

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

**VİBRASIYALI QURĞULAR ÜÇÜN
ÇOXFUNKSIYALI PYEZOELEKTRİK
ÇEVİRİCİLƏRİN TƏDQIQI**

İxtisas: 3340.01 –Elektrotexniki sistemlər və komplekslər

Elm sahəsi: Texnika elmləri

İddiaçı: **Könül Ramiz qızı Hacıyeva**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün
təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2025

Dissertasiya işi Sumqayıt Dövlət Universitetinin “Energetika” kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər:

texnika elmləri doktoru, professor
Mehman Hüseyn oğlu Həsənov

Rəsmi opponentlər:

texnika elmləri doktoru, professor
Xəqani İmran oğlu Adullayev

fizika elmlər doktoru, professor
Elçin Əhməd oğlu Kərimov

texnika elmlər namizədi, dosent
Ləman Həsən qızı Həsənova

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.04 Dissertasiya şurası.

Dissertasiya şurasının
sədri:

texnika elmləri doktoru, professor
Nurəli Adil oğlu Yusifbəyli

Dissertasiya şurasının
elmi katibi:

texnika elmləri namizədi, dosent
Vahid Qara oğlu Fərhadov

Elmi seminarın
sədri:

texnika elmləri doktoru, professor
Rasim Əzim oğlu Səidov

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. İstismar olunan, layihələndirilən elektrotexniki avadanlıqların texniki vəziyyətinin təyin edilməsi üsullarından biri onların vibrasiya, temperatur parametrlərinin analizi və ölçülməsidir. Bu üsul işlənmiş detalların, birləşmələrin hərəkət dinamikasının, gücünün qarşılıqlı təsiri nəticəsində parametrlərinin dəyişməsinin təyin edilməsi, ona uyğun texniki qərarların çıxarılması və idarə olunmasıdır. Məlumdur ki, alət və işçi parçası arasında sürtünmə qüvvələri emal zonasında əhəmiyyətli temperatur qradienti yaradır, bu da alətin həddindən artıq istiləşməsinə, davamlılıq və işçi xüsusiyyətlərinin, o cümlədən dəzgahların vibrasiyasının dəyişməsinə səbəb olur. Dinamik temperatur dərəcəsinin dəyişməsi istiliyə davamlılığı və iş rejiminin dayanıqlılığı üçün digər proseslər alətin etibarlılığını, davamlılığını maksimal dərəcədə artırır. Titrəmə və ya vibrasiya prosesinin ölçülməsi, elektrotexniki dəzgahlarda, robotlarda əmələ gələn parametrlərin ölçülməsinə imkan verir. Nəticədə, dinamiki sistemdə növbəti idarə etmə məqsədi ilə aşınma rejimləri, minimal təsirlərin meyillənməsi, titrəmə və vibrasiyaları qəbul olunmuş normativlərə uyğun idarə olunmasını təmin edir.

Vibrasiya diaqnostikası dəzgahların mexaniki sistemlərində qüsurların inkişafına nəzarət etməyə imkan verir, hərəkətdiricilərin və alətlərin bəzi elektriki, mexaniki qüsurlarını müəyyən edir, emal rejimlərinin etibarlılığı, dəqiqliyi ilə bağlı səmərəsiz nöqtəyi-nəzərləri aşkar edir. Bu problemin həlli vibrasiyanın analizi və monitorinqi üsullarından istifadə etməklə asanlıqla effektiv şəkildə həyata keçirilə bilər.

Hər hansı bir emal avadanlığında mexaniki vibrasiya yaradan, avadanlığın vaxtından əvvəl sıradan çıxmasına, alətin aşınmasının artmasına, istehsal olunan hissələrin keyfiyyətinin azalmasına səbəb olan hərəkət edən və ya fırlanan elektrotexniki, elektromexaniki qurğular var.

Vibrasiya dərəcəsi ilə əlaqədar seçim parametrlərinin qeydiyyata və təhlili həm bütün avadanlığın, həm də onun şərtlərinin cari texniki vəziyyətini müəyyən etməyə, həmçinin müxtəlif

qüsurların diaqnostikasını aparmağa, yaranacaq problemləri müəyyənləşdirməyə imkan verir.

Seçim parametrlərinin qeydiyyatı və təhlili məqsədilə müxtəlif dərəcəli vibrasiyaların, texniki sistemlər və komplekslər üçün pyezoelektrik çevirici və çeviricilərin optimal sintezi məsələsinin həll edilməsi, bu qurğuların qabarit ölçülərinin, elektriki, texniki, konstruktiv və istismar parametrlərinin yaxşılaşdırılması, yüksək dəqiqlikli yeni modellərinin hazırlanması aktual elmi texniki məsələdir.

Yuxarıda qeyd olunanları ümumiləşdirərək demək olar ki, hazırda vibrasiyalara nəzarət sistemlərindən və onların 3D printerlərə, müasir yüksək dəqiqlik tələb olunan sahələrə geniş tətbiqi, bu qurğuların elektriki, texniki, konstruktiv və istismar parametrlərinin və xarakteristikalarının yaxşılaşdırılması həm elmi nöqteyi-nəzərdən, həm də istehsalat sahələri üçün vacib və aktualdır.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Dissertasiya işində tədqiqat obyektı vibrasiyalı elektrotexniki və elektromexaniki qurğularda, predmeti isə vibrasiyalara nəzarət sistemlərində pyezoelektrik çeviricilər əsasında yaradılmış yeni elektromexatron əsaslı elektrotexniki sistemlərdir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. Dissertasiya işinin məqsədi vibrasiyalı elektrotexniki cihazlarda qeyri-xətti göstəriciləri nəzərə almaqla, texniki, konstruktiv, istismar parametrlərinin tədqiqi əsasında xarakteristikalarının yaxşılaşdırılması üçün yeni çoxfunksiyalı çeviricilərin, yeni nəsil 3D printer sistemlərinin yaradılması və modellərinin işlənib hazırlanmasından ibarətdir.

Tədqiqat metodları. Dissertasiya işində dinamik analoqiya metodundan, pyezoeffektivlik nəzəriyyəindən, diferensial tənliklər nəzəriyyəindən, Laplas çevirmələrindən, qeyri xətti elektrik nəzəriyyəindən, Qraf metodundan və s. istifadə edilmişdir.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar. Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar aşağıdakılardır:

1. Pyezoelektrik çeviricilərin iş mexanizminin təsviri və fiziki modellərinin qurulması;

2. Aparılmış analizlər nəticəsində vibrasiyalara nəzarət üçün pyezoelektrik çeviricilərin yeni modelinin sintezi;

3. Hazırlanmış çeviricinin işləmə rejimlərinə uyğun olaraq mexaniki rəqslərin təsirindən yaranan dəyişmələrin pyezoelektrik çeviricinin çıxışındakı gərginlikdən asılılığının təyini və kompüter analizi;

4. Təklif olunan pyezoelektrik çeviricinin və 3D printerin idarə olunması və təcrübi modellərinin tərtibi;

Tədqiqatın elmi yeniliyi. Dissertasiya işində alınmış elmi yeniliklər elektrotexniki qurğularda vibrasiyalara nəzarət edən pyezoelektrik çeviricilərin və onların tətbiqi ilə yeni 3D printerin elektriki, texniki, konstruktiv, istismar parametrlərinin və xarakteristikalarının yaxşılaşdırılmasına imkan verir və aşağıdakılardan ibarətdir:

1. Elektromexaniki analogiya əsasında pyezoelementlə sistem arasında yaranan friksion kontaktı zamanı qeyri-xəttiliyi və itkiləri nəzərə almaqla, pyezoelektrik çeviricilərin hərəkətlərinin fiziki prinsiplərini əks etdirən ekvivalent sxem işlənilib hazırlanmışdır.

2. Müxtəlif mürəkkəb sərhəd şərtlərini nəzərə almaqla pyezoelektrik çeviricilərdə keçid prosesləri tədqiq edilmişdir. Pyezoelementin istənilən nöqtəsində cərəyan və gərginliyə uyğun düşən və əks olunan dalğaların modeli, diskret çevirmələrindən istifadə etməklə qeyd olunan dalğalar üçün rekurrent ifadələr alınmışdır.

3. Təklif olunan riyazi modeli pyezoelektrik çeviricilər üçün istifadə olunan pyezoelementlərdə dalğa proseslərini müxtəlif sərhəd şərtləri daxilində tədqiq olunmuş və itkiləri nəzərə almaqla model təklif olunmuşdur.

4. Təqdim olunan 3D printerin çap ucluğunun “nöqtədən-nöqtə”yə keçid sürətinin təyin olunma sisteminin qurulmasının riyazi modeli təklif olunmuşdur. 3D printerin Markov qrafı əsasında etibarlılıq göstəriciləri təyin olunmuşdur.

5. Real vaxt rejimində avadanlığın vibrasiyasının monitorinqini həyata keçirməyə, vibrasiyanın spektral təhlilini aparmağa, analiz üçün signalı qeyd etməyə imkan verən texniki aparat və proqram kompleksi yaradılmışdır.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti. Vibrasiyalı qurğular üçün çoxfunksiyalı pyezoelektrik çeviricilərin sintezi

məsələləri tədqiq olunmuş, vibrasiya vəziyyətini, diaqnostika və nəzarətini yerinə yetirən elektrotexniki sistemlərdə istifadəsinin mümkünlüyü təcrübi olaraq sınaqdan keçirilmişdir. Təklif olunan metodlar əsasında 3D pinterin modeli yaradılmışdır.

Müəllifin şəxsi töhfəsi. Dissertasiya işinin nəticələri müəllif tərəfindən şəxsən alınmışdır. Əsas elmi nəticələrin tətbiqi müəllifin iştirakı ilə yerinə yetirilmişdir.

İşin nəticələrinin həyata keçirilməsi və tətbiqi. Vibrasiyalı qurğular üçün çoxfunksiyalı pyezoelektrik çeviricilərin tədqiqi və sintezi zamanı alınmış elmi və təcrübi nəticələr sənaye müəssisəsində texnoloji avadanlıqların vibrodiaqnostika aparılması zamanı istifadə oluna bilər. Eyni zamanda dissertasiya işinin elmi və metodiki yenilikləri Sumqayıt Dövlət Universitetinin “Mühəndislik” fakültəsinin “Energetika” kafedrasında aparılan elmi-tədqiqat və tədris prosesində, eləcə də metodiki işlərin və dərslərinin tərtibində geniş istifadə edilmişdir. Alınmış nəticələrin yuxarıda göstərilən tədris müəssisəsində tətbiqi müvafiq aktla təsdiq edilmişdir.

