

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazma hüququnda

**TİKİLMİŞ POLİETİLEN İZOLYASIYALI KABELLƏRİN
İSTİSMAR XARAKTERİSTİKALARININ
YAXŞILAŞDIRILMASI ÜSULLARININ İŞLƏNMƏSİ**

İxtisas: 3306.01– “Elektrotexnika, elektrotexnika mühəndisliyi”

Elm sahəsi: Texnika elmləri

İddiaçı: **Mehti Əvəz oğlu Camalov**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

BAKİ-2025

Dissertasiya işi Azərbaycan Texniki Universitetinin "Elektrotexnika" kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər: Akademik
Arif Məmməd oğlu Həşimov

Rəsmi opponentlər: texnika elmləri doktoru, professor
Əli İsa oğlu Məmmədov

texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
Elşad Süleyman oğlu Səfiyev

texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
Nadir Mirzəbala oğlu Hacıbalayev

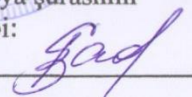
Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Texniki Universiteti nəzdində fəaliyyət göstərən BFD 2.04 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:



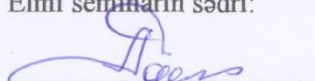
texnika elmləri doktoru, professor
Nurəli Adil oğlu Yusifbəyli

Dissertasiya şurasının
elmi katibi:



texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
Bəhrüz Məmməd oğlu Sadiqlı

Elmi seminarın sədri:



texnika elmləri doktoru, professor
Rasim Əzim oğlu Səidov

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Polimerlərin unikal elektrofiziki və kimyəvi xassələri onları elektroenergetikanın enerji komplekslərində, xüsusilə orta, yüksək və ifratyüksək gərginlikli güc kabellərinin izolyasiya sistemlərində əsas izolyasiya materialı kimi geniş tətbiq etməyə imkan verir. Enerji komplekslərinin keyfiyyəti və uzunömürlülüüyü bilavasitə bu materialların keyfiyyət göstəricilərindən asılıdır. İstismar zamanı elektrik sahəsi, yüksək temperatur, mexaniki gərginlik və digər amillər polimerlərin xassələrində dəyişikliklər yaradır. Bu təsirlərin kompleks şəkildə öyrənilməsi izolyasiya sistemlərinin uzunömürlü və dayanıqlı işləməsi baxımından vacibdir.

Polimer izolyasiyalı kabellərdə ən geniş istifadə olunan material tikilmiş polietilendir. Lakin bu kabellərin ilkin dövrlərdəki istismarı göstərdi ki, onlar nəzərdə tutulduğundan daha tez sıradan çıxır. Tədqiqatçılar tərəfindən aparılan nəzəri-praktik işlər bunun əsas səbəbinin izolyasiya sistemində müxtəlif səbəblərdən yaranan qeyri-bircins oblastlar olduğunu ortaya çıxardı. Odur ki, bu oblastların yaranma mexanizmi, onların izolyasiya sisteminə təsirinin öyrənilməsi aktual məsələlərdən biridir. Aparılan çoxsaylı tədqiqat işlərinə baxmayaraq, bu sahədə birmənalı, vahid konsepsiya yoxdur. Bunu nəzərə alaraq, dissertasiya işi yuxarıda göstərilən aktual problemlərin kompleks şəkildə, hərtərəfli tədqiqinə həsr olunmuşdur. Nəzərə alsaq ki, respublikamızda bu tip kabellərin istehsal və istismarı haqda təcrübi məlumatlar məhduddur, o zaman işin aktuallığı və praktik əhəmiyyəti bir qədər də yüksəlir.

TPE kabellərin istismarı zamanı elektrik, istilik və mexaniki təsirlər nəticəsində keyfiyyətin azalması onların xüsusiyyətlərinin yaxşılaşdırılması üçün kompleks tədqiqatları zəruri edir, xüsusən də qismən boşalmalar, su və elektrik triinqlərinin yaranma və inkişaf mexanizmlərinin öyrənilməsi vacibdir. Tədqiqat çərçivəsində bu defektlərin izolyasiya materialının köhnəlməsinə və dielektrik xassələrinə təsiri araşdırılmışdır.

Dissertasiya işində TPE materiallarının müxtəlif modifikasiyalarının, o cümlədən peroksidli və silanlı tərkiblərin

xassələri, qeyri-bircins oblastlardakı proseslər və onların kabellərin yaşam müddətinə təsiri dərin şəkildə öyrənilmişdir. Bundan əlavə, istismar zamanı yaranan defektlərin qarşısının alınması və kabellərin “cavanlaşdırılması” məqsədilə injeksiya üsulu təklif olunmuşdur. Tədqiqat nəticələri göstərir ki, elektrofiziki və kimyəvi proseslərin səmərəli idarə edilməsi TPE izolyasiyalı kabellərin istismar göstəricilərini əhəmiyyətli dərəcədə yaxşılaşdırır.

