшін инерцияның мүмкін болатын статикалық моменттері анықтау:

$$S_{i,x}^{ABCD} = c_{i,y}^{ABCD} \cdot A_i^{ABCD}, \quad S_{i,y}^{ABCD} = c_{i,x}^{ABCD} \cdot A_i^{ABCD},$$

мұндағы A_i^{ABCD}, c_i^{ABCD} – i -ші төртбұрыштың ауданы мен ауырлық орталығының жағдайы.

Төртбұрыштың геометриялық сипаттамалары төмендегі тәуелділіктер

бойынша оған енетін үшбұрыштардың геометриялық сипаттамалары негізінде анықталады:

$$A_i^{ABCD} = A_i^{ABC} + A_i^{CDA}, c_i^{ABCD} = \frac{A_i^{ABC} \cdot c_i^{ABC} + A_i^{CDA} \cdot c_i^{CDA}}{A_i^{ABCD}}.$$

i -ші төртбұрыштың қимадан бастап АВ және CD тізбектеріне дейінгі қимасы бөлігінің инерциясының статикалық моменті төмендегі формулалар бойынша анықталады:

$$S_{i,x}^{omc,AB} = \sum_{j=1}^{i-1} S_{i,x}^{ABCD}, S_{i,x}^{omc,CD} = \sum_{j=1}^i S_{i,x}^{ABCD}, \quad (2.48)$$

$$S_{i,y}^{omc,AB} = \sum_{j=1}^{i-1} S_{i,y}^{ABCD}, S_{i,y}^{ABCD} = \sum_{j=1}^i S_{i,y}^{ABCD}.$$

(2.48) формула бойынша инерцияның статикалық момент мәндерін есептеу арқылы, дара көлденең күші әрекет еткен жағдайда төртбұрыш шекарасындағы жанама кернеулер ағыны анықталады:

$$q^{Q_x=1} = \frac{S_y^{omc}}{J_y}, q^{Q_y=1} = \frac{S_x^{omc}}{J_x}$$

Профилдің тұйықтық шартын орындау үшін, «қима» шекарасының салыстырмалы орын ауыстыруы нөлге тең болу керек. Мұндай жағдайда қимада ашық контурдың жанама кернеу ағынынан басқа q_0 төмендегі шартқа сәйкес анықталатын шамасы бойынша белгісіз және тұрақты ағын q_c әрекет етеді:

$$0 = \int \frac{q_0 + q_c}{Gt} ds,$$

мұндағы G – ығысу кезінде материалдың серпінділік модулі; ds – контурдың орташа тізбегінің элементі.

Ығысу кезінде материалдың серпінділік модулі тұрақты шама болған жағдайда, белгісіз q_c шама үшін теңдеу төмендегідей болады:

$$q_c = - \frac{\int \frac{q_0}{t} ds}{\int \frac{1}{t} ds}. \quad (2.49)$$

Профиль бөлінген төртбұрыштардың шағын өлшемін ескере отырып, олардың әрқайсысының шегінде тізбекті тәуелділіктермен интеграл асты функциялар тәртібін қолдануға болады. Нәтижесінде (2.49) формуласы

төмендегідей болады:

$$q_c = - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left(\frac{q_{O,i}^{AB}}{t_i^M} + \frac{q_{O,i}^{CD}}{t_i^N} \right) l_i^{MN}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left(\frac{1}{t_i^M} + \frac{1}{t_i^N} \right) l_i^{MN}}, \quad (2.50)$$

мұндағы l_{MN} – i -ші төртбұрыштың MN кесінді ұзындығы.

(2.50) формуласы бойынша дара көлденең күші әрекет еткен жағдайда, жанама кернеулер ағынын құрайтын $q^{Q_x=1}$, $q^{Q_y=1}$ тұрақты шамалар анықталады. Дара көлденең күші әрекет еткен жағдайда тұйықталған контурда жанама кернеудің нақты ағыны төмендегідей:

$$q^{Q_x=1} = q_0^{Q_x=1} + q_c^{Q_x=1}, \quad q^{Q_y=1} = q_0^{Q_y=1} + q_c^{Q_y=1}.$$

Жанама кернеу ағын өлшемі мен көлденең күш тізбекті тәуелділікпен бір-бірімен байланысты болады:

$$q^{Q_x} = Q_x \cdot q^{Q_x=1}, \quad q^{Q_y} = Q_y \cdot q^{Q_y=1}.$$

Профилдің P кез келген нүктесіндегі жанама кернеу төмендегі формула бойынша анықталады:

$$\tau_P = \frac{q_P^{Q_x} + q_P^{Q_y} + q_P^{M_z}}{t_P}. \quad (2.51)$$

Жанама кернеуді есептеу барысында, күшті факторлар қиманың иілім орталығына келтірілу қажет. Жұқа қабырғалы өзек көлденең күшпен жүктелген жағдайда, оның әрекет ету тізбегі қиманың ауырлық орталығынан өтеді, жалпы алғанда жанама кернеу ағыны айналым моментін қалыптастырады. Иілім орталығының орналасуына байланысты алгоритм негізі [23] жанама кернеулер ағынының салдарлы моментіне тең болатын айналым моментін қалыптастыратын көлденең күш әрекет ететіндей иінді анықтау болып табылады.

Бір төртбұрыш шегінде жанама кернеу ағынының салдарлы күші формула бойынша анықталады:

$$F_i^{ABCD} = \int q \, ds.$$

Төртбұрыш шегінде тізбекті тәуелділік арқылы интеграл асты функцияны түрлендіру арқылы, аламыз:

$$F_i^{ABCD} = \frac{1}{2} (q_i^{AB} + q_i^{CD}) l_i^{MN}.$$

Контурдың орташа тізбегіне қатысты бағытталған тепе-тең әрекет

ететін күш:

$$\vec{F}_i^{ABCD} = F_i^{ABCD} \frac{\overrightarrow{MN}_i}{l_{MN}^i}.$$

Тепе-тең әрекет ететін күштің жанасу нүктесінің координаттары (шамамен):

$$\vec{r}_i^{ABCD} = \frac{\overrightarrow{v_{Ai}} \cdot q_i^{AB} + \overrightarrow{v_{Bi}} \cdot q_i^{AB} + \overrightarrow{v_{Ci}} q_i^{CD} + \overrightarrow{v_{Di}} q_i^{CD}}{2q_i^{AB} + 2q_i^{CD}}.$$

Салдарлы айналым моменті

$$T = \sum_{i=1}^n \vec{r}_i^{ABCD} \times \vec{F}_i^{ABCD}.$$

Иілім орталығының жағдайы

$$s_x = \frac{T_z^{Q_y}}{Q_y}, \quad s_y = -\frac{T_z^{Q_x}}{Q_x}.$$

Иілім орталығының жағдайы сыртқы жүктемеге байланысты емес және қима геометриясы арқылы анықталады, оны дара көлденең күштер әрекет еткен жағдайда бір рет анықтау оңтайлы болып табылады:

$$S_x = T_z^{Q_y=1}, \quad S_y = -T_z^{Q_x=1}.$$

Қорытындылай келе, жанама кернеулерді анықтауға қатысты алгоритм төмендегі операциялардан тұрады:

- Қиманың негізгі орталық координаттар жүйесіне ауысу;
- (2.46), (2.47) формулалары бойынша қима қабырғасының қалыңдығы мен орташа тізбек кесінділерінің, басты координаттарын анықтау;
- Орташа тізбекпен шектелген пішін ауданын анықтау;
- Дара көлденең күштер әрекет еткен жағдайда жанама кернеулер ағынын анықтау;
- Иілім орталығының жағдайын анықтау;
- Қимада әрекет ететін күшті факторларды иілім орталығына келтіру және (2.51) формуласы бойынша төртбұрыштар шекарасында жанама кернеулер шамасын анықтау.

Жоғарыда көрсетілген алгоритм қима болып табылатын төртбұрышты тор қалыңдығын өзгерту есебінен, сонымен қатар төртбұрыштар

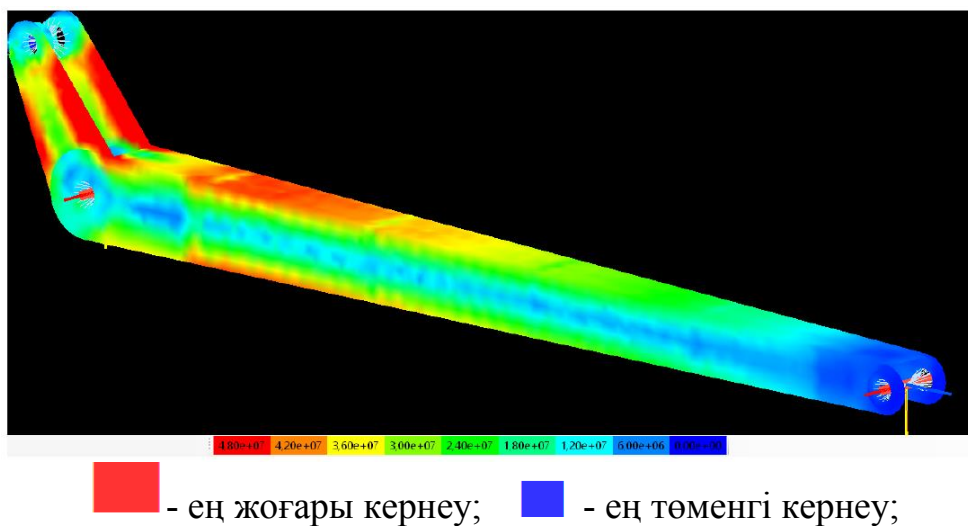
шекарасында жанама кернеулер ағыны шамасының интерполяциясы үшін жоғарғы немесе төменгі тәртіптегі полиномдарын пайдалану есебінен жанама кернеулерді есептеу дәлдігі мен жылдамдығы арасындағы тепе-теңдікті реттеуге мүмкіндік береді.

2.4.5 Кран-манипулятор жабдығының метал құрылым буынларында кернеулерді тарату өрісін қалыптастыру

Қалыпты және жанама кернеулер 2.4.3. және 2.4.4. тарауларда крсетілген алгоритмдер бойынша қиманы қалыптастыратын төртбұрышты тор түйіндерінде анықталады. Олардың негізінде беріктік теориясының бірі бойынша балама кернеулер анықталады. Беріктіктің үшінші (ең жоғары жанама кернеу) және төртінші (пішін өзгертетін ең жоғары шартты әлеуетті энергия теориясы) теориясы бойынша балама кернеулерді анықтауға арналған тәуелділіктер төмендегідей болып келеді:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{III}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}.$$

Өзек қимасында кернеулерді тарататын үздіксіз өрісін алу үшін, кернеу мәндері қиманы қалыптастыратын барлық төртбұрыштар шекарасында шоғырланады. Сонымен қатар, кернеу мәндері өзек ұзындығы бойынша кернеулерді үздіксіз тарату өрісін қалыптастыру арқылы, көршілес кималардың тиісті түйіндері арасында шоғырланады.