Dissertasiya işinin aprobasiyası. Dissertasiya işində əldə edilmiş əsas elmi-nəzəri, praktiki nəticələr beynəlxalq və respublika səviyyəli konfranslarda, simpoziumlarda, seminarlarda məruzə edilmiş və müzakirə olunmuşdur:

-Azərbaycan xalqının Ümummilli Lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 90 illiyinə həsr edilmiş “Gənc Tədqiqatçıların I Beynəlxalq Elmi Konfransı ” 25-26 aprel 2013, Bakı, Azərbaycan;

-Azərbaycan Texniki Universiteti: İnformasiya və kommunikasiya texnologiyalarının müasir vəziyyəti və inkişafı perspektivləri beynəlxalq elmi-texniki konfransı, 23-25 Noyabr, Bakı 2015;

-XМеждународная научно-практическая конференция молодых ученых. Актуальные Проблемы Науки и Техники - 2017, УФА. Издательство «Нефтегазовое дело» 2017 ;

-Современные средства связи XII международной научно-технической конференции 19-20 октября 2017 года Минск, Республика Беларусь ;

-Tətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri Beynəlxalq

Elmi Konfransı 24-25 may 2018, Sumqayıt;

-Современные средства связи XIII Международной научно-технической конференции 18-19 октября 2018 года Минск, Республика Беларусь ;

-Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: IV Национальной научно-практической конференции 6-7 декабря 2018 года Казан, КГЭУ;

-E3S Web Conferences 124, 03004 DOI:International Scientific and Technical Conference SES-Kazan State Power Engineering University Peter The Great Saint Petersburg Polytechnic University. Kazan 18-20 September, 2019

-Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: V Национальной науч.-практ. конф. Казан 12-13 декабря 2019 г. КГЭУ;

-Şəxsiyyət, Cəmiyyət, Dövlət: Qarşılıqlı münasibətlərə müasir yanaşmalar” mövzusunda Respublika elmi konfransının materialları 6-7 dekabr 2019-cu il Mingəçevir Dövlət Universiteti ;

-«Tətbiqi fizika və Energetikanın aktual məsələləri» II Beynəlxalq Elmi konfrans. Sumqayıt Dövlət Universiteti, Kazan Dövlət Energetika Universiteti 12-13 noyabr 2020;

-Современные инновации в технике и производстве II Международной научно-практической конференции, 28-29 октября 2021 г. Псков,

- Conference: II International Scientific Forum on Computer and Energy Sciences (WFCES-II 2021), 29 August, 2022, Almata, AIP Conference Proceedings **2656**,020021(2022);

-Информатика, управление и искусственный интеллект тезисы девятой Международной Научно-Технической конференции 11-13 мая 2022 года. Харьков və s.

-Tətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri III Beynəlxalq elmi konfrans Sumqayıt Dövlət Universiteti Kazan Dövlət Energetika Universiteti, 2022, 27-28 oktyabr;

-Enerji səmərəliliyi və yaşıl enerji texnologiyaları. Respublika elmi-texniki konfransı, 2022, 14-16 dekabr;

- Towards Industry 5.0 Selected Papers from ISPR2022, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer Nature, October 6-8, 2022, Antalya;

- Advanced Mathematical Models & Applications Jomard Publishing, 2024;

İşin nəticələrinin dərc olunması. Dissertasiya işinin nəticələri üzrə nüfuzlu elmi jurnallarda 8 məqalə, 15 beynəlxalq və respublika konfranslarında tezis materialları dərc olunmuş, 3 patent alınmışdır.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilat. Dissertasiya işi Sumqayıt Dövlət Universitetində yerinə yetirilmişdir.

İşin strukturu və həcmi. Dissertasiya işi giriş, 4 fəsil, nəticələr, istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısı və əlavələr olmaqla A4 formatlı 148 səhifə kompüter mətnindən ibarət olub, özündə 64 şəkil, 12 cədvəl, 147 adda istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısı birləşdirir. Dissertasiya işinin girişi A4 formatlı 10474 simvol (6 səhifə), 1-ci fəsil 46492 simvol (36 səhifə), 2-ci fəsil 25520 simvol (22 səhifə), 3-cü fəsil 28333 simvol (30 səhifə), 4-cü fəsil 36888 simvol (33 səhifə), nəticə 1486 simvol (1 səhifə), istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısı 23939 simvol (15 səhifə) təşkil etməklə, kompüter mətnindən ibarətdir. Dissertasiyadakı işarələrin sayı 175705-ə bərabərdir.

TƏDQİQATIN ƏSAS MƏZMUNU

Girişdə dissertasiya mövzusunun aktuallığı əsaslandırılmış, aparılmış tədqiqatların məqsədi və əsas vəzifələri şərh edilmişdir. İşin elmi yeniliyi və alınmış nəticələrin təcrübi əhəmiyyəti təqdim olunmuşdur.

Əldə olunmuş nəticələr, təklif və tövsiyələrin tədris prosesində və istehsalatda tətbiqinə dair məlumatlar verilmişdir.

Birinci fəsildə müasir elektrotexniki qurğular və sistemlər, elektronikanın və yüksəkdaşıqlıqlı müasir elektromexatron sistemlərdə çıxış parametrlərinin yaxşılaşdırılması üçün müxtəlif növ çeviricilərin, o cümlədən pyezoelektrik çeviricilərin kritik icmalı verilmiş, pyezoelektrik çeviricilərin təhlili aparılmışdır.

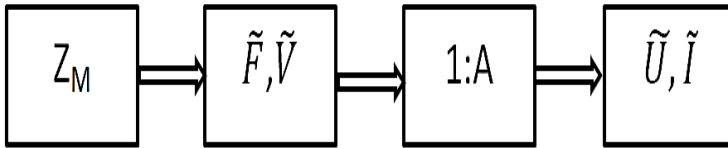
Azərbaycanda bu sahədə professor R.Q. Jaqubov, professor N.Fərzanə, professor T. Qurbanov müxtəlif məqsədlər üçün pyezoelektrik çeviricilər yaratmışdılar.

Pyezoelektrik mühərrik və aktuatorlar, pyezoelektrik hərəkət çeviriciləri Elektrotexniki sistem və komplekslərin müxtəlif qovşaqlarında, o cümlədən, qoruyucu qurğularda, müxtəlif məqsədli çeviricilərdə, çox saylı müxtəlif süzgəclərdə, ölçmə cihazlarında tətbiq olunmağına baxmayaraq hər bir sahənin işləmə rejim və şərtlərinə uyğun olaraq yeni müasir sistemlərdə tətbiqi məqsədəuyğundur. Pyezoelektrik çeviricilərin analizi göstərir ki, eyni zamanda, müasir elektrotexnika, nanotexnika, biotibbi və bir çox digər sahələrdə aparılan tədqiqat işləri ilə bərabər və tətbiqinin aktuallığı dissertasiya işində əsaslandırılmışdır.

Bu fəsildə kiçik və böyük mexaniki yerdəyişmələrin, vibrasiyaların, zədələnmədən öncəki proseslərin ölçülməsi, ölçmə nəticəsində alınan parametrlərə uyğun texniki qərarların qəbul olunması, qərarlara uyğun idarə olunması üçün yeni pyezoelektrik çeviricisi təklif olunmuş və vibrasiyaların amplitudasına uyğun mexaniki rəqslərin elektriki rəqslərə çevrilməsi, ona uyğun sistemin idarə olunması məqsədi ilə pyezoelektrik yerdəyişmə çeviricilərin fiziki modelinin qurulmasına baxılmışdır.

Pyezoelektrik çeviricinin işi zamanı pyezoelementlə elektrotexniki qurğunun mexaniki qarşılıqlı əlaqə və sərbəst hərəkəti zamanı, yəni friksional kontaktın düzləndici xüsusiyyətlərini müəyyən edərkən $0 \leq t \leq T/2$ və $T/2 \leq t \leq T$ intervallarında pyezoelementə çeviricinin təsiri müxtəlif ola bilər. Göstərilən periodlarda alınan siqnallar qeyri-xətti proseslərdir və qoyulan məsələnin həlli üçün müxtəlif nəzəriyyədən istifadə olunur. Qurğu işləməyən zaman, pyezoelementlə qurğu arasında heç bir mexaniki əlaqə olmayacaqdır və bu halda çıxışda siqnalın səviyyəsi $I = 0$ halına uyğun olacaqdır. Yuxarıda qeyd olunanlara əsasən pyezoelektrik çeviricinin iş prinsipini əks etdirən ümumi struktur sxemi şəkil 1-də göstərilmişdir. Burada Z_m – mexaniki müqavimət, F –mexaniki çıxışda əmələ gələn həyəcanlandırıcı güc, V –pyezoelementin elektrodlarının yerləşdiyi rəqslərin (titrəyişlərin) sürəti, A –mexaniki enerjini elektrik enerjisinə çevirən sistemin

transformasiya əmsalı, U , I – vibrasiyanın amplitud və sürətinə uyğun olaraq çıxışda alınan gərginlik və cərəyandır.



Şəkil 1. Pyezoelektrik çeviricinin işini əks etdirən ümumi blok sxemi

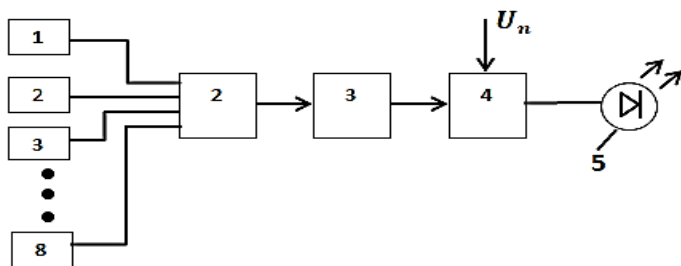
Pyezoelektrik hərəkət çeviricilərinin əsas xüsusiyyətlərini hesablamaq üçün sürtünmə kontaktının qeyri-xətti olduğunu nəzərə alaraq, müxtəlif üsullardan istifadə etmək olar. Belə metodlardan biri harmonik xəttləşdirmə üsuludur.