Bu dissertasiya TPE izolyasiyalı kabellərin dayanıqlığı və uzunömürlülüynü artırmaq üçün aparılmış kompleks və çoxşaxəli elmi-praktik tədqiqatlardan biridir və ölkəmizdə bu sahədə aparılan ilk sistemli araşdırmalardan hesab edilə bilər.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Müxtəlif tip tikilmiş polietilen əsaslı kabel kompozitləri və izolyasiyalı materialları, orta və yüksək gərginlik kabelləri. Bu izolyasiya materialları bu günə qədər orta və yüksək gərginlikli kabellər üçün dünya çapında əsas material hesab edilir. Tədqiqatın predmeti isə tikilmiş polietilen izolyasiyalı kabellərin istismar xarakteristikalarının və keyfiyyət göstəricilərinin yaxşılaşdırılması üsulları, vasitələri və alqoritmləridir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. Dissertasiya işinin əsas məqsədi tikilmiş polietilen izolyasiyalı kabellərin istismar xarakteristikalarının və keyfiyyət göstəricilərinin yaxşılaşdırılması üsullarının işlənməsindən ibarətdir. Bunun üçün, TPE izolyasiyanın kabellərin və istifadə olunan materialların xassələrinin tədqiqı və kabellərin etibarlı fəaliyyətinə təsir göstərən amillərin tədqiqı olmuşdur. Bu məqsədə nail olmaq üçün qarşıya aşağıdakı əsas vəzifələr qoyulmuşdur:

➤ Müxtəlif mərhələlərdə orta və yüksək gərginlikli TPE izolyasiyalı kabellərin izolyasiya sistemində yaranma riski yüksək olan, fərqli təbiətli, qeyri-bircins oblastların kabelin köhnəlmə prosesinə təsirinin elmi-praktik cəhətdən əsaslandırılması və təhlili.

➤ Tikilmə prosesində polimer kompozitdə reaksiya məhsulu olan qaz qabarcıqlarının yaranma mexanizminin və inkişaf kinetikasının tədqiqı, kritik ölçülərin qiymətləndirilməsi alqoritminin işlənilməsi və polimer mühitlə məhdudlaşmış qaz qabarcığında elektrik boşalmalarının yaranma mexanizminin və tək-tək

mikroboşalmalarının optik təsirinin formalaşması üsulunun tədqiqi və işlənməsi.

➤ Nəmlik və elektrik sahəsinin birgə təsirindən yaranan və inkişaf edən su triinqlərinin morfoloqiyasının, budaqlarında cərəyan sıxlığının paylanması və bu strukturların lokal sahə təhrifləri ilə əlaqəsinin tədqiqi.

➤ Tikilmiş polietilen izolyasiyadan hazırlanmış müxtəlif ölçülü nümunələrdə gərginlik artım səviyyəsinin elektrik möhkəmliyinə təsirinin tədqiqi və elektrik möhkəmliyinin dəyişməsinin qeyri-bircinsliklər nəzərə alınmaqla yeni üsulun işlənməsi.

➤ Köhnəlmə prosesinin TPE izolyasiyalı materialın dielektrik xassələrinə təsirinin çoxfaktorlu kriteriyaların seçiminin əsaslandırılması və tikilmiş polietilen kompozitin dielektrik parametrlərinin geniş intervalında tezlik və temperatur xarakteristikalarının təhlili, tədqiqi və hesablama üsulunun işlənməsi.

➤ Temperatur fluktasiyası nəticəsində TPE kompozitlərdə baş verən elektrofiziki proseslərin qismən boşalma parametrlərinə, materialların morfoloji sabilliyinə təsirinin tədqiqi və istilik köhnəlməsi, qismən boşalma, struktur dəyişikliyi arasında bağlılığın elmi əsaslandırılması.

Tədqiqat metodları. Tədqiqat obyektlərinin dielektrik xassələrinin geniş spektrdə tədqiqində ən müasir metodlardan, o cümlədən: Omicron CP100/CPTD1, qismən boşalmaların öyrənilməsində Omicron MPD 600, struktur dəyişikliklərin analizi üçün isə Perkin Elmer – Spectrum 100, X’Pert PRO, Perkin Elmer Lambda 35, Zeiss EVO LS 10 müasir cihazlar və standart metodlardan, həmçinin, kabel izolyasiyada olan defektlərdə baş verən elektrofiziki proseslərin modelləşdirilməsi və tədqiqi üçün MATLAB/Simulink və Comsol Multiphysics simulyasiya proqramlarından istifadə edilmiş, eyni zamanda Solidworks proqram təminatında injeksiya texnologiyasının realizasiyası üçün model hazırlanmışdır.

Müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar.