2.27 Сурет – ШЭ үлгісінде кернеудің таратылуы

Кернеулі жағдайды бағалау үшін әртүрлі беріктік теориялары қолданылу мүмкін. Кран-манипулятор қондырғытары құрылымында иілмелі материалдар кеңінен таратылуына байланысты (болат пен алюминий), күрделі кернеулі жағдайды бағалау үшін беріктіктің үшінші немесе төртінші

теориясын пайдалану оңтайлы болып табылады:

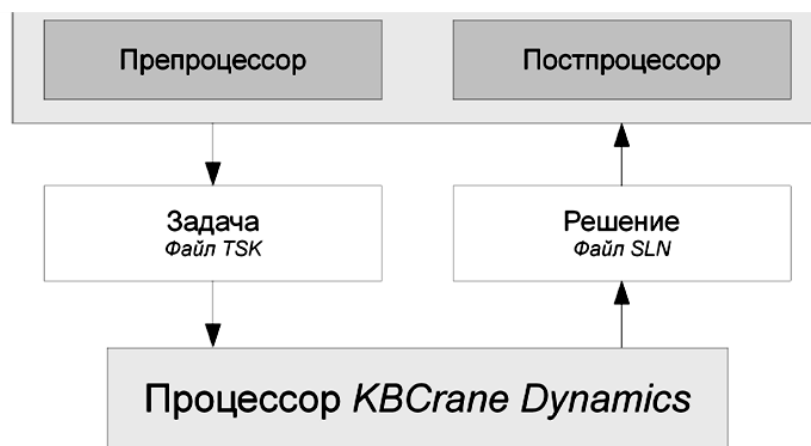
$$\sigma_{III} = \sigma_1 - \sigma_3, \quad \sigma_{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

Аталған тарауда келтірілген формулалар бойынша құрылымның барлық шеткі элементтеріндегі балама кернеуді есептеу орындалады. Мұндай есептеу нәтижесі ШЭ үлгілері арқылы қалыптастырылған кран-манипулятор қондырғытары құрылымының негізгі элементтерінде кернеуді үздіксіз тарату көрінісін алу болып табылады (2.27-сурет).

3 Мобильді тасымалдау-технологиялық машиналардың гидравликалық кран-манипулятор қондырғытарын динамикалық және беріктікке талдауын жүргізуге арналған бағдарламалық кешен

3.1. Бағдарламалық кешеннің құрылымы мен жүзеге асыру ерекшеліктері

Бағдарламалық кешен төмендегі құрамдас бөлшектерден тұрады: пайдаланушының сызбалық интерфейсінен тұратын пре-/постпроцессор және процессор (3.1-сурет). Препроцессорда пайдаланушы бастапқы деректерді әзірлеуді жүзеге асырады: кран-манипулятор қондырғы үлгісін қалыптастырады, жүктемені тексереді, симуляция көрсеткіштерін бекітеді. Әзірленген бастапқы деректер TSK кеңейтуден тұратын тапсырма файлында сақталады. Аталған файл талдау мақсатында процессорға тапсырылады.



3.1 Сурет – Бағдарламалық кешен модулдерінің өзара әрекеттесу диаграммасы

Процессорлы модуль динамика тапсырмаларын шешу, қозғалыс теңдеулерін біріктіру, ШЭ үлгісінің инерциясы мен қаттылық матрицасын қалыптастыру, қаттылық матрицасын факторлау үшін жауап береді. Процессорлы модулдің жұмыс жасау нәтижелері SLN кеңейтуден тұратын шешім файлында сақталады және постпроцессорға таратылады. Постпроцессорда пайдаланушы шешім нәтижелерін талдаудан өткізеді, сызбалар құрады. Постпроцессор модулінде нақты уақыт тәртібінде ең күрделі тапсырмаларды шешу де жүзеге асырылады (процессор ұсынған мәліметтер негізінде ШЭ үлгілері мен жұқа қабырғалы өзектерде кернеуді анықтау). Аталған ұстаным есептеудің аралық нәтижелерін сақтауға арналған деректер көлемін қысқартуға мүмкіндік береді. Нәтижесінде қатты дискіде бос кеңістіктің қажетті көлеміне қатысты талаптар бірнеше есе төмендейді, сонымен қатар қатты дискіден баяу оқу мен жазу операцияларының саны қысқарады, бұл бағдарламалық модулдердің шапшаң әрекеттесуін

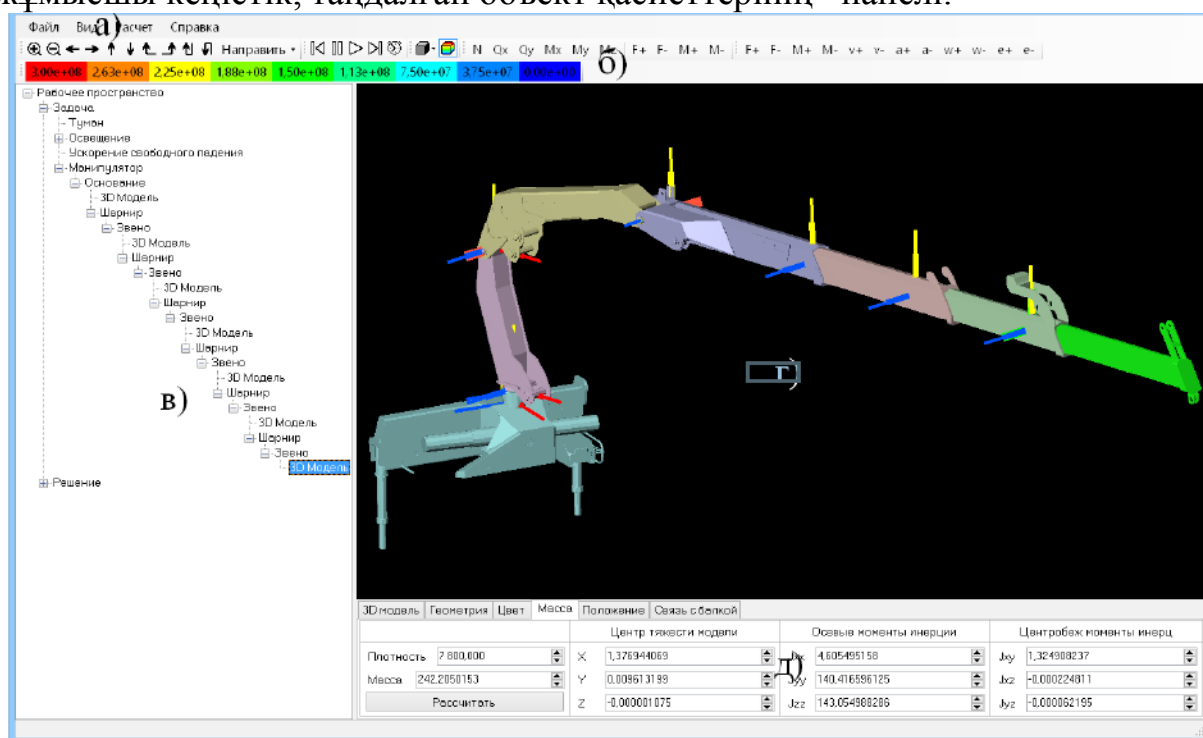
арттырады.

Пайдаланушының бағдарламалық коды Microsoft Visual Studio Express 2013 [31] қалыптастыру ортасында C++ бағдарламалау тілінде жазылған. Теңдеулерді алдын-ала орын ауыстыру арқылы Холецкий әдісі арқылы қаттылық матрицасын факторлау үшін математикалық Eigen функционалы кітапханасы қолданылады [30]. Тапсырманы шешу жылдамдығы маңызды болуына байланысты, процессорлы модулдің шапшаң әрекеттесуін арттыру үшін төмендегі әдіс-тәсілдер қолданылады: циклдарды кеңейту, жадындағы деректерді түзету, SSE2 пайдалану арқылы векторлау, көпөлшемді массив орнына матрицаны сақтау мақсатында бірөлшемді массивді пайдалану, математикалық теңдеулерді алдын-ала нышанды қысқарту.

Пре-/постпроцессордың бағдарламалық коды SharpDevelop қалыптастыру ортасында C# бағдарламалау тілінде жазылған. Сызбалық кітапхана ретінде OpenTK құрамындағы OpenGL қолданылады [25].

3.2 Пайдаланушының графикалық интерфейсте жұмысы

Пайдаланушының графикалық интерфейсі (3.2-суретте) көрсетілген. Бағдарламаның негізгі терезесі төмендегі интерактивті элементтерден тұрады: негізгі мәзір панелі, құрал-саймандар панелі, қалыптастыру дарағы, жұмысшы кеңістік, таңдалған объект қасиеттерінің панелі.



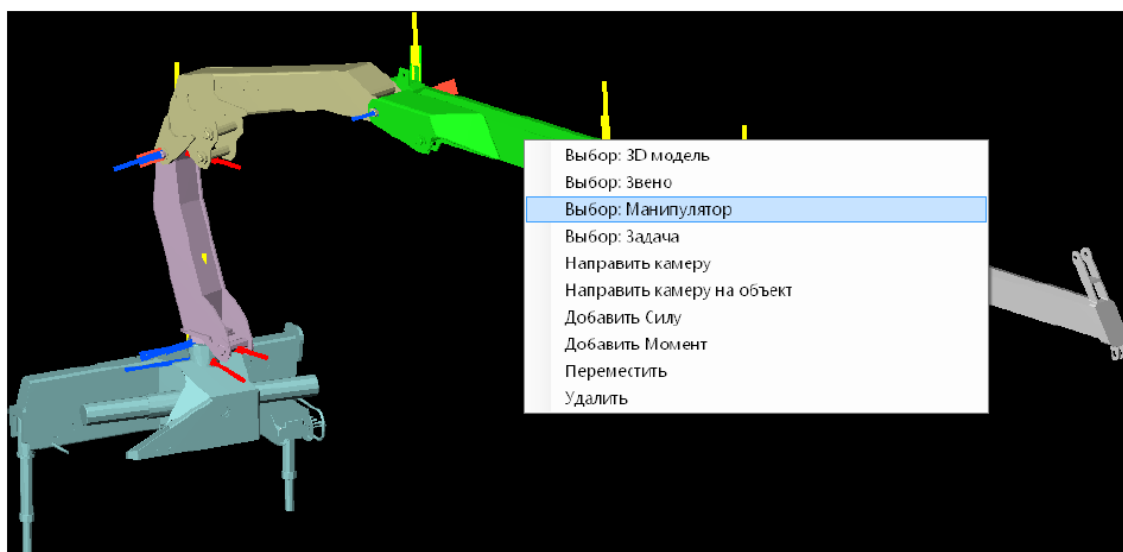
а - негізгі мәзір ; б - құрал-саймандар панелі, в- қалыптастыру дарағы, г- жұмысшы кеңістік, д- таңдалған объект қасиеттерінің панелі

3.2 Сурет – Пайдаланушының графикалық интерфейсінің негізгі терезесі

Негізгі мәзір «Файл», «Түр», «Есептеу » және «Анықтама» атты шағын мәзірлерден тұрады. «Файл» шағын мәзірінің пернесі жаңа тапсырманы қалыптастыру, оны файлға сақтау, файлдан қолданыстағы тапсырманы жүктеу немесе ағымдағы тапсырманы жабу, сонымен қатар шешімі бар файлды ашу немесе жабуға мүмкіндік береді. Бір мезгілде бағдарламаға бір тапсырма және бір шешім жүктелуі мүмкін. «Түр» шағын мәзірінен құрал-саймандар панелін бейнелеуді баптау жүзеге асырылады. «Есептеу» шағын мәзірі бастапқы деректерді қателіктерге тексеру және тапсырманы шешу үдерісін іске қосуға мүмкіндік береді. «Анықтама» мәзірінде бағдарлама туралы анықтамалық ақпарат сақталады.