Pyezoelektrik çeviricilərin tətbiq sahəsindən asılı olaraq dinamikasının öyrənilməsi üçün harmonik xəttləşdirmə metodundan istifadə, pyezoelement və qurğunun mürəkkəb konfigurasiyasının pyezoelektrik çeviricisinin öyrənilməsinə, həmçinin pyezoelektrik çeviricilərin qeyri-xətti qarşılıqlı təsir və itkilərini nəzərə almağa imkan verən ekvivalent sxem tərtib olunmuşdur.

II fəsildə vibrasiyalara nəzarət üçün proqramla idarə olunan pyezoelektrik çeviricilərin yeni modeli yaradılmışdır. Tətbiq sahələrindən və qurğuların konstruksiyasından asılı olaraq pyezoelektrik çeviricilər müxtəlif formalı monopyezoelementdən istifadə edilir.

Bu elementlər sürətlə dəyişən kəmiyyətləri ölçmə qabiliyyətinə, mexaniki rəqslərinin elektrik yüklərinə yüksək dəqiqliklə çevrilməsinə, mexaniki gərginliyin elektrik yüklərinə çevrilməsi zamanı yüksək dəqiqliklə (10^{-4} – 10^{-6} və daha yüksək) təyin etməklə həyata keçirilir.

Qeyd olunan üstün cəhətlərini nəzərə alaraq tərəfimizdən müxtəlif növ titrəməyə nəzarət olunan qurğularda tətbiqi nəzərdə tutulan yeni pyezoelektrik çeviricilərdən ibarət nəzarət sistemi və onun işləmə prinsipi təklif olunur (şəkil 2).

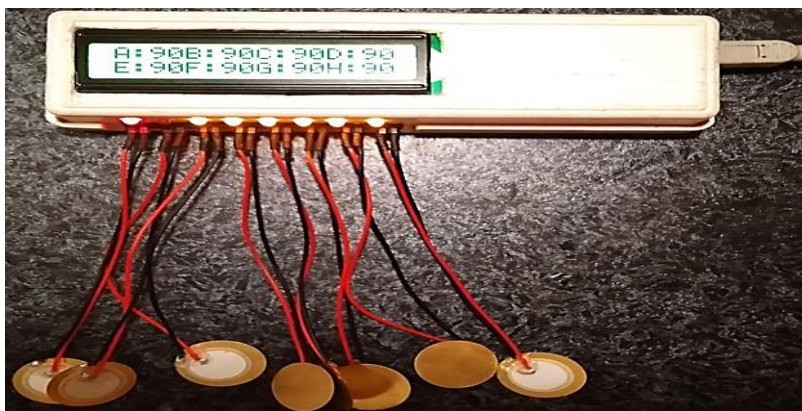


Şəkil 2. Pyzoelektrik çeviricilərin ümumi struktur sxemi.

Şəkil 2-də nəzarət sistemi 8 ədəd pyzoelektrik çeviricidən -1, gücləndirici summatordan - 2, gərginlik çeviricisindən - 3, müqayisə sxemindən – 4, yoxlayıcı işıq diodundan - 5 ibarətdir.

Təqdim olunan pyzoelektrik çevirici qurğusunun 8 ədəd dairəvi formalı pyzeoçeviricidən istifadə edilməklə yığılmış modeli şəkil 3-də öz əksini tapmışdır.

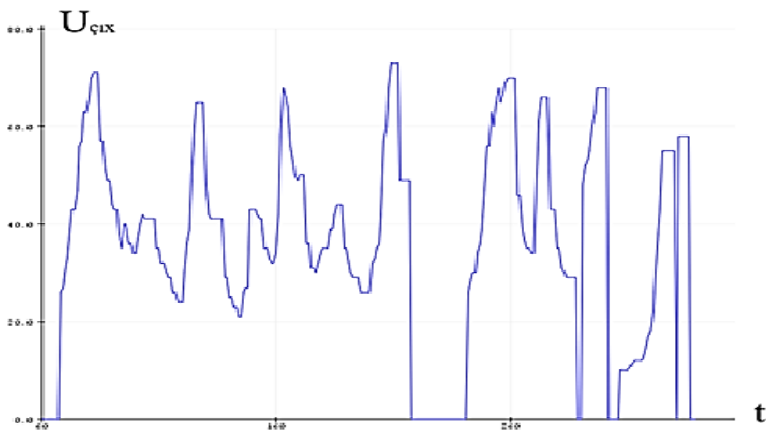
Təqdim olunan pyzoelektrik çevirici qurğusu aşağıdakı kimi işləyir. Qurğunun vibrasiyası nəzərdə tutulmuş müxtəlif dəzgahlarda bağlandığı hissələrin vibrasiyası zamanı ona bərkidilmiş pyzoelektrik lövhələrdə mexaniki rəqslər birbaşa pyzeoeffekt nəticəsində elektrik gərginliyinə çevrilir.



Şəkil 3. Vibrasiyaları qeyd edən yeni pyzoelektrik çevirici qurğunun təsviri sxemi.

Çıxışda alınan dəyişən (alternativ) gərginliyin səviyyəsi aşağı olur və çeviricinin gücləndiricinin summatorunun girişinə daxil olur. Bu gərginliklər əmliyyat gücləndiricisinə quraşdırılmış summator gücləndiricisində toplanır və gücləndirilir. Summatorun çıxışında gücləndirilmiş gərginlik, gərginlik çeviricinin girişinə verilir. Dəyişən gərginlik çeviricidə sabit gərginliyə çevrilir. Gərginlik çeviricisinin çıxışındakı gərginliyin səviyyəsi masada yerləşən bütün çeviricilərdən gələn siqnalların orta qiymətinə uyğun gəlir.

Bu gərginlik müqayisə dövrəsinə daxil olur, bu dövrənin ikinci girişinə U_e gərginliyi verilir. Gərginliklərin səviyyəsi qurğuda mövcud olan vibrasiya səviyyəsinə uyğun olmalıdır. Vibrasiya səviyyəsi müqayisə dövründə çıxışında icazə verilən gərginlikdən artıq olduqda, işıq diodunun yanması üçün gərginlik yaranır və bu onu göstərir ki, hazırlanan və ya cilalalan hissənin keyfiyyət göstəricilərində dəyişmələr mövcuddur. Qeyd olunan proseslərə müqayisə sxeminin çıxışına qoşulmuş kompüterlə nəzarət etmək olar və kompüterə yazılmış proqram əsasında prosesin normallaşması üçün gərginliyin idarə edilməsinə baxıla bilər.



Şəkil 4. Mexaniki təsirin nəticəsində müqayisə sxeminin çıxışındakı gərginlik dəyişmələrinin asılılıq əyrisi.

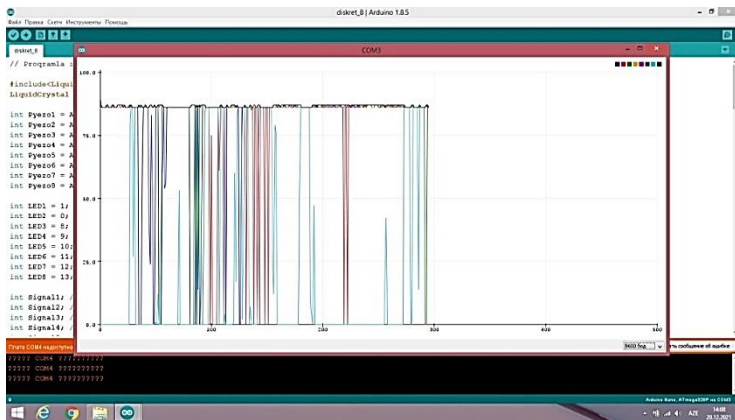
Şəkil 4. -də mexaniki təsirin nəticəsində müqayisə sxeminin çıxışındakı gərginlik dəyişmələri öz əksini tapmışdır və dəyişmələr

mexaniki rəqslərin təsiri nəticəsində vibrasiya dəyişmələrini özündə ehtiva edir.

Burada pyzeoeləkririk çeviricinin çıxışından daxil olan siqnalın səviyyəsi dəzğahın ilkin “etalon” siqnalın səviyyəsi ilə müqayisə olunur və burada iki hala nəzər yetirək:

- pyzeoeləkririk çeviricinin çıxışından daxil olan siqnalın səviyyəsi ilkin “etalon” siqnalın səviyyəsi ilə eynidir ($u_c = u_e$), burada u_c çeviricinin çıxışındakı siqnalın amplitudası, u_e isə ilkin “etalon” siqnalın səviyyəsi olub, bu hal şərtlərə uyğun normal halı göstərir;

- pyzeoeləkririk çeviricinin çıxışından daxil olan siqnalın səviyyəsi “etalon” siqnalın səviyyəsindən böyükdür ($u_f > u_e$). Bu halda artıq qurğunun iş prosesində xətlər ola bilər və hazırlanan elementin ölçülərində qeyri dəqiqliklər mövcud ola bilər və bu halda sistem işini dayandırılır (şəkil 5).



Şəkil 5. Vibrasiya zamanı pyzeoeləkririk çeviricinin çıxışındakı gərginliyin kompyuter qrafiki

Beləliklə, sistem daimi avtomatik idarəetmə nəzarəti altında yerləşir. Sistemin işinin dəqiqliyi etalon gərginliyinin amplitud qiymətinin istismar zamanı vibrasiyanın amplitudasına uyğun gərginliyin müqayisəsinə uyğun təyin edilir.

Qeyd olunan işləmə şərtlərinə uyğun bütün iş prosesi kompüter vasitəsi ilə məsafədən və ya birbaşa sistemin yanında izlənilə bilər.

Burada pyezoelektrik çeviricinin elektrik idarəetmə sxemi tərtib olunmuş, onun texniki xarakteristikası təyin edilmiş, eyni zamanda arduino elementi üzərindən idarəetmə proqramının tərtibi ardıcılığı təqdim olunmuş, beləliklə, qeyri-səlis təsirlərə uyğun olaraq təqdim olunan çeviricinin bütün nəticələri ekranda yüksək dəqiqliklə təsviri əks edilmiş və xarici fiziki təsir, vibrasiyalara və giriş signalının fiziki dəyişikliklərinə həssas bir sistem yaradılmışdır.

Bu fəsilə həmçinin çoxpotlu pyezoelektrik çeviricinin yaradılmasında “Arduino nano” elementlərindən istifadə edilmiş, idarə olunma proqramı tərtib edilmiş, çeviricinin çıxışında vibrasiya dəyişmələrinin təsirinə uyğun elektrik signalının dəyişmə periodunun, amplitud səviyyəsinin, tezlik dəyişmələrinin kompüter ekran təsviri alınmışdır.