➤ Müxtəlif mərhələlərdə kabelin polimer izolyasiyasında qeyri-bircins oblastların yaranma ehtimalı və inkişafı mexanizminin və onların kabelin köhnəlmə prosesinə təsirinin tədqiqi öyrənilmişdir.

➤ Tikilmə prosesində kabelin izolyasiyasında qaz qabarcıqlarının yaranma mexanizminin və inkişaf kinetikasının öyrənilməsi, müxtəlif şərtlər daxilində kritik ölçülərinin hesablanması və qiymətləndirilməsi, o cümlədən, MATLAB/Simulink proqramından istifadə etməklə, polimer mühitlə məhdudlaşmış qaz qabarcığında elektrik boşalmalarının yaranma mexanizmi və tək-tək mikroboşalmaların optik təsirinin formalaşması tədqiq edilmişdir.

➤ İzolyasiya qatının müxtəlif hissələrində yerləşmiş qaz qabarcıqlarında baş verən elektrik effektlərinin tədqiqi, kabel izolyasiyası boyunca zamanla nəmlik və elektrik sahəsinin birgə təsirindən inkişaf edən müxtəlif ölçülü su triinqlərində yaranan elektrik sahə təhriflərinin və cərəyan sıxlığının paylanması modeləşdirilməsi alqoritmi, eləcə də, kabel xəttinin həssas yeri hesab olunan birləşdirici muftalarda elektrik sahəsinin tədqiq üsulu işlənmişdir (Comsol Multiphysics® proqramının bazasında tərtib edilmiş alqoritm).

➤ Təhqatlı və çoxqatlı sendviç strukturlu TPE əsaslı pərdə nümunələrdə elektrik möhkəmliyinin tədqiqi, gərginlik artım səviyyəsinin elektrik möhkəmliyinə təsirinin qiymətləndirilməsi həyata keçirilmiş və elektrik möhkəmliyi təcrübəsi Comsol Multiphysics® proqramında müxtəlif qeyri-bircinsliklər nəzərə alınmaqla modeləşdirilmişdir.

➤ İstilik köhnəlməsinin müxtəlif tip TPE izolyasiya materialının dielektrik xassələrinə təsiri tədqiq edilmiş, TPE nümunələrin geniş oblastlarda tezlik və temperatur dispersiyası təyin edilmişdir.

➤ Müxtəlif növ TPE əsaslı nümunələrdə köhnəlmədən əvvəl və sonra qismən boşalmaların parametrlərinin müqayisəli tədqiqi aparılmış və istilik köhnəlməsinin kabel izolyasiyasında struktur dəyişiklərinə təsiri tədqiq edilmişdir.

Tədqiqatın elmi yeniliyi. Dissertasiya işinin predmeti nəzərə alınmaqla, tikilmiş polietilen izolyasiyalı kabellərin istismar

xarakteristikalarının yaxşılaşdırılması üsullarının işlənməsi istiqamətində aparılmış tədqiqatın elmi yeniliyi aşağıdakılar hesab olunur:

1. Sonlu element metodunun təhlili bazasında tikilmiş polietilen izolyasiyalı orta və yüksək gərginlikli kabellərdə hava boşluqlarının və su triinqlərinin forma və ölçüləri nəzərə alınmaqla, onların izolyasiyanın köhnəlmə prosesinə və yaşam müddətinə təsirini kompleks şəkildə qiymətləndirmək üçün hava boşluqlarının və su triinqlərinin modeli, alqoritmi və strukturu işlənmişdir. Qurulmuş model əsasında izolyasiyada hava boşluqları və su triinqlərinin budaqlarında təcrübi yolla təyin olunması mümkün olmayan cərəyan sıxlığı, elektrik sahə intensivliyi və potensialın paylanması təyin edilmişdir [2].

2. TPE izolyasiyanın köhnəlmə prosesini xarakterizə edən həssas parametrləri sisteməlik tədqiq edilmiş və bu zaman əsas kriterial parametrlər kimi dielektrik itki bucağının tangensinin və qismən boşalmaların səviyyəsinin seçilməsi əsaslandırılmışdır. O cümlədən, istismar müddətində qida gərginliyinin tezliyindən asılı olaraq, tgd-nın dəyişməsi köhnəlmə prosesinə nəzarət monitorinqi kimi təklif olunmuşdur [7,14,15].

3. Müqayisəli şəkildə, ilk dəfə olaraq, respublikamızın kabel zavodlarında istehsal edilən TPE izolyasiyalı kabellərdə istifadə olunan müxtəlif modifikasiyalı tikilmiş polietilen izolyasiyalı kompozitlərin təkqatlı və çoxqatlı strukturlarında, müxtəlif gərginlik artımlarında elektrik möhkəmlik sınaqları, dielektrik parametrlərinin istilik köhnəlmə sınaqları, geniş tezlik və temperatur intervalında dispersiyası, qismən boşalma sınaqları, istilik köhnəlməsi altında struktur dəyişikliklərini xarakterizə edən Furiye transformasiyalı infraqırmızı spektroskopiyaya (FTİQ), Ultrabənövşəyi-görünən spektroskopiyaya (UB/G), X-şüalarının diffraksiyası (XŞD), Skanedən elektron mikroskop (SEM) analizləri həyata keçirilmişdir [11,13,14].