Қалыптастыру дарағында пайдаланушы ашқан барлық тапсырмалар немесе шешімдер бейнеленеді: кран-манипуляторлы қондырғы, оның буындары, топсалары, ШЭ үлгілері, гидроцилиндрлер, жүктемелер, және т.б. Жұмысшы кеңістік саласында аталған объектілерден тұратын үшөлшемді көріністің рендерінгі жүзеге асырылады.

Объектіні таңдау жұмысшы кеңістік саласындағы оның бейнесіне тікелей басу немесе қалыптастыру дарағындағы оның жазбасына тышқанның сол жақ пернесін басу арқылы жүзеге асырылады. Объектіге келтірілген курсормен тышқанның оң жақ пернесін басу қосымша операциялар жиынтығынан тұратын мәнмәтінді мәзірді ашады (3.3-сурет).



3.3 Сурет –Тінтуірдің оң жақ пернесі тудыратын объектінің мәтінді мәзірі

Тышқан дөңгелегі үшөлшемді жұмысшы кеңістіктің бағдарын өзгерту, сонымен қатар бейнеленетін объектілердің масштабын үлкейту немесе кішірейту мақсатында қолданылады.

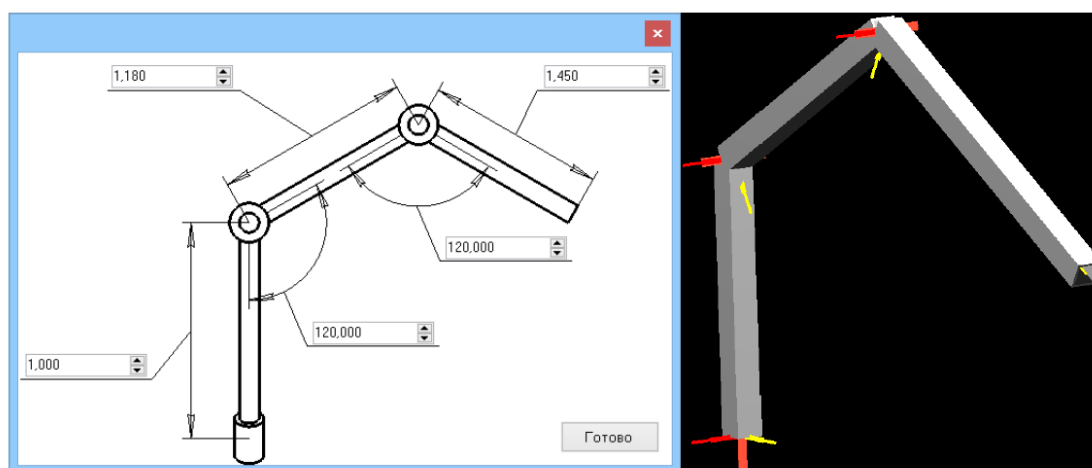
Таңдалған объект жұмысшы кеңістік пен қалыптастыру дарағында түс арқылы көрсетіледі. Бағдарлама терезесі астында қасиеттер панелі ашылады, мұнда бірнеше қосымша беттерде оның сипаттамалары бейнеленеді.

Объектінің кейбір қасиеттері түзетілмейді (3.4-сурет).

Элемент		Масса					
		Центр тяжести		Осевые моменты инерции		Центробежные моменты инерции	
Масса	142	X	1,376	Jxx	4,6	Jxy	1,3
		Y	0,003	Jyy	140,4	Jxz	0
		Z	0	Jzz	143,1	Jyz	0
Обновить							

3.4 Сурет – Мәндері автоматты анықталатын түзетілмейтін өрістермен буын қасиеттерінің панелі «Масса» қосымша беті

Объектінің басақа қасиеттері түзетілетін болып табылады (мәселен, топсада бұрылыстың бастапқы бұрышы, өзектің көлденең қимасының өлшемі, 3D үлгісі материалының тығыздығы және т.б.). Кран-манипуляторлы қондырғының есептік үлгісіне өзгерістер енгізу оның құрамдас объектілерінің қасиеттерін түзету, сонымен қоса жаңа объектілерді қосу және қолданыстағы объектілерді жою арқылы жүзеге асырылады. Пайдаланушы енгізетін барлық өзгерістер нақты уақыт тәртібінде жұмысшы кеңістік саласында бейнеленеді.



а)

б)

а - кран-манипуляторлы қондырғының таңдалған кинематикалық сызбасы үшін көрсеткіштерді енгізетін диалогтік терезе ; б - есептік үлгінің алынатын дайындамасы

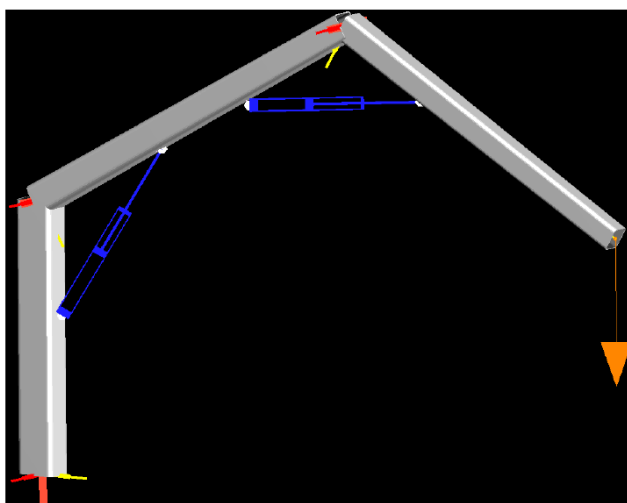
3.5 Сурет – Үлгі бойынша кран-манипуляторлы қондырғыты қалыптастыру

Кран-манипуляторлы қондырғының есептік үлгісін ең жылдам қалыптастыру әдісі үлгі ретінде типтік кинематикалық сызбалардың бірін пайдалану болып табылады. Бұл үшін пайдаланушы «Манипулятор» объектіні таңдайды және оның қасиеттер панелінде «Үлгі бойынша қалыптастыру» пернесін басады. Пайда болған диалогтік терезеде ол кран-манипуляторлы қондырғының типтік кинематикалық сызбаларының бірін таңдайды және құрылатын үлгінің кейбір көрсеткіштерін көрсетеді (3.5, а-

сурет). Енгізілген деректер негізінде бағдарлама кран-манипуляторлы қондырғының есептік үлгісінің дайындамасын қалыптастырады (3.5, б - сурет).

Алынған дайындама: өзектер геометриясына өзгерістер енгізу, гидроцилиндрлер қосу, сыртқы жүктеме болған жағдайда оларды түзетуді талап етеді (сурет 3.6).

Жұқа қабырғалы өзекті түзету үшін пайдаланушы оны құрылымдық реті немесе жұмысшы кеңістік саласында таңдайды және ашылатын қасиеттер панелінде қима профилі, оған тән өлшемдер, өзек ұзындығы, буын координаттар жүйесіндегі жағдайы мен басқа да көрсеткіштерді өзгертеді (сурет 3.7).



3.6-сурет – Кран-манипуляторлы қондырғысының есептік үлгісі

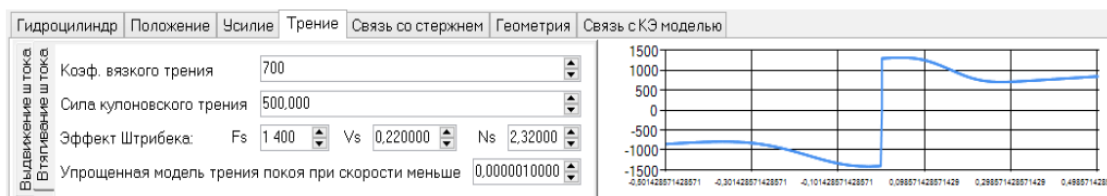
Участок стержня	Первое сечение	Последнее сечение	Положение	Масса
Продолжение пред. участка стержня	Координаты		Углы Эйлера	
Сонаправленность с пред. участком стержня	X	0,000	Поворот 1	X 0,0000000000000000
	Y	0,000	Поворот 2	Y 0,0000000000000000
	Z	0,000	Поворот 3	Z 0,0000000000000000

3.7-сурет – «Положение» ашылған қосымша бетімен өзек учаскесінің қасиеттер панелі

Автоматты түрде өзек геометриясы қайта құрылады, оның инерциялы сипаттамалары, көлденең қималардың геометриялық сипаттамалары, буынның аталған өзегінен тұратын инерциялы көрсеткіштері есептеледі, осыдан кейін барлық өзгерістер жұмысшы кеңістік, құрылымдық реті және объектінің қасиеттер панелінде нақты уақыт тәртібінде бейнеленеді.

Гидроцилиндрді қосу үшін пайдаланушы басқаратын буындасуды таңдайды және объектінің қасиеттер панелінде «Гидроцилиндрді қосу» пернесін басады. Осыдан кейін жаңа гидроцилиндрдің қасиеттерін реттейді:

кран-манипуляторлы қондырғытың секциялармен жалғану нүктелері, үдемелі жүктеме, жұмысшы сұйықтықты беру көрсеткіштері, үйкеліс көрсеткіштер және т.б. (3.8-сурет).



3.8 Сурет – «Трение» ашық қосымша бетімен гидроцилиндр қасиеттерінің панелі

Қасиеттер панелінде «Күш қосу» немесе «Момент қосу» пернесін басады. Қалыптасқан күшті фактордың қасиеттер панелін пайдалану арқылы әрекет векторы мен қосымша нүктесін көрсетеді (3.9-сурет).

Сила		Точка приложения		Вектор силы	
☐ Задан в локальной системе координат				Компоненты вектора силы	
Значение по модулю: 5 000,0000000000000000				X	0,0000000000000000
				Y	-1 373,6056394868600000
				Z	-4 807,6197382041200000

3.9 Сурет – Шоғырланған күштің қасиеттері, панелінің «Вектор силы» қосымша беті

Кран-манипуляторлы қондырғыларының есептік үлгісін қалыптастырудың екінші әдісі де қолданылады, бірақ уақытты көп талап етеді және есептік үлгі қолданылатын қосылыстар, топсалар мен буындарды өзара орналасуды көрсету арқылы, топсалар мен буынды кезекпен қосу арқылы құрылады. Бұл жағдайда кран-манипуляторлы қондырғыларының буынларына пайдалану объектінің үш түрін қоса алады: 3D үлгілер, жұқа қабырғалы өзектер мен ШЭ үлгілер. 2 тарауда қабылданған өзгерістер мен есептік модульде қолданылатын алгоритмдерге байланысты бір ШЭ үлгісі немесе 3D үлгілердің кез келген саны және бір жұқа қабырғалы өзек арқылы ұсынылған бір буында объектілер санына сандық шектеу қойылады. Мұндай жағдайда жұқа қабырғалы өзектер ұзындығы бойынша өзгермелі геометриямен кез келген учаскелер санына ие болуады. ШЭ үлгі немесе өзекті қосқан жағдайда, олардың инерциялы көрсеткіштері материал тығыздығы туралы мәліметтер мен геометрия негізінде автоматты есептеледі. Қосылған 3D үлгі үшін аталған сипаттамалар бағдарлама арқылы есептеледі немесе пайдаланушы оларды қолмен енгізеді. Қолмен енгізу мүмкіндігі шағын полигональ 3D үлгі үшін сақталған, бұл автоматты тәртіпте инерциялы сипаттамаларды дәлдікпен анықтауға мүмкіндік бермейді.