Üçüncü fəsilə paylanmış parametrlı pyezoelektrik çeviricilərdə dalğa proseslərinin riyazi modelinin qurulması məsələlərinə baxılmışdır. Bunun üçün pyezoelektrik çeviricilərin iş rejiminə uyğun ekvivalent sxemi tərtib edilmişdir.

Pyezoelektrik çeviricilərdə keçid prosesi müxtəlif mürəkkəb sərhəd şərtlərinə əsasən araşdırılmış, Dəlamber üsulundan istifadə etməklə, pyezoelementin istənilən nöqtəsində olan gərginlik və cərəyanlar düşən və əks olunan dalğaların cəbri miqdarı şəklində təsvir edilmişdir. Pyezoelementin işçi vəziyyətinə uyğun ayrı-ayrı dalğaların hər biri üçün təkrar əlaqələri əldə etmək məqsədi ilə Laplas çevrilməsi tətbiq edilmişdir.

Alınan modellərin üstünlükləri - yığcam formada onların prototiplərinin xüsusiyyətlərinin öyrənilməsinə, məsələn, yerli dalğa prosesinin ədədi hesablanmasına və davamlılığına imkan verir. n – dərəcəli xətlərin sonunda yerləşdirilmiş elementlərdə müəyyən şərtlər daxilində pyezoelektrik çeviricilərdə dalğa proseslərinin öyrənilməsinə tətbiq edilən riyazi model təklif olunmuşdur. Pyezoelektrik çeviricilərin iş prinsipi birbaşa və əks pyezoelektrik effektə əsaslanmaqla pyezoelektrik elementin uzunluğu boyunca uzununa və eninə rəqs etmənin təsirlənməsi başa düşülür.

Paylanmış parametrlı mikropyezoelektrik çeviricilərin tədqiqində Furiye metodu və operator üsulu ilə Laplas çevrilməsinə əsaslanan riyazi metodları tətbiq edilmişdir.

Müqavimətə yüklənmiş pyezoelektrik çeviricilərdə keçid proseslərini istifadə edilən gərginlik mənbəyinə $e(t)$ və əksinə qoşulduqda müqavimət r -ə yüklənmiş itkisiz pyezoelektrik çeviricilərinin ümumiləşdirilmiş ekvivalent sxemini təsvir etmək olar və burada L_0 və C_0 – müvafiq olaraq pyezoelektrik elementin vahid uzunluğuna düşən induktivlik və tutumu kimi qəbul etmək olar (R_0, G_0 – itkisiz pyezoelektrik çeviricilərdə müqavimət və keçiricilik sıfıra bərabər olur).

Bu fəsilə müqavimətə yüklənmiş pyezoelektrik çeviricilərin ekvivalent sxemi qurulmuş, ekvivalent sxem əsasında pyezoelektrik çeviricilərdə dalğa proseslərinin riyazi modelini qurmaq üçün iş prinsipinə uyğun aşağıdakı sərhəd şərtləri qəbul edilmişdir:

Başlanğıc sərhəd şərtləri

$$(x=0), u(0,t)=e(t) \quad (1)$$

Gərginliyin ifadəsini düşən və əks olunan dalğaların cəmi şəklində ifadə olun ¹:

$$u(x,t)=u'(x,t)+u''(x,t) \quad (2)$$

$0 \leq t \leq \frac{l}{c}$ intervalına nəzər yetirək (c – dalğanın sürəti), düşən

dalğa sona çatana qədər $u''(x,t)=0$ olduqda,

$$u(x,t)=u'(x,t)=e(t-\frac{x}{c}), \quad (0 \leq t \leq \frac{l}{c}) \quad (3)$$

$t = \frac{l}{c}$ müddətdə düşən dalğa pyezoelementin son nöqtəsinə çatır.

Sondakı sərhəd vəziyyəti:

$$u(l,t)=ri(l,t) \quad (4)$$

olacaqdır. Cərəyan və gərginliyi düşən və əks olunan dalğaların cəmi şəklində göstərək:

$$u'(l,t)+u''(l,t)=r[i'(l,t)-i''(l,t)] \quad (5)$$

İtkisiz pyezoelementlər:

$$i'(l,t)=\frac{u'(x,t)}{\rho}, \quad i''(x,t)=\frac{u''(x,t)}{\rho} \quad (6)$$

¹ В.Л.Бидерман Теория механических колебаний. Москва 1980. стр.405

burada ρ - dalğa müqaviməti $\rho = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$.

(6) və (5) formullarını yerinə qoyaraq tapırıq:

$$u''(l, t) = \frac{r - \rho}{r + \rho} u'(l, t) = k \cdot u'(l, t) \quad (7)$$

$$i''(l, t) = k i'(l, t) \quad (8)$$

burada k – əks olunma əmsəlidir: $k = \frac{r - \rho}{r + \rho}$.

Başlanğıc əks olunan dalğa ($x = 0$) zamandan asılı olaraq düşən dalğaya nisbətdə gecikir $\tau = \frac{2l}{C}$. Bunu nəzərə alaraq baxdığımız (3) və (7) düsturlarının təkrarlanma əlaqəsini yaza bilərik:

$$u'(0, t) = e(t) - k u'_H(t - \tau) \quad (9)$$

Ölçüsüz zamana keçək:

$$t = (n + \varepsilon) \cdot \tau \quad (10)$$

burada n – tam saydır $n = 1, 2, 3, \dots$, $\varepsilon \in [0, 1]$:

$$\bar{u}'_H(n + \varepsilon) = \bar{e}(n + \varepsilon) - k u'_H(n - 1 + \varepsilon) \quad (11)$$

Bu ifadəyə Laplasın diskret çevrilməsini tətbiq edərək (LDÇ), əks olunmuş sahədə xəttin başlanğıc nöqtəsindəki gərginlik üçün aşağıdakı tənliyi alırıq²:

$$U_H^*(q, \varepsilon) = E^*(q, \varepsilon) - k \cdot e^{-q} U_H^*(q, \varepsilon),$$

və ya

$$U_H^*(q, \varepsilon) = \frac{E^*(q, \varepsilon)}{1 + k e^{-q}} \quad (12)$$

Analoji olaraq, sonda (5) sərhəd şərtinə görə əks olunan dalğa üçün

$$U_k^{**}(q, \varepsilon) = \frac{k E^*(q, \varepsilon)}{1 + k e^{-q}} \quad (13)$$

² Stewart, James. *Calculus : Early Transcendentals* 2022-06-10 7th ed., Brooks/Cole, Cengage Learning, 2012. Chapter 14: Partial Derivatives. p. 908

alırıq.

Pyezoelektrik elementin istənilən nöqtəsi üçün (12) və (13)–ü nəzərə alaraq gərginlik və cərəyan üçün aşağıdakı ifadələri alırıq:

$$U^*(q, \varepsilon) = U_H^*(q, \varepsilon - \gamma) + e^{-q} U_k^{**}(q, \varepsilon + \gamma - 0,5), \quad (14)$$

$$\gamma \leq \varepsilon < 0,5 - \gamma$$

$$I^*(q, \varepsilon) = \frac{1}{\rho} \cdot [U_H^*(q, \varepsilon - \gamma) - U_k^{**}(q, \varepsilon + \gamma - 0,5)],$$

$$0,5 - \gamma < \varepsilon \leq 1 \text{ u } \varepsilon \geq \gamma$$

əgər

$$I(q, \varepsilon) = \frac{1}{\rho} [U_H^*(q, \varepsilon - \gamma) - e^{-q} U_k^{**}(q, \varepsilon + \gamma - 0,5)], \quad (15)$$

$$\gamma \leq \varepsilon < 0,5 - \gamma$$

Misal üçün pyezoelementin sonu açıq ($k=1$) və qısaqapalı ($k=-1$) olduqda onun sabit $e(t) \equiv E$ mənbəyinə qoşulmasına baxaq. Bu vəziyyətdə

$$E^*(q, \varepsilon) = \frac{E \cdot e^q}{e^q - 1} \quad (16)$$

(16) düsturundan istifadə edərək (12) ifadəsini aşağıdakı kimi yazmaq:

$$U_H^*(q, \varepsilon) = E \cdot \frac{e^q}{(e^q - 1)(1 + k e^{-q})} \quad (17)$$

Bu ifadəyə orijinalı uyğun gəlir:

$$u_H'(n + \varepsilon) = E \cdot [1 - k + k^2 - k^3 + \dots + (-1)^n k^n] \quad (18)$$

(13) ifadəsi nəzərə alınmaqla (16) aşağıdakı kimi alınır:

$$U_k^*(q, \varepsilon) = E \cdot \frac{k \cdot e^q}{E(e^q - 1) \cdot (1 + k \cdot e^{-q})} \quad (19)$$

Bu ifadəyə orijinalı uyğun gəlir:

$$u_k''(n + \varepsilon) = kE \cdot [1 - k + k^2 - k^3 + \dots + (-1)^{n-1} k^{n-1}] = E[k - k^2 + k^3 + \dots + (-1)^{n-1} k^n] \quad (20)$$

(14) ifadəsinə görə pyezoelementin başlanğıc nöqtəsi üçün

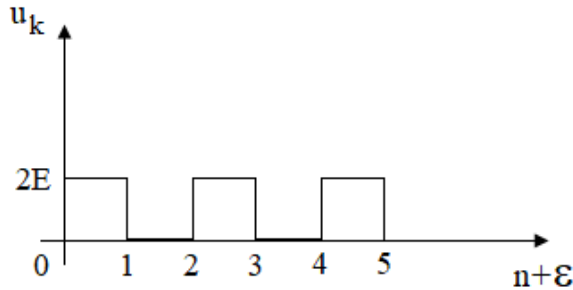
$$u(n, \varepsilon) = E \cdot [1 - k + k + k^2 - k^2 + k^3 + \dots + (-1)^n k^n + (-1)^{n-1} k^n] = E \quad (21)$$

Pyzeoelementin sonundakı nöqtələr üçün:

$$u(n, \varepsilon) = E \cdot [1 - k + k + k^2 - k^2 + \dots + (-1)^{n-1} k^{n-1} + (-1)^{n-2} k^{n-1} + (-1)^{n-1} k^n] \\ = E[1 - (-1)^n k^n] \quad (22)$$

olacaqdır.

(19) ifadəsindən görünür ki, sonun açıq vəziyyətdə $u_k = 0$ olduqda n - tək ədəd ($k=1$) olduqda, $u_k = 2E$ olduqda isə n - cüt ədəd olur (şəkil 6).