Есептеу көрсеткіштері (қозғалыс теңдеулерін сандық біріктіру әдісі, уақыт бойынша біріктіру қадамы т.б.) таңдау үшін қолжетімді болып табылатын «Тапсырма» объектінің қасиеттер панелінде құрылымдық реті беріледі (3.10-сурет).

3.10 Сурет – Тапсырманы шешу көрсеткіштер панелі

Барлық бастапқы мәліметтер әзірленгеннен кейін, пайдаланушы бас мәзірдегі «Есептеу» пернесін басады. Мұндай жағдайда тапсырма файлда сақталады, процессор-бағдарламаға тапсырылады, оның шешімі жүзеге асырылады, есептеу нәтижелері басқа файл түрінде пайдаланушы жұмыс жасайтын пре/постпроцессор бағдарламасына қайта таратылады.

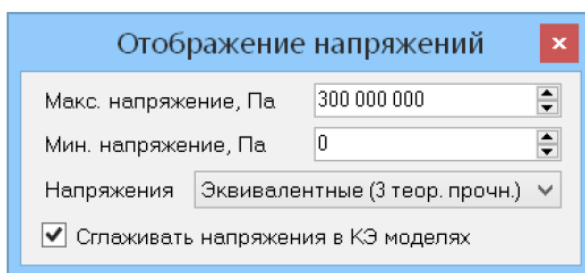
Есептеудің алынған нәтижелерін талдауға арналған ең маңызды құрал-саймандар болып табылады :

- кран-манипуляторлы қондырғы буынларының қозғалысын анимациялау;
- жұқақабырғалы өзектерде ішкі күш эпюрін қалыптастыру;
- кернеудің таратылу көрінісін бейнелеу;
- құрылымның кез келген нүктелерінде жылдамдық пен үдетуді есептеу;
- сызбалар құру.

Кран-манипуляторлы қондырғысы құрылым элементтерінің қозғалысын анимациялауды басқару «Анимация» құрал-саймандар панеліндегі пернелер арқылы, сонымен қатар «Шешім» объектінің қасиеттер панелінде жүзеге асырылады (3.11-сурет). Пайдаланушыға әртүрлі жылдамдықпен анимацияны қалыптастыру, тоқтату мен өзгеріс енгізу мүмкіндігі ұсынылады.

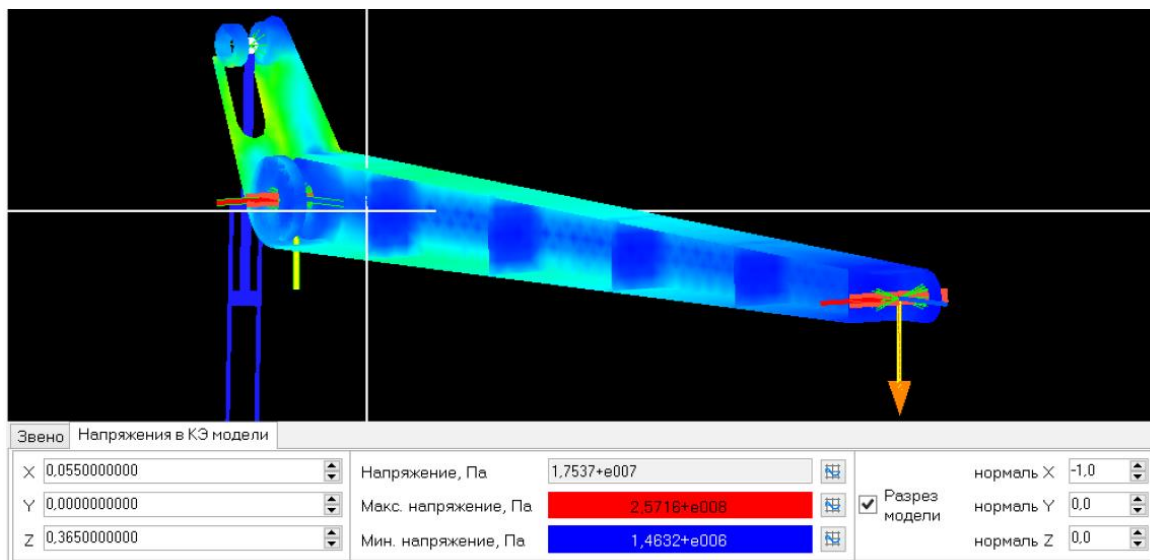
3.11 Сурет Симуляцияның кез келген қадамына ауысу, алынған шешімнің кез келген моментіне ауысу үшін және анимация көрсеткіштерін баптау үшін қолданылатын шешім қасиеттерінің панелі

Ішкі күшті факторлар эпюр бейнесін қосу мен ағыту үшін, сонымен қатар олардың ауқымын өзгерту үшін «Эпюр» құрал-саймандар панеліндегі интерактивті басқару элементтері жауапты болады. «Кернеу» құрал-саймандар панелінде кернеулер жолағы орналасқан. Оған басқан жағдайда кернеулерді тарату көрінісін бейнелейтін диалогтік баптау терезесі ашылады (сурет 3.12). Пайдаланушы бекіткен көрсеткіштерге сәйкес, кернеу максималді мәннен асатын металл құрылым элементтері қызыл түспен көрсетіледі, минималді мәннен аспайтын металл құрылым элементтері көк түспен көрсетіледі, минималді мәннен жоғары және максималді мәннен төмен металл құрылым элементтері кернеудің қолданылатын палитрасына сәйкес көрсетіледі.



3.12 Сурет –Кернеуді бейнелеудің диалогтік баптау терезесі

ШЭ үлгісі немесе жұқа қабырғалы өзектің бекітілген нүктесіндегі кернеулер мен ішкі күшті факторлар қимасында әрекет ететін нақты мәндері сәйкес келетін объектінің қасиеттер панелінде бейнеленеді. ШЭ үлгісі ішінде кернеуді зерттеу үшін кез келген кеңістікке қатысты оның «кесіндісі» орындалу мүмкін (сурет 3.13).



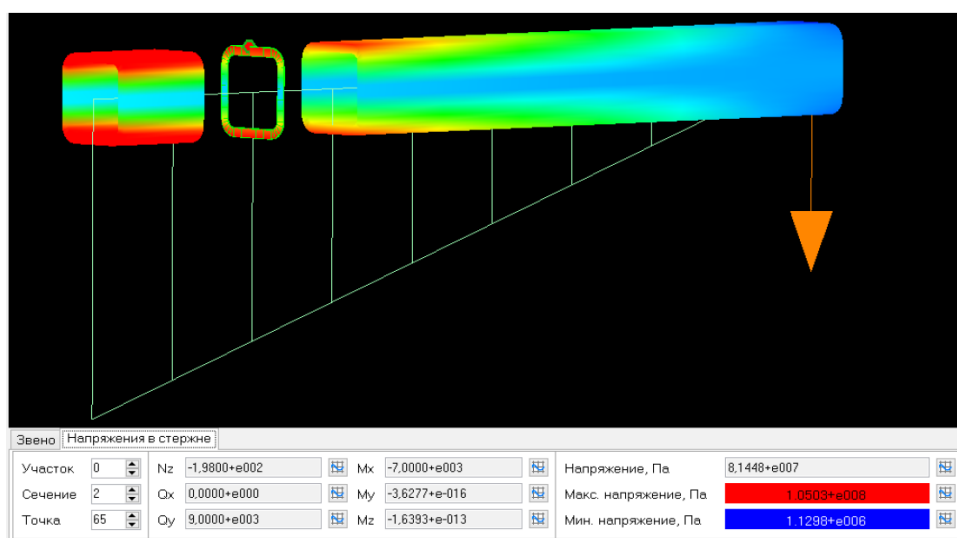
3.13 Сурет – ШЭ үлгісіндегі кернеу (пайдаланушы тұйықталған профиль ішінде кернеуді бағалау үшін көлденең «кесіндіні» орындаған)

Жұқа қабырғалы өзек қимасындағы кернеуді зерттеу, «кесінді» және өзектің жуық элементтерін жасыру бағдарлама арқылы автоматты түрде

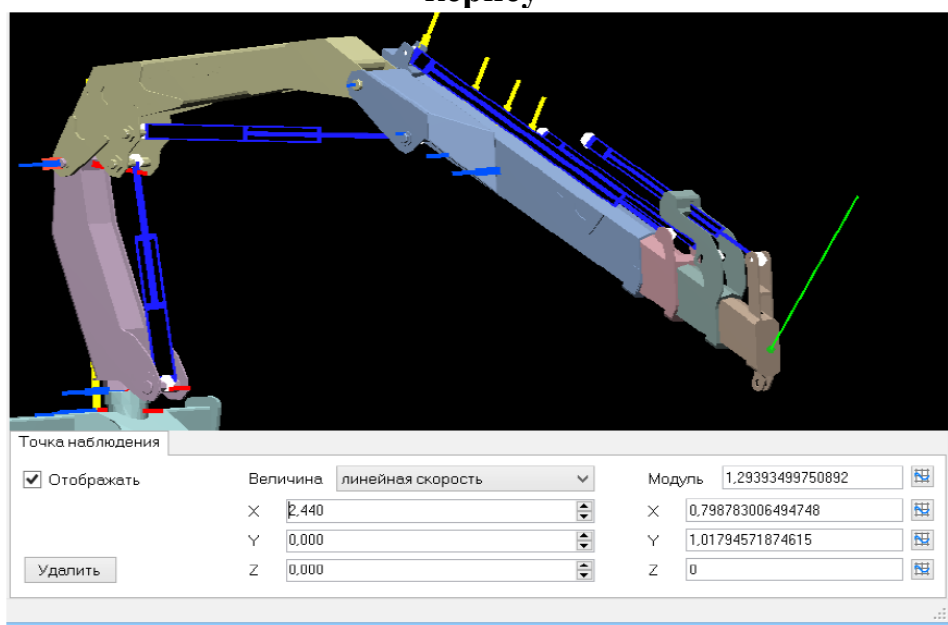
орындалады (сурет 3.14).

Кран-манипуляторлы қондырғы құрылымының кез келген нүктелеріне пайдаланушы бақылау нүктелері деп аталатын объектілерді қоса алады. Әрбір бақылау нүктесі үшін өлшенетін шама көрсетіледі (тізбекті жылдамдық, бұрыштық үдету т.б.), оның мәні құрал-саймандар панелі, сонымен қатар жұмысшы кеңістік саласында вектор түрінде көрсетіледі (сурет 3.15).

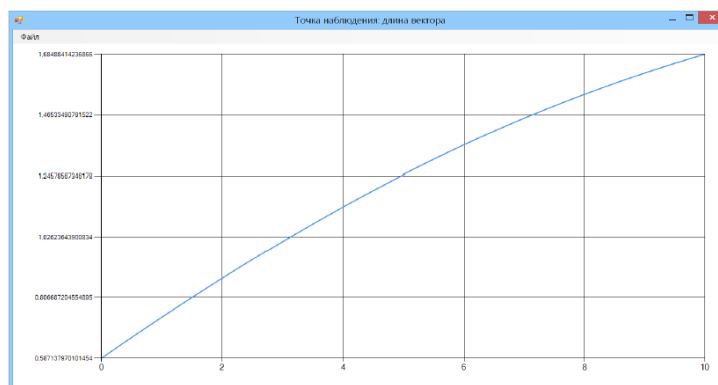
Кран-манипуляторлы қондырғының қалған көрсеткіштері (бұрылыс, топсада жылдамдық пен үдету, гидроцилиндр қалыптастыратын күштер т.б.) оны таңдау кезінде тиісті объект қасиеттер панелінде көрсетіледі. Қозғалыс анимациясы іске қосылған жағдайда жұмысшы кеңістік саласында бейнеленетін шамалар (вектор, эпюр, кернеу), сонымен қатар, олардың мәндері автоматты түрде жаңартылады.



3.14 Сурет – Иілім моментінің эпюрі мен жұқа қабырғалы өзектегі кернеу



3.15 Сурет – Жебе ұшындағы нүктеде тізбекті жылдамдықты өлшеу



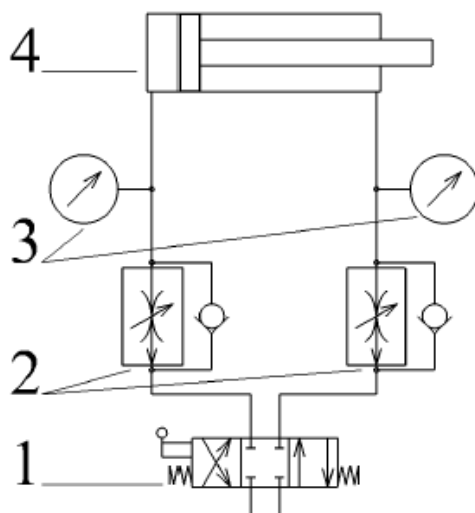
3.16 Сурет – Жеке терезеде құрылған уақытқа байланысты кран-манипулятор жабдығының зерттелетін көрсеткішінің тәуелділік кестесі

Шығыс шамалар үшін бөлек терезеде сызбаларды қалыптастыру мүмкіндігі ұсынылады (сурет 3.16). Мәзірдің тиісті пернелері алынған файлды бастапқы мәліметтер ретінде есептік кешендерде пайдалану немесе математикалық бағдарламалық пакеттерде әрі қарай талдау үшін, қисық нүктелерінің координаттарымен кесте түріндегі мәтіндік файл немесе сызбалық файл түрінде сақтауға мүмкіндік береді .

4 Мобилді тасымалдау-технологиялық машиналардың кран-манипулятор жабдығының метал құрылымын динамикалық және беріктік талдау

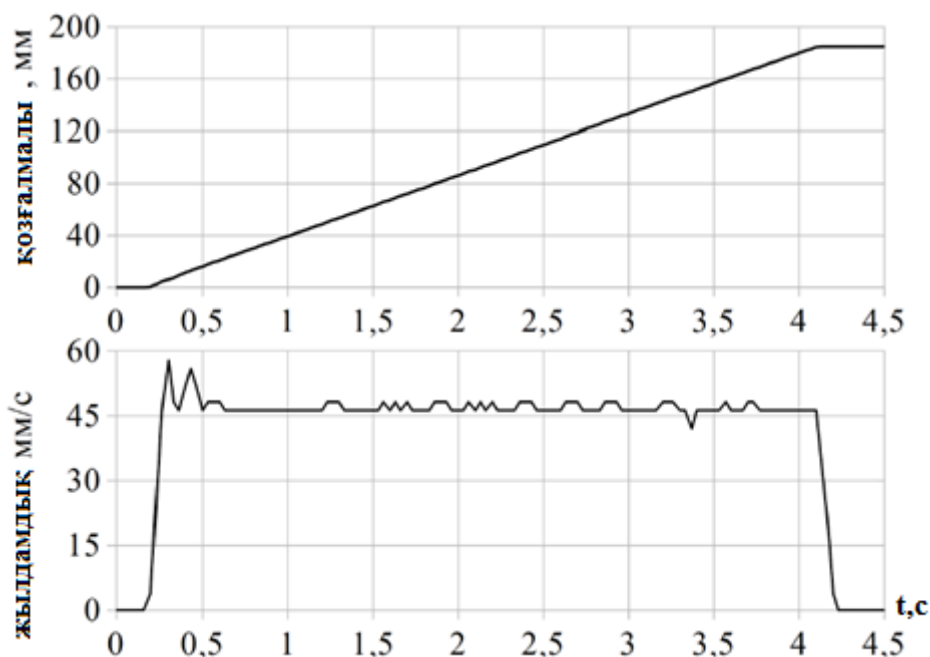
4.1 Екіжақты әрекет ететін бірштокты гидроцилиндрдің фрикциялы көрсеткіштерін тәжірибе арқылы анықтау

Ағын қозғалысы кезінде гидроцилиндрде пайда болатын үйкеліс күшін тәжірибе арқылы анықтау үшін сызбасы 4.1. суретте көрсетілген зертханалық жабдық қолданылды.



1- гидротаратқыш, 2-шығын реттеуіш ; 3 - манометр; 4 - гидроцилиндр

4.1 Сурет – Зертханалық жабдықтың сызбасы



4.2 Сурет – Тәжірибелік жолмен алынған шток жылдамдығы мен орын ауыстыру тәуелділігі

Гидроцилиндр тәжірибе нәтижелеріне ауырлық күші әсерін төмендету мақсатында көлденең орналастырылды. Шток жылдамдығына байланысты үйкеліс күші тәуелділігін қалыптастыру үшін әртүрлі жылдамдықпен штокты тарту мен шығару бойынша тәжірибелер топтамасы орындалды. Әрбір тәжірибеде бекітілген шток жылдамдығы шығын реттегіш тетігінің жағдайы арқылы бекітілді. Шток қозғалысы 30кадр/с видеоқатар жиілігімен видеокамера арқылы тіркелді. Видеокамера ажыратымдылығы 0,2мм дәлдікпен шток жағдайын анықтауға мүмкіндік береді. Автоматты тәртіпте шток қозғалысын бақылау үшін бағдарламалық жасақтама қолданылды Kinovea [11]. Әртүрлі жылдамдықпен штокты шығару мен тарту жағдайлары үшін уақытқа байланысты штокты орын ауыстыру тәуелділігі алынды (сурет 4.2). Олардың негізінде сандық түрлендіру арқылы уақытқа байланысты шток жылдамдығының тәуелділік құрылды.

Шток қозғалысының теңдеуі :

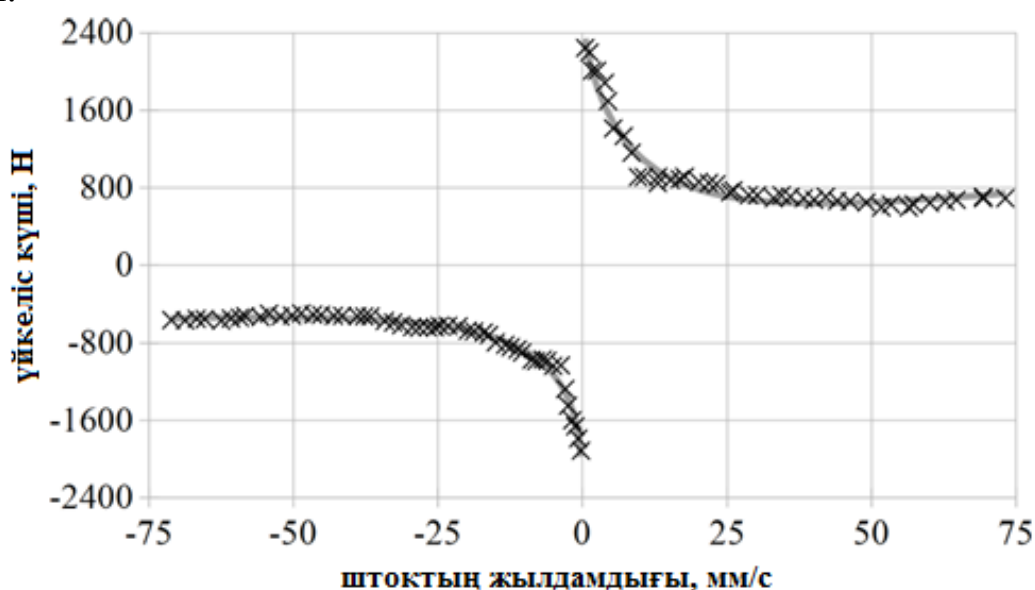
$$ma = F_h - F_f, \quad (4.1)$$

мұндағы m , a – шток салмағы мен үдету; F_f – үйкеліс күші ; F_h – жұмысшы сұйықтық қалыптастыратын күш. (4.1) теңдеуге байланысты, штоктың бірқалыпты қозғалысы жағдайында $F_h = F_f$.

Бұл жағдайда күш F_h формула бойынша анықталады:

$$F_h = p_1 A_1 - p_2 A_2, \quad (4.2)$$

мұндағы p_1 , p_2 – үдетусіз шток қозғалысы кезінде манометр көрсеткіштері негізінде бекітілетін мікбас және штокты қабаттағы жұмысшы сұйықтық қысымы; A_1 , A_2 – гидроцилиндрдің мікбас және штокты қабаттың жұмысшы ауданы.

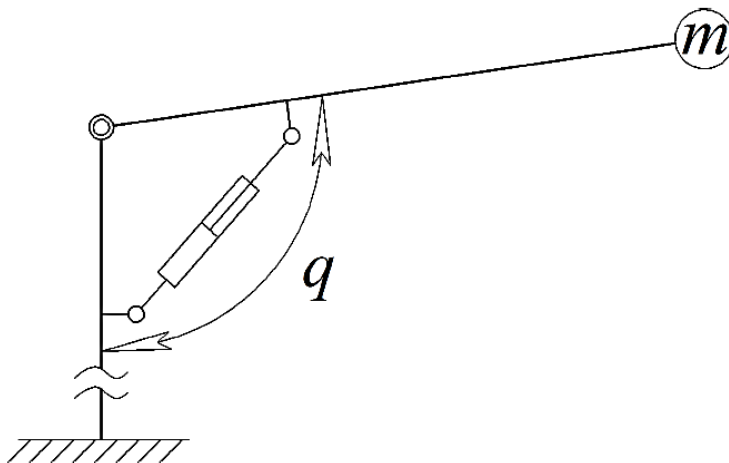


4.3 Сурет – Шток жылдамдығына байланысты гидроцилиндрдегі үйкеліс күшінің тәуелділігі

(4.1), (4.2) формулалары бойынша әрбір тәжірибелік жағдайда үйкеліс күшінің мәні анықталды. Алынған мәліметтер негізінде уақытқа байланысты гидроцилиндрдің үйкеліс күшінің тәуелділік кестесі құрылды. Ең төменгі шаршы әдісі арқылы тәжірибелік кестені нақты дәл қайталайтын (4.2) теңдеуіндегі функциялар коэффициенттері анықталды (сурет 4.3): шток ығысқан жағдайда $FC = 300 \text{ Н}$, $\alpha_v = 5750 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$, $FS = 2500 \text{ Н}$, $v_s = 0,00875 \text{ м/с}$, $\delta_s = 0,7325$; шток тартылған жағдайда $FC = 300 \text{ Н}$, $\alpha_v = 2600 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$, $FS = 2320 \text{ Н}$, $v_s = 0,006 \text{ м/с}$, $\delta_s = 0,512$.