Şəkil 6. Pyzeoelementin açıq sonunda gərginliyin asılılığı

Sonun qapalı vəziyyətində (19) ifadəsindən görünür ki, $u_k = 0$ olur (vibrasiya olmadığı halda).

(15) ifadəsindən görünür ki, cərəyan xəttin başlanğıc nöqtələrində aşağıdakı kimi olur:

$$i(n, \varepsilon) = \frac{E}{\rho} \cdot [1 - k - k + k^2 + k^2 - (-1)^n k^n - (-1)^n k^n] = \frac{E}{\rho} \cdot [1 - 2(k - k^2 + (-1)^n k^n)] \quad (23)$$

Nöqtənin sonunda isə:

$$i(n, \varepsilon) = \frac{E}{\rho} \cdot [1 - k - k + k^2 + k^2 + \dots + (-1)^{n-1} k^{(n-1)} - (-1)^{n-2} k^{n-1} + (-1)^n k^n = \\ = \frac{E}{\rho} \cdot \{1 - 2[k - k^2 + \dots + (-1)^{n-1} k^{n-1}] + (-1)^n k^n\} \quad (24)$$

olacaqdır.

Bu fəsildə eyni zamanda R, L, C - elementləri ilə yüklənmiş pyzeoelektrik çeviricilərin ekvivalent sxemi əsasında əks olunan dalğanın sonunda təsviri ifadəsinin, pyzeoelementin ixtiyari nöqtəsində

gərginliyin təsviri və qrafiki qurulmuşdur.

Eyni zamanda bu fəsilə təklif olunan xətti pyezoelektrik mühərrikin silindrik formalı pyezoelementinin uzunmüddətli işləməsi zamanı dağılmasının riyazi modeli qurulmuşdur. Belə ki, xətti mikropyezoelektrik mühərrikin konstruktiv olaraq pyezoelementi silindrik formada olub, silindrin dairəsi və hündürlüyü üzrə ayrılıqda uzununa dalğa ilə qidalandıran elektrodlardan ibarətdir. Silindrik pyezoelementin konstruksiyası elektrodları silindrin dairəsi üzrə eninə və hündürlüyü üzrə uzununa rəqslər yaradan elektrodlardan təşkil olunmuşdur. Eyniadlı elektrodlar bir yerdə birləşdirilərək yüksək rezonans tezlikli qida mənbəyinə qoşulur. Qida mənbəyinin rezonans tezliyi mexaniki rəqslərin rezonans tezliyinə uyğun olmalıdır.

Qeyd olunan xətti mikropyezoelektrik mühərrikin iş prinsipi hər iki rəqslərin birgə təsiri nəticəsində əldə olunur. Nəticədə hər iki mexaniki rəqslərin (hündürlüyə və eninə) nəticəsində silindrik pyezoelementin eyniadlı nöqtələri eyni zamanda iki növ rəqslərlə həyəcanlandırılır. Qeyd olunan prinsiplə işləyən xətti mikropyezoelektrik mühərrikinin silindrik formalı pyezoelementinin işləmə xarakteristikalarının, o cümlədən uzunmüddətli işləməsinin tədqiqatı pyezoelektrik mühərriklər üçün olduqca aktual məsələlərdəndir.

Göründüyü kimi hər iki halda iki rəqsdən istifadə olunursa, o cümlədən silindrin hündürlüyü boyunca uzununa dalğalarla həyəcanlandırılması eninə mexaniki rəqslərin amplitudunu 2-3 dəfə artırır. Lakin iş prosesindən asılı olaraq, peyzomühərriklərdə istifadə olunan silindrik pyezoelementlərdə əmələ gələn dartılmadan və burulmadan yaranan mexaniki gərginliklər öz qiymət və istiqamətini dəyişir. Buna görə də qiymətini zamandan asılı olaraq dəyişən xarici qüvvələrin hesabına yaranan gərginliklər dövrü gərginliklər adlandırılır.

Təcrübə göstərir ki, yüklənmənin ilk dövründə möhkəmliyi pozulmayan pyezoelementlərdə yüklənmə dövrlərinin sayı müəyyən qiymətə çatdıqda sına bilər, yəni pyezoelementin möhkəmliyi işləmə dövrlərinin sayından asılıdır.

Təkrar dəyişən mexaniki gərginliklərin təsiri altında işləyən pyezoelementlərin möhkəmlik həddi, gərginliklərin dəyişmədiyi haldakı möhkəmlik həddindən xeyli kiçik olur. Belə gərginliklərin təsiri

nəticəsində baş verən uzunmüddətli işləməsi nəticəsində dağılmasının mahiyyəti aşağıdakılardan ibarətdir:

-Pyezoelementlərin uzunmüddətli işləməsi nəticəsində dağılması hadisəsinin ən böyük gərginliklər əmələ gələn zonasında konstruktiv, struktur və ya texnoloji amillər nəticəsində adi gözlə görünməyən mikroçatlar yaranır;

-Gərginliklərin uzun müddət dəyişməsi ilə çatların kənarlarında yerləşən kristallar dağılmağa başlayır və yaranan bu çatlar içəriyə doğru dərinləşir;

-Dövrü gərginliklərin təsirindən çatların üzərindəki kristallar bir-birinə sürtünür və həmin səth hamarlaşır; Çatların tədricən böyüməsi nəticəsində kəsiyin sahəsi kiçilir və bununla əlaqədar olaraq gərginliyin qiyməti tədricən artır, gərginliyin qiyməti təhlükəli həddə çatdıqda pyezoelement ani olaraq sınır;

-Uzunmüddətli işləməsi nəticəsində baş verən dağılma hadisəsi, pyezoelementin molekul və kristallarının quruluşundan asılıdır. Ona görə də, adi hallarda qəbul edilmiş pyezoelementin həndəsi həcmünün tam dolu olması (pyezoelementlərin bütövlük fərziyyəsi) fərziyyəsindən, yorulma möhkəmliyinin şərhində istifadə etmək olmur və s.

Dövrü dəyişən gərginliklərin təsiri nəticəsində burulma deformasiyasına məruz qalan peyzokeramik pyezoelementlərin uzunmüddətli işləməsi nəticəsində dağılmasının hesablanması məsələsi, peyzomühərriklərin layihələndirilməsində aktual məsələlərdən hesab olunur. Müasir texnologiyaların inkişafı bu məsələlərdə yeni amillərin (səbəblərin) nəzərə alınmasını tələb edir. Burada əsas amillərdən biri pyezoelementlərin uzunmüddətli işləmədən zədələnməsi, yəni müxtəlif xarakterli defektlərin əmələ gəlməsi və toplanması hadisəsidir.

Pyezoelementlərdə zaman keçdikcə tədricən baş verən dağılma prosesi, onların uzunmüddətli möhkəmliliyi ilə əlaqədardır. Bu baxımdan dağılma prosesinin öyrənilməsi və tədqiqi ən aktual problemlərindən biri hesab olunur. Pyezoelementlərin möhkəmliyi bilavasitə peyzomühərriklərin pyezoelementində baş verən dağılma prosesinin xarakterindən asılıdır. Bu səbəbdən dağılma prosesinin öyrənilməsi bir zərurət kimi ortaya çıxır.

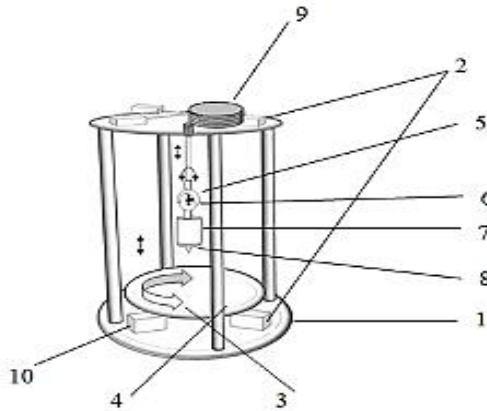
Dağılma prosesinə pyezoelementin quruluşu ciddi təsir göstərir. Bu səbəbdən dağılma mürəkkəb və qeyri sabit ola bilər. Həmçinin,

dağılma prosesi xarici amillərin təsirindən də ciddi olaraq asılıdır. Bunlar yüklənmənin xarakteri, istilik rejimi, səth effektləri və digər səbəblər ola bilər. Bütün bu səbəblər pyezoelementin gərginlik vəziyyətinin xarakterinə təsir edir. Bu da öz növbəsində dağılmanı şərtləndirir. Dağılmanın bir növü pyezoelementlərdə yaranan və toplanan ümumi zədələnmə termini ilə ifadə olunan ixtiyari növ defektlərlə əlaqədardır. Belə dağılma səpələnmiş dağılma adlanır. Əgər gərginlik bircinsdirsə (məsələn, çubuğun dartılmasında), bu zaman zədələnmə həcmə görə müntəzəm artır. Gərginlik sahəsinin qeyri-bircins olduğu halda, dağılma prosesinin analizi üçün iki mərhələni fərqləndirmək lazımdır: gizli dağılma (inkubasiya periodu) və aşkar dağılma mərhələləri. Gizli dağılma mərhələsində mikroçatlar və digər defektlər əmələ gəlir (məsələn $0 \leq t < t^*$ zaman intervalında). $t = t^*$ anında isə artıq lokal dağılma baş verir. Belə lokal dağılma oblastları ətrafında səpələnmiş mikroçatlar və digər defektlər bir-birinə birləşərək makroçat əmələ gətirir. Məsələn, pyezoelementin yorğunluqdan dağılması üçün aparılan təcrübələr göstərir ki, dağılmanın ilkin mərhələsində zədələr durmadan yığılır və zədələnmə səpələnmiş xarakteri daşıyır. Bu mərhələnin sonunda makroçatlar əmələ gəlir və onlar sonrakı anlarda intensiv inkişaf edirlər və pyezomühərrik zədələnməmiş olur.

Uzunmüddətli dağılma məsələlərinin tədqiqi üçün iki növ yanaşmadan istifadə olunur. Bunlardan birincisi kriterial yanaşmadır. Bu növ yanaşma, pyezoelementlərin uzunmüddətli dağılması prosesini müəyyən edən meyarların yaradılmasına əsaslanır. Bu cür meyarların qurulmasında “ekvivalent gərginlik” adlanan gərginlikdən istifadə olunur. Kriterial yanaşmadan daha çox zamandan asılı olmayan gərginlik tenzorunun komponentləri üçün möhkəmliyin tədqiqi məsələlərində istifadə olunur.