4.2 Жүкті көтеру кезінде кран-манипулятор жебесінің жүктеліміне гидроцилиндрдегі үйкеліс әсерін бағалау

Қалыптастырылған бағдарламалық кешенде екі есептік жағдай үшін гидроцилиндр арқылы m жүкпен жебені көтеру үдерісі әзірленді (сурет 4.4). Бірінші жағдайда гидроцилиндрдегі үйкеліс ескерілмеді. Екінші жағдайда гидроцилиндрдегі үйкеліс күшін үлгілеу мақсатында тәжірибелік жолмен анықталған көрсеткіштер қолданылды. Есепті шешу нәтижесінде q топсадағы бұрылу бұрышының, $\dot{q}$ топсадағы бұрылу жылдамдығының, F гидроцилиндр тарапынан жебе әрекет ететін күштің тәуелділігі алынды, жебедегі максималды кернеу σ уақыт үшін екі есептік жағдай: гидроцилиндрге үйкеліс есептемегенде және үйкеліс ескере отырып (4.5-сурет).



4.4 Сурет – Жүкпен жебені көтеру есебінің есептік схемасы

Алынған нәтижелер негізінде төмендегідей қорытынды жасалды :

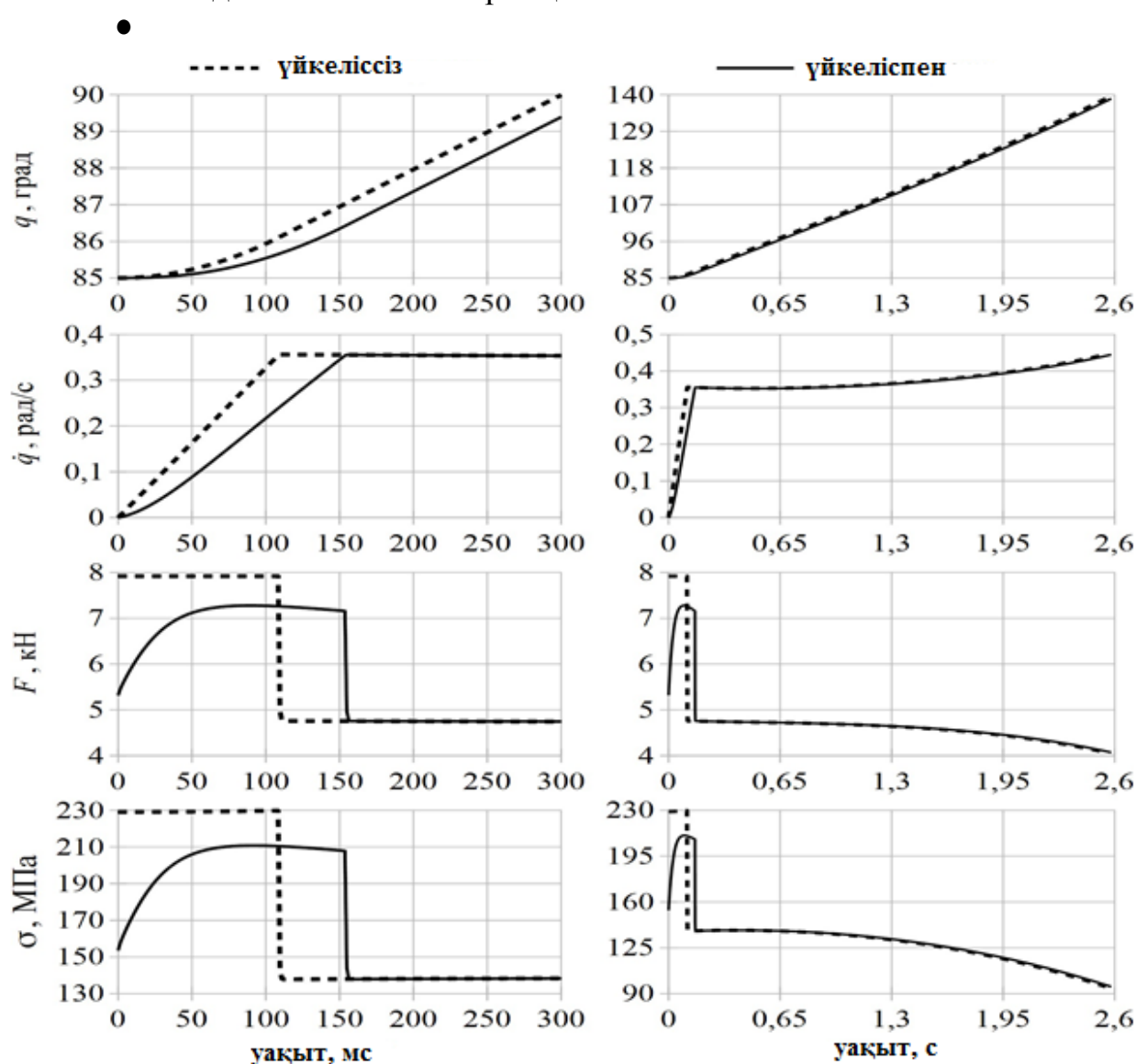
- Жүкпен жебені көтеру кезінде гидроцилиндрдегі үйкеліс күші қозғалыс басталғанда ғана үлкен әсер етеді. Әрі қарай көтеру барысында метал құрылым элементтерінің қозғалыс жылдамдығын шектейтін негізгі фактор сорғы қамтамасыз ететін жұмысшы сұйықтықтың максималді шығыны болып табылады .

- Жебені бастапқы көтеру кезінде гидроцилиндр қалыптастыратын күш максималді болады және үдетумен қозғалыс байқалады. Бұл жағдайда

үйкеліс күшін ескеретін есептік жағдайда үдету төмен болады, бұл жебеге әсер ететін төмен инерциялы жүктемеге әкеледі және $t = 0...152$ мс уақыт аралығында кестеде кернеудің төмен ауытқуына әкеледі.

- Сорғының жұмысшы сұйықтықты максималді беруге сәйкес келетін ығысу жылдамдығына шток жеткен жағдайда, гидроцилиндр қалыптастыратын күш төмендейді. Әрі қарай шток тұрақты жылдамдықпен ығысуды жалғастырады. Бұл жағдайда үйкеліс күшін ескеріп және ескермей қалыптастыратын үдерісте айырмашылық байқалмайды.

- Үйкеліс күшін ескерумен салыстырғанда, үйкеліс күшін ескермей жүкті көтеру 1,2% артық шапшаң жүзеге асырылады. Шығу кезіндегі жебеде тіркелетін кернеулердің ең жоғары мәніндегі айырмашылық 19 МПа құрайды, есептік жағдайда бұл үйкелісті есепке алмағандағы мәні үйкелісті есепке алғандағы мәнінен 9% артық.

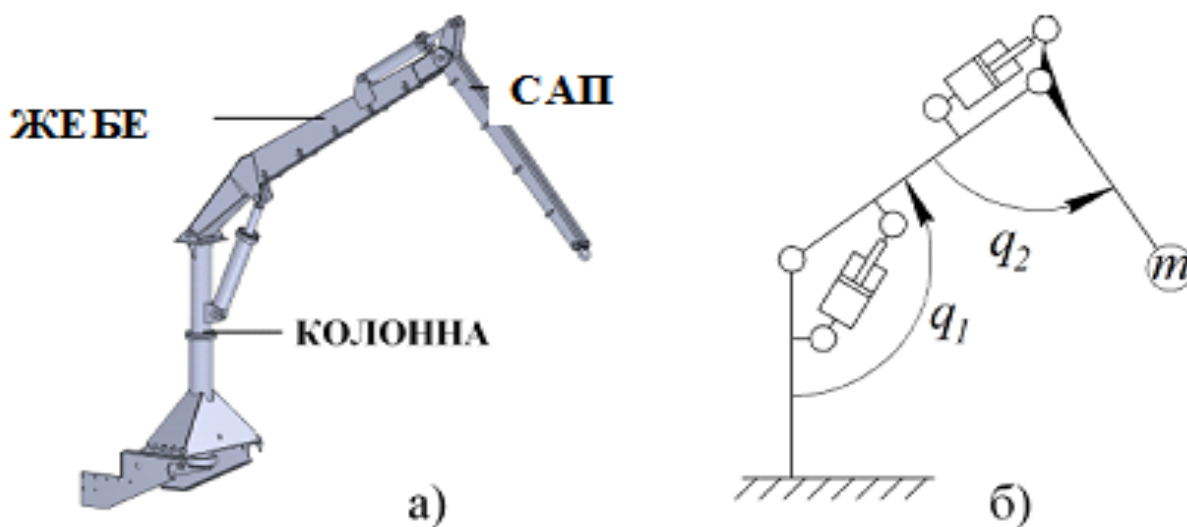


4.5 Сурет – Кернеу мәнінің үйкеліс күшін ескеріп немесе ескермей, жүпен қоса жебені көтеру үдерісін үлгілеу нәтижесінде алынған тәуелділіктер графигі

Екі есептік жағдайда жебедегі шекті кернеу беріктік қоры коэффициентімен 1,4 ескере отырып, шекті рұқсат етілген мәннен артпады (390 МПа).

4.3 АСТ-4-А машинасының кран-манипулятор жабдығының динамикалық және беріктік талдауы

Қалыптастырылған бағдарламалық кешенде АСТ-4-А машинасының гидравликалық манипулятор жебесінің жүктемелімін бағалау жүзеге асырылды (4.6, а -сурет). Есептік сызба 4.6, б-суретте келтірілген.

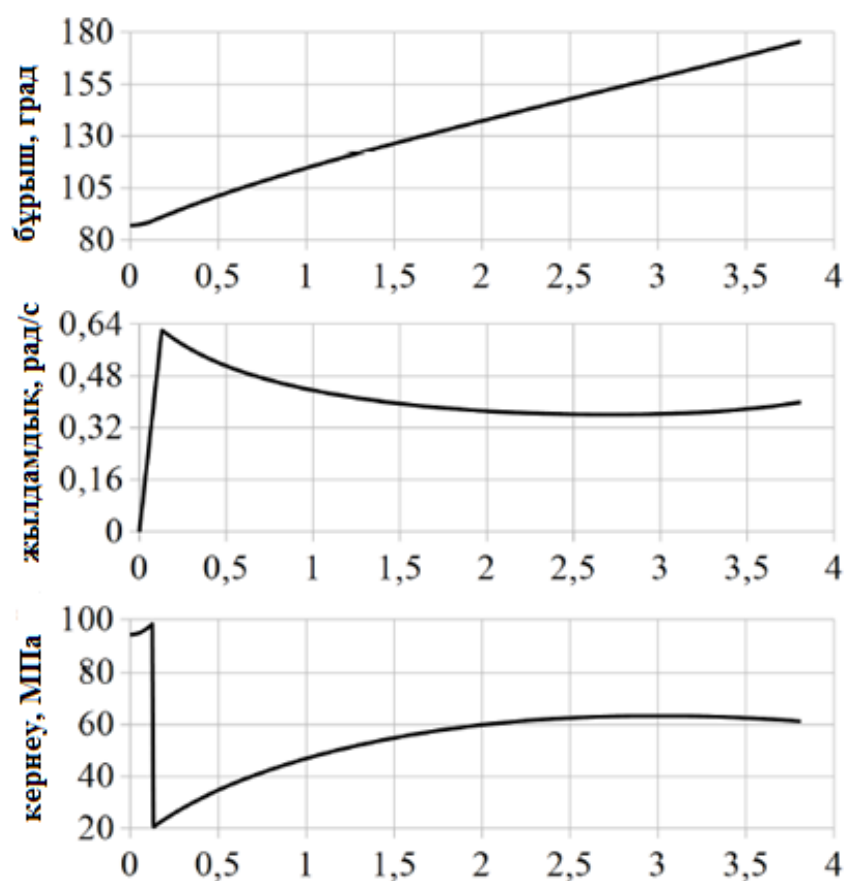


а –метал құрылым элементтері; б –есептік сызба

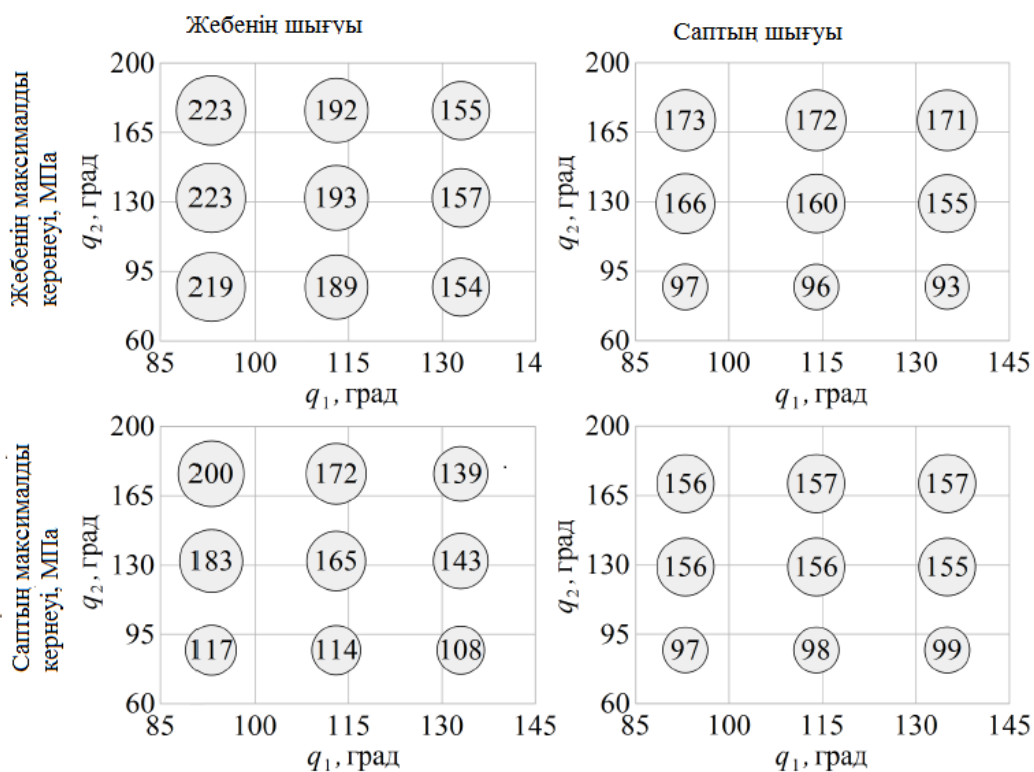
4.6 Сурет – АСТ-4-А машинасының кран-манипуляторы

Жебенің тұрақты жағдайы мен тоғыз бастапқы жағдайда (бірінші топсаны бұру бұрышы q_1 93° , 113° , 133° тең және екінші топсаны бұру бұрышы q_2 87° , 132° , 176° тең), тетіктің бекітілген жағдайы, сонымен қатар тетіктің гидроцилиндрі жағдайында ($q_1 = 93^\circ$, 114° , 135° және $q_2 = 87^\circ$, 129° , 171°) жебе гидроцилиндрінің салмағы 500кг жүкті көтеру үдерісі m қалыптастырылды. Жебе мен тетікте кернеуді есептеу жұқа қабырғалы өзектер теориясының ережелер негізінде орындалды. Топсада бұрылыс тәуелділігінің кестесі, топсадағы жылдамдық пен уақытқа байланысты тетікте байқалатын максималді кернеу 4.7.суретте көрсетілген. Кестелерге сәйкес, қозғалыс жоғары үдетумен басталады, бұл жоғары инерциялы жүктеменің пайда болу мен кернеудің жоғары деңгейіне әкеледі [22].

Сорғының жұмысшы сұйықтықты максималді беру кезінде шток тұрақты жылдамдықпен қозғалысқа жетеді. Кернеу графигіндегі екінші максимум сап жүк қалыптастыратын иілім моменті максималді болып және көлденең жағдайдан өткен жағдайда байқалады.



4.7 Сурет - $q_1 = 114^\circ$, $q_2 = 87^\circ$ жағдайында саптың көтерілуі

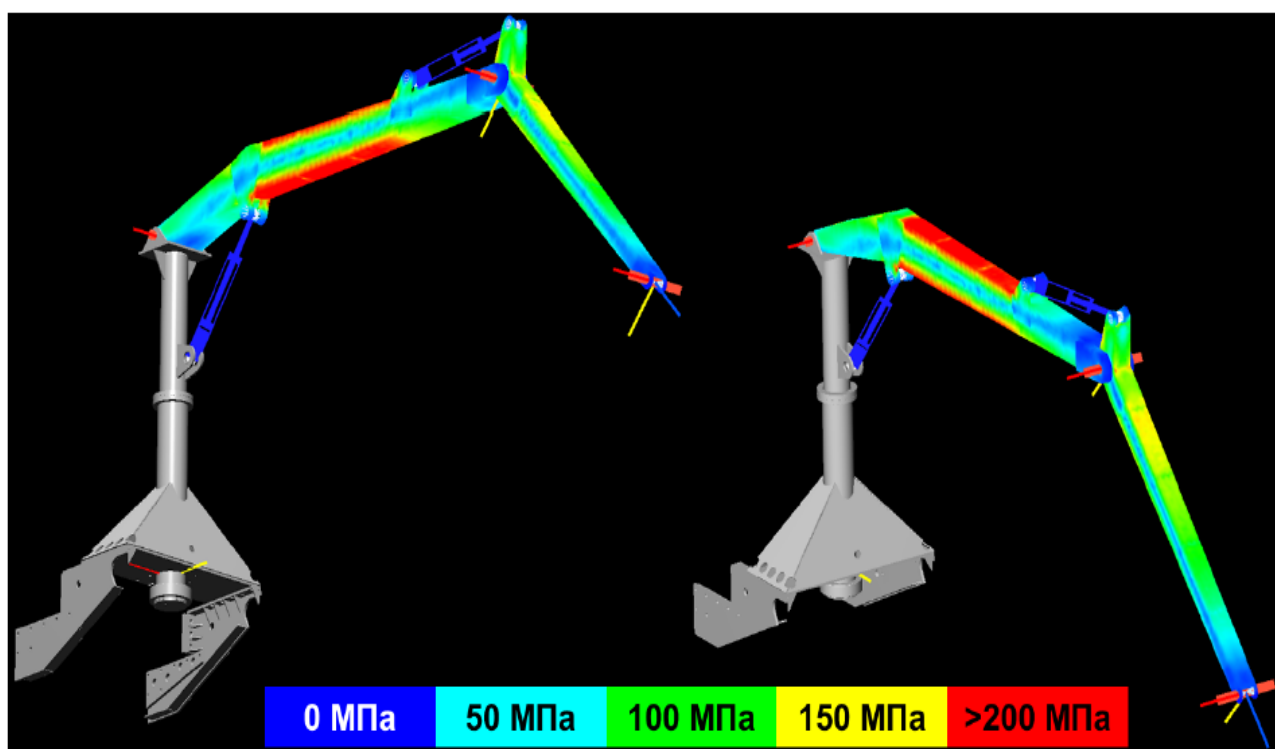


4.8 Сурет – Топсадағы бастапқы бұрылыс бұрыштарына байланысты барлық көтеру үдерісі бойы метал құрылымында тіркелген максималді кернеу

Топсадағы бастапқы бұрылыс бұрыштарына байланысты қозғалыс бойы тетік пен жебеде тіркелген максималді кернеулердің тәуелділік кестесі 4.8-суретте көрсетілген. Кернеудің ең жоғары мәні екінші топса мен сап (200 МПа) және жебе мен бірінші гидроцилиндрдің қосылыс орындарында байқалады (223 МПа).

Қауіпті жүктеу жағдайы үшін (бастапқы жағдайдан жебені көтеру $q_1 = 93^\circ$, $q_2 = 132^\circ$) қалыптастырылған бағдарламалық кешенде МКЭ арқылы нақтылайтын есептеу орындалған.

КЭ үлгілерін қалыптастыру үдерісі екі кезең арқылы жүзеге асырылды: ең алдымен «КОМПАС-3D» редакторында сап пен жебенің қатты денелі 3D үлгісі қалыптастырылды [13], осыдан кейін олардың негізінде Femap бағдарламалық кешен арқылы КЭ торлары шоғырландырылды.



4.9 Сурет – Жебе мен саптағы кернеудің таралу сипаты

Есептеу нәтижелері бойынша максималді кернеу бірінші гидроцилиндрді қосу бөлігінде қозғалыс басталған моментте жебеде тіркелген және 264 МПа құрайды. Кернеудің таратылу сипаты 4.9.суретте көрсетілген. Екі есептеулерде алынған максималды кернеулердің мәндері металл құрылымының көтергіш элементтерінде қолданылатын материалдың (төмен қоспаланған болат 09Г2С, $\sigma_T = 390$ МПа) ағымдылық шегінен аспайды, ұсынылған беріктілік қорының коэффициентін 1,4 ескергенде [29].

ҚОРЫТЫНДЫ

1. Динамикалық үлгі, ықшамдатылған беріктік үлгісі (жұқа қабырғалы өзектер теориясының ережелеріне негізделген), нақтыланған беріктік үлгісі (МШЭ негізделген), сонымен қатар жүзеге асырылатын қозғалыс сипатына жұмысшы сұйықтықты беру көрсеткіштері мен үйкеліс күштерінің әсерін ескеретін, гидроқозғалтқыштың математикалық үлгісінен тұратын кескіндемесі ерікті гидравликалық КМҚ кешенді математикалық үлгісі қалыптастырылды. Ұсынылған математикалық үлгі негізінде жылжымалы негіздемеде жұмыс жасайтын КМҚ мен қосылыста люфт болатын КМҚ үшін оның түрлері қалыптастырылды. Ұсынылған математикалық үлгілерді пайдалану арқылы жылжымайтын негіздегі КМҚ; жебенің топсалы қосылысындағы люфтісі бар КМҚ; қалқымалы құралда жұмыс жасайтын КМҚ, гидроцилиндрде үйкелісті ескере отырып қондырғы жұмысы қалыптастырылды. КМҚ мәліметтері үшін динамикалық-беріктік талдау жүзеге асырылды және метал құрылымының негізгі элементтерінің беріктігі туралы қорытынды жасалды.