Dördüncü fəsildə pyezoelektrik çeviricilərdən istifadə etməklə yeni 3D printerin 3D dizayn modelinin yaradılması, printerin çap ucluğunun “nöqtədən-nöqtə”yə keçid sürətinin təyin olunma sisteminin qurulmasının riyazi modeli verilmiş, vibrasiyaları nəzərə almaqla proqram idarəli stabilizasiya sisteminin qurulması məsələlərinə baxılmışdır. Bununla əlaqədar yeni nəsil 3D printer təklif olunmuşdur (şəkil 7). Şəkil 7-də hazırlanmış 3D printerin 3D dizayn modelinin

mexaniki konstruktiv quruluş sxemi göstərilmişdir.

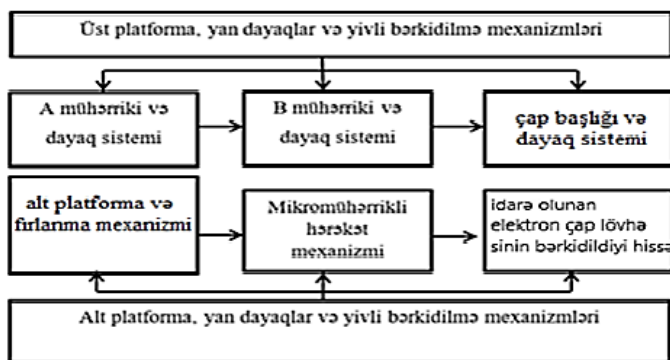


Şəkil 7. 3D printerin modelinin mexaniki konstruktiv sxemi

Şəkil 9-dan göründüyü kimi 3D printer 1 - ümumi dayaqdan, 2 – dayaq sütunlarının bərkidici elementlərindən, 3 – aşağı yuxarı hərəkət imkanı alt platformadan, 4 – hərəkət imkanı alt platformasının və 7, 8 işçi orqanın yerdəyişməsinə və istehsal olunan elementin keyfiyyətini və plastik sap əridicisinin ucluğunun yerdəyişməsinə izləyən optik çevirici, 5 – kristavina, 6 - kristavinanın uclarına bərkidilmiş plastik sap əridicisini printerin işləmə diapozonu mühitində 360 dərəcə hərəkət etdirmək imkanı mikromühərriklər, 7 - plastik sap əridicisi və 8 - ucluq (hər ikisi birlikdə işçi orqan), 9 - yanma üsulu ilə əriyən plastik sapın rulonu, 10 - printerin proqram təminatını və istehsal olunan elementin yaradılmasına nəzarəti təmin edən avtomatik idarəetmə sistemindən ibarətdir.

3D printerin vibrasiyasına nəzarət edən pyezelektrik çeviriciləri vibrasiya dərəcəsindən asılı olaraq printerin müxtəlif nöqtələrində yerləşdirmək olar. 7, 8 işçi orqanın aşağı yuxarı yerdəyişməsinə və 3–aşağı yuxarı hərəkət imkanı alt platformanı hərəkət elətdirmək üçün tərəfimizdən xətti pyezelektrik hərəkət çeviricisi yaradılmışdır.

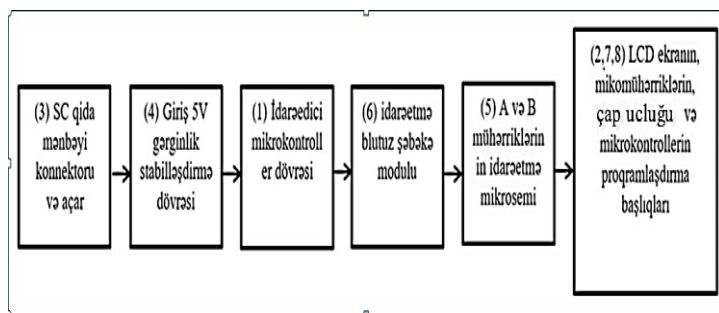
Məlumdur ki, idarə olunan mexaniki qurğuların mexaniki konstruktiv quruluşu onun digər mexaniki təşkiləddici hissələri üçün birləşməsinin struktur rolunu oynayır. 3D printerin mexaniki quruluşunun struktur blok sxemi şəkl.8-də göstərilmişdir.



Şəkil 8. 3D printerin quruluşunun struktur blok sxemi

Şəkil 8-dən göründüyü kimi 3D printer əsasən iki hissədən, mexaniki və idarəetmə - elektronik hissələrdən ibarətdir. Hər iki hissələrin tərkibini ayrılıqda analiz edək. Mexaniki təşkiləddici hissələr üst və alt platformaya görə iki qrupa ayrılır, hər biri isə öz növbəsində fərdi komponentlərdən təşkil olunub.

3D optik kommutatorun prototip modelinin hazırlanması üçün mexaniki və konstruktiv hissələrə bərabər, qurğunun idarə edilməsində əsas önəmə malik olan elektronika idarəetmə dövrəsi, tərkib komponentlərinin vacib rol oynadığını nəzərə alaraq, onların əsas hesabat hissəsini analiz edək.



Şəkil 9. 3D pinterin idarəetmə dövrəsinin struktur sxemi

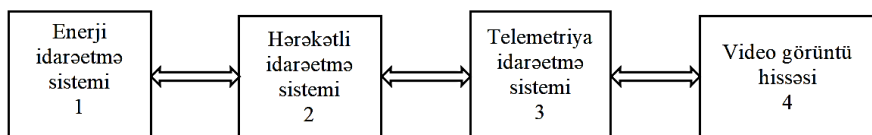
İlk öncə 3D pinterin ilkin modelinin iş alqoritmində uyğun təqdim olunan sxemində (şəkil 9) istifadə olunan idarəetmə dövrəsinin

quruluşunun struktur blok sxeminə nəzər yetirək.

İdarəetmə dövrəsinin quruluşunun struktur blok sxemindən göründüyü kimi dövrəni 7 əsas qrupa ayırmaq olar:

1–məntiqi idarəedicici mikrokontroller dövrəsi; 2,7,8 – monitor, ekran modulu, idarə olunan mühərriklər, lazer və mikrokontrollerin proqramlaşdırılması üçün terminal başlıqları; 3, 4 – qida mənbəyi və gərginlik stabilizator hissəsi; 5 –mühərriklərin idarəetmə sxemi, 6 – naqilsiz məsafədən idarəetmə modulu, 2 – monitoring üçün LCD, ekran modulu və 7 – çap ucluğundan ibarətdir.

Qeyd olunan iş prinsipini, o cümlədən işləmə alqoritmlərini nəzərə alaraq 3D printerin bloklar arasında rabitə və idarəetmə sxemini aşağıda göstərilən blok sxem üzrə göstərmək olar.



Şəkil 10. 3D printerin rabitə və idarəetmə quruluşunun blok sxemi

Şəkil 10-dan göründüyü kimi 3D printerin 1-enerji idarəetmə hissəsi özündə mikro mühərriklərə lazım olan 36-42V aralıq gərginliyini (təqdim olunan prototipə uyğun), eləcədə, 3D printer üzərindəki digər elektrikli işləyən hissələri gərginlik alqaldıcı modulların çıxışındakı lazımı gərginliklərlə qidalandırır. Eyni zamanda 3D printer məsafədə istismar olunarsa (müstəqil) printer Batareya toplusu ilə təmin olunmalıdır və işləmə müddətindən asılı olaraq onun nominalı hesablanmalıdır. 2- hərəkətli idarəetmə hissəsi Android əməliyyat sistemi üzərindən qəbul olunan komanda siqnallarını lazım olan formada idarə etmək üçün 10 kanallı qəbul edici Arduino MEGA –ya qoşularaq yazılmış proqram bütün mühərriklərin idarəedicisi olan ESC –lərə giriş / çıxışlı arduino modelindən istifadə olunur.

3D printerin sürətinin idarə olunması ilə bərabər çap ucluğunun tələb olunan istiqamətlərdə, o cümlədən irəli və geri hərəkəti sola və sağa hərəkəti, hərəkət sürətini artıran və azaldan, sağa və sola hərəkəti, aşağı və yuxarı hərəkəti, alt platformanın

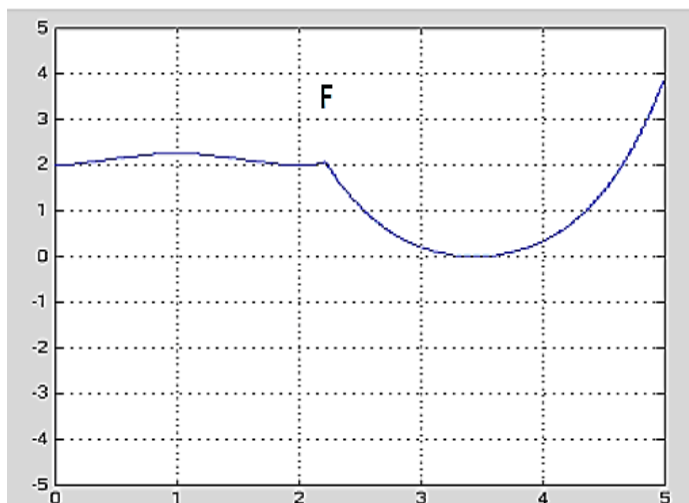
hərəkəti, dairəvi hərəkətinə uyğun olaraq, ESC –lər uyğun mühərriklərin çıxışına cərəyan verərək idarə edəcək.

Əlavə olaraq 3D printerin qaranlıq şəraitdə kamera görüntüsünü təmin etmək üçün, ön hissəyə parlaq LED işıq toplusu yerləşdirmək olar. 3-telemetry idarəetmə hissəsi özündə 3D printerin işləməsi prosesinə nəzarət, çeviricilərdən daxil olan, o cümlədən vibrasiyaların səviyyəsinə nəzarət və ölçmə apararaq ekranda və ya 3D printerin monitorunda əks elətdirir. 4 - video görüntü hissəsində isə 3D üzərində yerləşmiş ekran modulu üzərində çap olunan qurğunun vizual görüntüsünü təmin edir və çeviricilərdən daxil olan bəzi göstəriciləri də əks etdirmək imkanına malikdir.