2. Динамика тапсырмасын шешу мүмкіндік ұсынды:

- Динамикалық коэффициенттер арқылы жуық динамикалық жүктемелерді ескеретін және статикалық жағдайда орындалатын, сараптамалық есептеумен салыстырғанда динамикалық жүктемелерді нақты шынайы үлгілеу есебінен беріктік есептеу дәлдігін арттыру.

- Ауыспалы үдерістерде пайда болатын жүктемелер сипаты, шамасы мен ұзақтығын бағалау. Барлық манипулятор жұмысының қалыптасқан жағдайында қозғалыстың бекітілген тәртібімен салыстырғанда 1,3-4,8 есе кернеудің артуына әкелетін жүктемелердің уақытша артуы орын алды.

- Динамикалық тұрғыдан шешуді талап ететін үдерістерді зерттеу: жебе қосылысында люфтті тандау барысында пайда болатын соққы мен КМҚ негіздемесінің қозғалысы, жүктің тербелуі.

3. Гидроцилиндрдің фрикциялы сипаттамаларын тәжірибелік жолмен анықтау жүкпен жебені көтеру кезінде метал құрылымы элементтерінің кернеулі жағдайы мен қозғалыс сипатына үйкеліс күшінің әсерін бағалауға мүмкіндік береді. Есептеу көрсеткендей, үйкеліс көтеру басталған кезде байқалатын, қысқа мерзімді ауыспалы үдерісте қозғалыс сипатына үлкен әсер етеді. Қарастырылған жағдайда гидроцилиндрдегі үйкеліс күшінің болуы көтеру үдерісін тежеп және максималді кернеу деңгейінің 9% төмендеуіне әкелді.

4. Динамикалық-беріктік есептеудің ұсынылған әдістемесін жүзеге асыратын бағдарламалық кешен қалыптастырылды solidworks. Жобалау кезеңінде гидравликалық КМҚ динамикалық-беріктік талдау мәселесіне бағдарламалық кешеннің мамандануы төмендегілер үшін негіз болып табылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҖАН ӘДБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Абрамович, И.И. Грузоподъемные краны промышленных предприятий: справочник / И.И. Абрамович, В.Н. Березин, А.Г. Яуре. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.
- 2 Александров, А.В. Сопротивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин. – 3-е изд. испр. – М.: Высш. шк., 2003. – 560 с.
- 3 Александров, М.П. Грузоподъемные машины / М.П. Александров [и др.] – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.
- 4 Александров, М.П. Грузоподъемные машины / М.П. Александров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 552 с.
- 5 Александров, М.П. Подъемно-транспортные машины / М.П. Александров. – 6-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1985. – 520 с.
- 6 Андриенко, Н.Н. Стреловые самоходные краны: в 2 кн. / Н.Н. Андриенко. – О.: Астропринт, 2001. – 2 кн.
- 7 АО «Златмаш» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.zlatmash.ru.
- 8 Астахов, А.И. Автомобильные краны / А.И. Астахов. – М.: Высш. школа, 1969. – 320 с.
9. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон; пер. с англ. А.С. Алексеева [и др.]; под ред. А.Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
- 10 Беликов, Г.В. Основы расчетов прочностной надежности специальных элементов конструкций автомобилей и тракторов / Г.В. Беликов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 98 с.
- 11 Биргер, И.А. Сопротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
- 12 Бычков, Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций / Д.В. Бычков. – М.: Госстройиздат, 1962. – 476 с.
- 13 Вайнсон, А.А. Крановые грузозахватные устройства: справочник / А.А. Вайнсон, А.Ф. Андреев. – М.: Машиностроение, 1982. – 304 с.
14. Вайнсон, А.А. Подъемно-транспортные машины / А.А. Вайнсон. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 536 с.
- 15 Вайнсон, А.А. Подъемно-транспортные машины строительной промышленности. Атлас конструкций / А.А. Вайнсон. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 152 с.
- 16 Вершинский, А.В. Строительная механика и металлические конструкции / А.В. Вершинский, М.М. Гохберг, В.П. Семенов; под общ. ред. М.М. Гохберга. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 231 с.
17. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни / В.З. Власов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Государственное изд-во физико-математической литературы, 1959. – 568 с.
- 18 Гайджуrow, П.П. Методы, алгоритмы и программы расчета стержневых систем на устойчивость и колебания / П.П. Гайджуrow. –

Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010. – 230 с.

19 Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. – 428 с.

20 Горшков, А.Г. Сопротивление материалов / А.Г. Горшков, В.Н. Трошин, В.И. Шалашилин. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.

21 Гохберг, М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин / М.М. Гохберг. – Л.: Машиностроение, 1969. – 520 с.

22 Дарков, А.В. Сопротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. – 4-е изд., перераб. – М.: Высш. школа, 1975. — 654 с.

23 Джанелидзе, Г.Ю. Статика упругих тонкостенных стержней / Г.Ю. Джанелидзе, Я.Г. Пановко; под общ. ред. А.И. Лурье, Л.Г. Лойцянского. — М.: Гостехиздат, 1948. — 208 с.

24 Дьяков, И.Ф. Метод конечных элементов в расчетах стержневых систем / И.Ф. Дьяков, С.А. Чернов, А.Н. Черный. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 133 с.

25 Жавнер, В.Л. Погрузочные манипуляторы / В.Л. Жавнер, Э.И. Крамской. – Л.: Машиностроение, 1975. – 160 с.

26 Зайцев, Л.В. Автомобильные краны / Л.В. Зайцев, М.Д. Полосин. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 208 с.

27 ЗАО «БАКМ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.bakm.ru.

28 ЗАО «ИНМАН» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.inman.ru.

29 ЗАО «Подъемные машины» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.liftingmachine.ru.

30. Игумнов, С.Г. Стропальщик. Грузоподъемные краны и грузозахватные приспособления / С.Г. Игумнов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 64 с.

31 Adams: the multibody dynamics simulation solution [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.mscsoftware.com/product/adams.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

РЕЦЕНЗИЯ

Магистрлік диссертация
(жұмыс түрінің атауы)

Әбілда Дәурен Қайратұлы
(білім алушының аты-жөні)

6M071300 - "Көлік, көлік техникасы және техникасыздық"
(шифр және мамандық атауы)

Тақырыбы: Гидромашиналар құрамына кіндік жасау және кіндік параметрлерін анықтау

Орындалды:

- а) 62 графикалық суреттен;
б) 84 бет түсіндірме жазбадан тұрады.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУЛЕР

Магистрлік диссертацияға кіндік ескерткіш
берілген:
1) диссертацияның кейбір бөлімдерін графикалық және мәтіндік жазбалармен қамтамасыз ету;
2) суреттер мен формулалардағы кейбірі АЕС
бейнесін анықтау.

Жұмыстың бағасы

Көрсетілген бұл ескерткіштерге қарамастан
магистрлік диссертацияға және жасаған баға
байланысты: Автор Әбілда Д.Қ. - "Техника ғылымдары"
ның магистрі" - деген ақпараттың атаққа байланысты
бағасына өзгеріс енгізілмеген.

Рецензент

Тех. ғылым. докторы, профессор
М.С. Кульгильдинов

(қолы)

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Начальник ОУП

05

2019 ж.



Ф КазҰТЗУ 706-17. Рецензия

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
СӨТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ

ПІКІРІ

Магистрлік диссертация

(жұмыс түрінің атауы)

Әбілға

Әзирей

Қайратұлы

(білім алушының аты-жөні)

64071300 - „Көлік, көлік техникасы және технологиялары“
(шифр және мамандық атауы)

Тақырыбы:

Гидравликалық құрал-жабдықтардың
және негізгі параметрлерін жасау

Әбілға Ә.Б.-ның магистрлік жұмысы гидравликалық
құрал-жабдықтардың гидравликалық параметрлерін
және негізгі параметрлерін, жасау, жасау, жасау
және негізгі параметрлерін, жасау, жасау, жасау
және негізгі параметрлерін, жасау, жасау, жасау
және негізгі параметрлерін, жасау, жасау, жасау

Магистрлік диссертацияда жасау, жасау, жасау
және негізгі параметрлерін, жасау, жасау, жасау
және негізгі параметрлерін, жасау, жасау, жасау
және негізгі параметрлерін, жасау, жасау, жасау

Магистрлік жұмыс мақалаларға сай
жасау, жасау, жасау, жасау, жасау, жасау
және негізгі параметрлерін, жасау, жасау, жасау
және негізгі параметрлерін, жасау, жасау, жасау

Ғылыми жетекші

Техн. ғылым. кандидаты

Ахмет

Ш.Д. Ахметова

(қолы)

«31»

05

2019 ж.

Отчет подобия



Университет:	Satbayev University
Название:	Гидроманипулятор құрылғысына инновация жасау және негізгі параметрлерін дәлелдеу
Автор:	Өбілда Дәурен Қайратұлы
Координатор:	Нұрбол Қамзанов
Дата отчета:	2019-05-27 10:07:58
Коэффициент подобия № 1: ?	0,2%
Коэффициент подобия № 2: ?	0,0%
Длина фразы для коэффициента подобия № 2: ?	25
Количество слов:	15 585
Число знаков:	130 145
Адреса пропущенные при проверке:	
Количество завершенных проверок: ?	92



К вашему сведению, некоторые слова в этом документе содержат буквы из других алфавитов. Возможно - это попытка скрыть позаимствованный текст. Документ был проверен путем замещения этих букв латинским эквивалентом. Пожалуйста, уделите особое внимание этим частям отчета. Они выделены соответственно. Количество выделенных слов 52

- >> Самые длинные фрагменты, определенные, как подобные
- >> Документы, содержащие подобные фрагменты: Из домашней базы данных
- >> Документы, содержащие подобные фрагменты: Из внешних баз данных
- >> Документы, содержащие подобные фрагменты: Из интернета

Детали отчета подобия

Фрагменты, найденные в документах базы данных отмечены красным цветом.
 Фрагменты, найденные в интернете отмечены в зеленый .
 Оранжевым цветом обозначены фрагменты, найденные в базе RefBooks.
 Фрагменты, найденные в базе данных Юридических актов отмечены синим фоном .

КІРІСПЕ

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Гидравликалық манипуляторлар қондырғылары олардың әмбебаптығына байланысты кеңінен қолданылады. Олар әртүрлі аспаптық жабдықтармен пайдаланылады: ілгектер, қысқыштар, электр магниттері, құбырларға арналған сабы, бошкелер, ағаштар, адамдарды көтеру үшін блоктар және басқалар; жүк тракторларына, борттық автокөліктерге, жартылай тіркесімдерге, теміржол қондырғыларына және жүзгіш жабдығына орнатылады. Кран-манипуляторлар көмегімен құрылыс алаңдарына материалдар жеткізеді, тасу-түсіру, тасымалдау және қоймалаулы механизациялау, құбырларды, жолдарды, ғимараттар мен құрылыстарды салуды жүзеге асырылады; олар шикізат пен минералды өндіруде, сондай-ақ төтенше жағдайлардың салдарын жою үшін қолданылады.

Гидравликалық манипуляторларды өзірлеу, жетілдіру және жөндеу кезінде қолданылатын негізгі құралдардың бірі металқұрылымның динамикалық беріктігін талдау болып

file:///C:/Users/User/AppData/Local/Temp/____.html

1/23