Bu fəsildə təklif olunan 3D printerin çap ucluğunun “nöqtədən-nöqtə”yə kecid sürətinin təyin olunma sisteminin qurulmasının riyazi modeli qurulmuşdur. Çap ucluğunun fəza trayektoriyası $x(t)$ -nin $x(T)=0$ nöqtəsinin kiçik ətrafına düşməsinə təmin etməyə imkan verən göstəricinin təyini $x(t)$ vektorunun Evklid normasından istifadə etməklə təyin olunur:

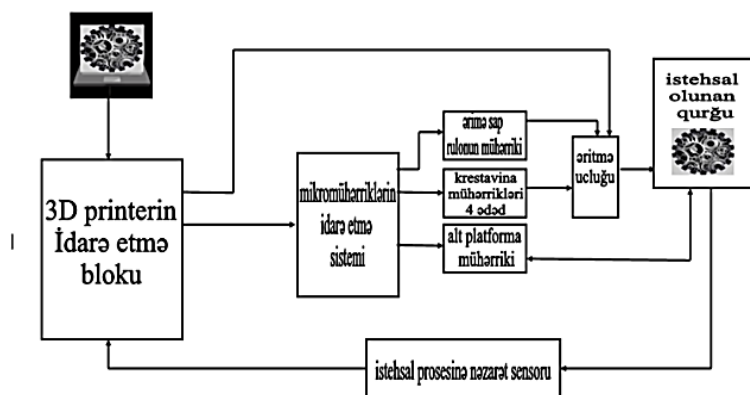
$$F = \|x(t)\| = [x_1^2(t) + x_2^2(t) + \dots + x_n^2(t)]^{0,5} = (x_T - x)^T (x_T - x) \quad (25)$$

Burada x_T -sistemin gətiriləcəyi son vəziyyətdir. Skalyar kəmiyyət F müsbət müəyyən funksiya olduğundan onun sıfır olması bütün vəziyyətlər x_i koordinatlarının sıfıra bərabər olması deməkdir. Bu səbəbdən sistemdə F -ə fasiləsiz nəzarət etməklə $x(t)$ trayektoriyasının koordinat başlanğıcına nəzərən vəziyyətini təyin etmək mümkündür. 3D printer işçi orqanının koordinat başlanğıcına gəlməsi $F = \|x(t)\|$ Evklid normasına nəzarət etməklə aşkarlanır. $F = 0$ şərti ödənildikdə $x(t) = 0$ olur. Şəkil 11-də F funksiyanın dəyişmə xarakteri göstərilmişdir.



Şəkil 11. F funksiyasının dəyişmə xarakteri.

Eyni zamanda bu fəsilə 3D printerin Markov qrafı əsasında etibarlılıq göstəricilərinin təyini üçün mexaniki konstruktiv sxemi əsasında 3D printerin modelinin idarə etmə sxemi tərtib olunmuşdur (şəkil 12).

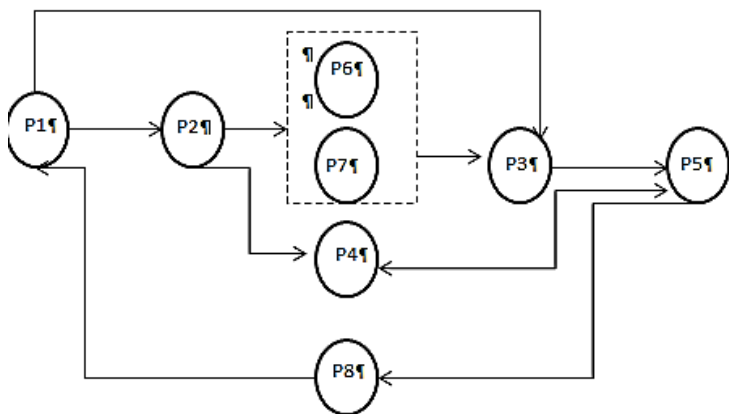


Şəkil 12. Yeni nəsil 3D printerinin idarəetmə sxemi

3D Printerin iş prinsipinə uyğun olaraq hər bir elementinin 2 vəziyyəti var: ya işləyir müvafiq əməlləri yerinə yetirir və ya istirahət

rejimində növbəti əməlləri gözləyir. Məsələn, idarəetmə bloku girişdə bir siqnal alır. Siqnal səviyyəsindən asılı olaraq əməllər ərimə ucluğuna ötürülür. 3D printerin modelinin onun idarəetmə sxemindən göründüyü kimi hər bir mikromühərrik öz şassilərini perpendikulyar döndərməklə alt platformanı hər iki istiqamət və bucaq aralıqlarında hərəkət etdirmək olar. Alt platformanın bərkindiyi altda isə dairəvi fırlanma başlığı olub mikromühərriklərə platformanı hər iki ox istiqamətində döndərməyə sərbəst imkan verir. Təklif olunan yeni 3D printerin elementlərinin işləmə şərtlərinə uyğun analitik Markov modeli qurulmuşdur.

Şəkil 13 – də qeyd olunan 3D printerin işləmə vəziyyəti əsasında 3D printerin elementlərinin işləmə prinsipini əks etdirən Markov qrafını quraq (şəkil 13).



Şəkil 13. 3D printerin işləmə prosesini xarakterizə edən Markov dövrəsi

Yuxarıdakıları nəzərə alaraq, ərimə sap mühərriki və krestavina mühərriklərini bir blokda birləşdiririk, çünki onlar mühərrikin idarəetmə blokundan əməllər alır və onu ərimə ucluğuna ötürür və onu P_6 kimi işarə edək. Şəkil 13-ə əsasən Kolmaqorov tənliyinə baxaq.

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_8 P_8(t) - P_1(t)(\lambda_2 + \lambda_3) \quad (26)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \lambda_1 P_1(t) - P_2(t)(\lambda_4 + \lambda_6) \quad (27)$$

$$\frac{dP_3}{dt} = \lambda_6 P_6(t) + \lambda_1 P_1(t) - \lambda_5 P_3(t) \quad (28)$$

$$\frac{dP_4}{dt} = \lambda_2 P_2(t) - \lambda_5 P_4(t) \quad (29)$$

$$\frac{dP_5}{dt} = \lambda_3 P_3(t) + \lambda_4 P_4(t) - \lambda_8 P_5(t) \quad (30)$$

$$\frac{dP_6}{dt} = \lambda_2 P_2(t) - \lambda_3 P_6(t) \quad (31)$$

$$\frac{dP_8}{dt} = \lambda_5 P_5(t) - \lambda_1 P_8(t) \quad (32)$$

burada $P_i(t)$, λ_i $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ - uyğun gələn imtina elementlərinin imtinasız işləmə ehtimalıdır. Sadəlik üçün yaza bilərik ki, $P_6(t) = 1 - e^{-\lambda_6 t}$.

Onda (31) ifadəsindən $P_2(t)$ təyin edək:

$$P_2(t) = \frac{\lambda_6 - \lambda_3}{\lambda_2} e^{-\lambda_6 t} + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (33)$$

Sonuncu ifadəni (27) tənliyində nəzərə alıb $P_1(t)$ təyin edirik:

$$P_1(t) = \frac{\lambda_4(\lambda_6 - \lambda_3)}{\lambda_1 \lambda_2} e^{-\lambda_6 t} + \frac{\lambda_3(\lambda_4 + \lambda_6)}{\lambda_1 \lambda_2} \quad (34)$$

(26) tənliyindən $P_8(t)$ təyin edirik:

$$P_8(t) = \frac{\lambda_4(\lambda_6 - \lambda_3)(\lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_6)}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_8} e^{-\lambda_6 t} + \frac{\lambda_3(\lambda_4 + \lambda_6)(\lambda_2 + \lambda_3)}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_8} \quad (35)$$

(33) ifadəsini (29) tənliyində nəzərə alıb və başlanğıc şərti ilə birinci dərəcəli sadə xətti diferensial tənliyi həll edirik:

$$P_4(t)|_{t=0} = 1$$

Bəzi elementar çevrilmələrdən sonra alırıq:

$$P_4(t) = \left(1 + \frac{\lambda_6 - \lambda_3}{\lambda_5 - \lambda_6} + \frac{\lambda_3}{\lambda_5}\right) e^{-\lambda_5 t} - \frac{\lambda_6 - \lambda_3}{\lambda_5 - \lambda_6} e^{-\lambda_6 t} - \frac{\lambda_3}{\lambda_5} \quad (36)$$

$P_3(t)$ və $P_5(t)$ -ni eyni qayda ilə təyin edirik:

$$P_3(t) = \left(1 + \frac{\lambda_6(\lambda_4 - \lambda_2) - \lambda_3 \lambda_4}{\lambda_2(\lambda_5 - \lambda_6)} + \frac{\lambda_6(\lambda_2 + \lambda_3) + \lambda_3 \lambda_4}{\lambda_2 \lambda_5}\right) e^{-\lambda_5 t} - \frac{\lambda_6(\lambda_4 - \lambda_2) - \lambda_3 \lambda_4}{\lambda_2(\lambda_5 - \lambda_6)} e^{-\lambda_6 t} - \frac{\lambda_6(\lambda_2 + \lambda_3) + \lambda_3 \lambda_4}{\lambda_2 \lambda_5} \quad (37)$$

$$P_5(t) = \frac{\lambda_4(\lambda_6 - \lambda_3)(\lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_6)(1 - \lambda_6)}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_5 \lambda_8} e^{-\lambda_6 t} + \frac{\lambda_3(\lambda_4 + \lambda_6)(\lambda_2 + \lambda_3)}{\lambda_2 \lambda_5 \lambda_8} \quad (38)$$

Hesabat apararkən zaman vahidi gün qəbul olunmuşdur.

NƏTİCƏ

1. Elektromexaniki analogiya əsasında pyezoelementlə sistem arasında yaranan friksion kontaktı zamanı qeyri-xəttiliyi və itkiləri nəzərə almaqla, pyezoelektrik çeviricilərin hərəkətlərinin fiziki prinsiplərini əks etdirən ekvivalent sxem işlənib hazırlanmışdır.

2. Müxtəlif mürəkkəb sərhəd şərtlərini nəzərə almaqla pyezoelektrik çeviricilərdə keçid prosesləri tədqiq edilmiş, Dalamber üsulundan istifadə etməklə, pyezoelementin istənilən nöqtəsindəki cərəyan və gərginliyi düşən və əks olunan dalğaların modeli və Laplas diskret çevirmələrindən istifadə etməklə qeyd olunan dalğalar üçün rekurrent ifadələr alınmışdır.

3. Təklif olunan riyazi modeli pyezoelektrik çeviricilər üçün istifadə olunan pyezoelementlərdə dalğa proseslərinin müxtəlif sərhəd şərtləri daxilində tədqiqi və itkiləri nəzərə almaqla tətbiq üsulları təklif olunmuşdur.

4. Təklif olunan model və metodlar əsasında yeni 3D printerin modeli yaradılmış, təqdim olunan printerdə və digər vibrasiyali qurğular üçün çoxfunksiyalı pyezoelektrik çeviricilərin sintezi məsələləri tədqiq olunmuşdur, keyfiyyət və cəldişləmə göstəriciləri təqribən 10% yüksəlmişdir.

5. Təklif olunan 3D printerin idarə olunmasının elekttrik sxemi hazırlanmış, işləmə alqoritminin blok sxemi tərtib olunmuş və elektronik tərkib hissələri analiz edilmişdir.

6. Təqdim olunan 3D printerin cəld işləməyə görə optimal stabilləşdirmə sisteminin qurulmasının riyazi modeli təklif olunmuşdur.

7. Təqdim olunan 3D printerin Markov qrafı əsasında etibarlılıq göstəriciləri təyin olunmuşdur.

8. Dinamiki rejimdə avadanlığın vibrasiyasının monitorinqini həyata keçirməyə, vibrasiyanın spektral təhlilini aparmağa, sonrakı analiz üçün signalı qeyd etməyə imkan verən aparat və proqram kompleksi yaradılmışdır.

**Dissertasiya işinin əsas nəticələri aşağıdakı elmi
məqalələrdə şərh olunmuşdur:**

1. Hacıyeva K.R. Paylanmış parametrlı pyezoelektrik çeviricilərdə dalğa proseslərinin riyazi modeli // Bakı: Azərbaycan Texniki Universiteti, Elmi əsərlər, 2019. № 4, s.40-48.
2. Hacıyeva K.R. Pyezoelektrik çevirici qurğunun arduino üzərindən idarə olunması // Tətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri. III Beynəlxalq elmi konfransı Sumqayıt Dövlət Universiteti, Kazan Dövlət Energetika Universiteti. Sumqayıt: 27-28 oktyabr, 2022. № 7. s.330-331
3. Hacıyeva K.R. Pyezoelektrik vericilərin analizi // Şəxsiyyət, Cəmiyyət, Dövlət: Qarşılıqlı münasibətlərə müasir yanaşmalar. Respublika elmi konfransının materialları. Mingəçevir: Mingəçevir Dövlət Universiteti. 6-7 dekabr, 2019. s.696-698.
4. Hacıyeva K.R. Vibrasiyalara nəzarət üçün proqramla idarə olunan pyezoelektrik sensorların yeni modeli // Sumqayıt: "Elmi Xəbərlər" jurnalı, 2022. Cild 22. №1, s.89-92.
5. Hacıyeva K.R. Yüksək dəqiqlikli dəzgahlarda vibrasiyaları ölçmək üçün pyezoelektrik çeviricilərin tədqiqi // Enerji səmərəliliyi və yaşıl enerji texnologiyaları. Respublika elmi-texniki konfransının materialları. Azərbaycan Texniki Universiteti və Sumqayıt Dövlət Universitetinin birgə təşkilatçılığı ilə. Sumqayıt: 14-16 dekabr, 2022. s.19-21
6. Həsənov M.H., Hacıyeva K.R. Yeni nəsil 3D printer // Tətbiqi fizika və Energetikanın aktual məsələləri. II Beynəlxalq Elmi konfransı. Sumqayıt Dövlət Universiteti və Kazan Dövlət Energetika Universiteti. Sumqayıt: 12-13 noyabr, 2020. s.371-374.
7. Həsənov M.H., İbrahimov B.Q., İslamov İ.C., Tağıyev Ə.D., Hacıyeva K.R., Fətəliyev V.M. 3D printer // Azərbaycan Respublikası. İxtira 25.06.2023. № a2022014.
8. Həsənov M.H., Yusifbəyli N.A., Hacıyeva K.R., Nəcəfov B.K., Hüseynli F.S. Xətti reversiv pyezoelektrik mühərrik //

Azərbaycan Respublikası. İxtira 27 iyun 2024. № a20220181.

9. Məmmədov F.İ., Dadaşova R.B., Hacıyeva K.R. Xətti və bucaq yerdəyişməli elektromaqnit vericisi // Azərbaycan Respublikası Dövlət Elm və Texnika Komitəsi Patent-Lisenziya İdarəsi “Sənaye mülkiyyəti” rəsmi bülleteni, Bakı, İxtira 30.03.2001. № 1.
10. Məmmədov F.İ., Hacıyeva K.R. İnformasiya-Ölçmə və idarəetmə sistemləri üçün böyük yerdəyişmələri ölçən elektromaqnit tipli vericili qurğu // Azərbaycan xalqının Ümum-milli Lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 90 illiyinə həsr edilmiş “Gənc Tədqiqatçıların I Beynəlxalq Elmi Konfransı” Bakı: 25-26 aprel, 2013. s.341-342.
11. Ахмедова Т.А, Дадашева Р.Б, Гаджиева, К.Р. Устройство больших линейных перемещений // Международная научная конференция Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики. Сумгаит: Сумгаитский Государственный Университет. 24-25 мая, 2018. с.434-437.
12. Саттаров В.Г., Гаджиева К.Р. Определение взаимовлияния магнитных цепей двухфункционального индуктивного преобразователя // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно - энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: матер. V Национальной научно-практической конференции. Казан: КГЭУ, 12-13 декабря, 2019. с.16-19.
13. Сафарханлы С.Р., Гаджиева К.Р. Физическая модель пьезоэлектрических преобразователей перемещения // Современные средства связи материалы XII международной научно-технической конференции. Минск: 19-20 октября, 2017. с.124-125.
14. Гасанов М.Г., Гаджиева К.Р. Физическая и математическая модель нелинейных пьезоэлектрических преобразователей для линейных перемещений // X Международная научно-практическая

- конференция молодых ученых. Актуальные Проблемы Науки и Техники -2017 Сборник материалов конференции УФА Издательство «Нефтегазовое дело» – Уфа: 2017. с.292-293.
15. Гасанов М.Г., Гусейнов А.М., Имангулиев А.Г., Гаджиева К.Р. Моделирование волновых процессов в однородной линии с сосредоточенных элементов // Современные средства связи. Материалы XIII Вещдународной научно-технической конференции. Минск: 18-19 октября, 2018. с.22-23.
 16. Гасанов М.Г., Гусейнов А.М., Имангулиев А.Г., Заманова Н.Дж., Гаджиева К.Р. Моделирование волновых процессов в пьезоэлектрических преобразователях с распределенными параметрами // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: Материалы IV Национальной научно-практической конференции. Казан: КГЭУ, 6-7 декабря, 2018. с.8-20.
 17. Гаджиева К.Р. Анализ пьезоэлектрических преобразователей // Материалы Международной научно-технической конференции о текущем состоянии и перспективах развития информационных и коммуникационных технологий. Баку: Азербайджанский Технический Университет, 23-25 ноября, 2016. с.388 – 392
 18. Гаджиева К.Р. Исследование 3D принтера новой конструкции // Псковского Государственного Университета II Международная научно-практическая конференция Современные инновации в технике и производстве. Псков: 28-29 октября, 2021. с.31-33
 19. Мамедов Ф.И., Дадашева Р.Б., Гаджиева К.Р. Электромагнитный датчик угловых и линейных перемещений со сплошным магнитопроводом // Известия Высших Технических Учебных Заведений Азербайджана, 2015. №2 (96) с.63-67.

20. Hajiyeva K.R. Research of New Generation 3D printer // Herald of the Azerbaijan Engineering Academy. The international science – technical journal. Bakı: 2021. Vol.13. №4 p.107-113.
21. Hasanov M., Piriev S., Hacıyeva K., Rasullu T., Payizov E. Mathematical model of fatigue degradation of cylindrical piezoelement of linear micropiezomotor. Jomard Publishing. Advanced Mathematical Models & Applications 2024, Vol.7, № 2.
22. Hasanov M.H., Farhadov V.Q., Hajiyeva K.R., Fataliyev, V.M., Huseynli F.S, Features Of Setting Up the Optimal Stabilization System for the New 3D Printer Due to Hastiness. II International Scientific Forum on Computer and Energy Sciences (WFCES-II 2021), 29 August, 2022, AIP Conference Proceedings
23. Hasanov M.H., Hacıyeva K.R., Qodjaeva S.F. Multifunctional adaptive piezoelectric switch of optical channels. T-Comm. Telecommunications and Transport, 2022. 13(29), p.64-69.
24. Hasanov M.H., Hajiyeva K. R., Atayev N. A., Najafov B. K. Development and Calculation of the Reliability of a 3D Printer. Towards Industry 5.0 Selected Papers from ISPR2022, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer Nature, 6-8 October, 2022. p.201-210 <https://doi.org/10.1007/978-3-031-24457-5>.
25. Hasanov M.H., Hajyeva K.R., Najafov B.K. Determination of reliability indicators of the new 3D printer based on Markov graph. Информатика, управление и искусственный интеллект тезисы девятой Международной Научно-Технической конференции Харьков: 11-13 мая, 2022. p.20-21.
26. Huseynov T.K., Gadirova T.T., Amiraslanov B.K., Abdulova N.A., Quliyeva A.I., Hacıyeva K.R. Theoretical and experimental study of vibration-amplitude liquid densimetr on the basis of a highquality tubular resonator. E3S Web Conf., 124 -2019. 03004 DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912403004>

Həmmüəlliflərlə çap olunmuş elmi işlərdə müəllifin şəxsi iştirakı:

- [1,2,3,4,5,17,18,20] - sayılı işlər müəllif tərəfindən müstəqil yerinə yetirilmişdir;
- [1,2,3,4,5,17,18,20]- sayılı işlərdə məsələnin qoyuluşu, alınmış elmi nəticələr və elmi izahatlar müəllif tərəfindən yerinə yetirilmişdir.



Dissertasiyanın müdafiəsi 12 iyun 2025-ci il tarixində saat 15⁰⁰-da Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.41 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: H.Cavid prospekti 25, Bakı, Azərbaycan, AZ 1073, Azərbaycan Texniki Universiteti.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Texniki Universitetinin kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Texniki Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 10 may 2025-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb:07.05.2025

Kağızın formatı:A5

Həcm: 36396

Tiraj: 100