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti. Dissertasiya işində alınmış bir-sıra nəticələr ölkəmizdə TPE izolyasiyalı kabel istehsalı edən zavodlarda istehsal prosesinin təkmilləşdirilməsi və enerji komplekslərində bu tip kabellərin istismarı zamanı onların keyfiyyət göstəricilərini və yaşam müddətini yüksəltmək məqsədilə istifadə oluna bilər.

Dissertasiya işində aparılmış tədqiqatlarda əldə olunmuş nəticələr TPE izolyasiyalı kabellərin izolyasiya sistemində köhnəlmə prosesinin, qeyri-bircins oblastlarda baş verən elektrofiziki proseslərin mexanizminin elmi baxımdan əlaqəli qiymətləndirilməsi üçün nəzəri əhəmiyyət kəsb edir.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiya işinin nəticələri Збірник наукових праць “Велес” За матеріалами III міжнародної конференції “Зимові наукові читання” (Kiyev, 2018). Azərbaycan Xalq Cümhuriyyətinin 100 illik yubileyinə həsr olunmuş “Təhsil – tədqiqat- istehsalat mexanizminin qurulması” mövzusunda keçirilən Respublika Elmi – texniki konfransı. (Bakı, 2018.) Azərbaycan Xalq Cümhuriyyətinin 100 illik yubileyinə həsr olunmuş “Tətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri” Beynəlxalq elmi konfransı (Sumqayıt, 2018). Azərbaycan və Türkiyə Universitetləri: təhsil, elm, texnologiya. I Beynəlxalq elmi-praktiki konfransı (Bakı, 2019). Machine-building and Energy: New Concepts and Technologies” International Scientific-practical Conference materials (Bakı, 2021). Elektroenergetikanın müasir problemləri və inkişaf perspektivləri Beynəlxalq elmi-texniki konfransının məruzə materialları. (Bakı, 2022). VI international scientific and practical conference «Energy- and resource saving technologies: experience and prospects». (Qızılorda, 2024), həmçinin Azərbaycan Texniki Universitetində elmi seminarlarında təqdim olunmuş və müzakirə edilmişdir.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı. Dissertasiya işi “Azərbaycan Texniki Universiteti”nin “Elektrotexnika” kafedrasında, Türkiyənin Cümhuriyyətinin “Yıldız Texniki Universiteti”nin Elektrik və elektronik fakültəsinin “Yüksək gərginliklər laboratoriya”sında və “Mərkəzi Laboratoriya”sında, Azərbaycan Elm və Təhsil Nazirliyinin nəznində “Radiasiya Problemləri” institutunun “Polimerlər və aktiv materialların radiasiya fizikası” laboratoriyası və “Fizika” institutunun laboratoriyalarında, “Azərişiq” ASC –nin tədris mərkəzində həyata keçirilmişdir.

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi.

Dissertasiya işi girişdən, dörd fəsil, nəticə, istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısı və ixtisarlər və şərti işarələrdən ibarətdir.

Dissertasiyanın əsas mətni 62 şəkil, 26 cədvəl, 37 qrafik və 1 sxem daxil olmaqla 255 səhifədə şərh edilmişdir. Ədəbiyyat siyahısında 277 mənbəyə istinad edilib.

Dissertasiya işinin ümumi və struktur bölmələrinin işarə ilə həcmi təqribi olaraq aşağıdakı qaydada paylanmışdır: Ümumi: 245647 işarə; Giriş – 22816 işarə, Birinci fəsil – 47896 işarə; İkinci fəsildə – 14920 işarə; Üçüncü fəsildə – 80281 işarə; Dördüncü fəsildə – 67834 işarə; Nəticə – 8204 işarə.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə dissertasiya işinin mövzusunun, bu istiqamətdə aparılan elmi-tədqiqat işlərinin geniş təhlili nəzərə alınmaqla, aktuallığı, praktikliyi və işləmə dərəcəsi müəyyən edilmiş və əsaslandırılmışdır. Təcrübələrin yerinə yetirilməsi üçün istifadə olunan cihaz və metodlar, işin xarakterinə uyğun müəyyən edilmişdir. Girişdə müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, məqsədə nail olmaq üçün qarşıya qoyulan vəzifələr şərh olunmuşdur. Burada həmçinin, işin predmentinə aparılan tədqiqatların nəticəsinə görə dissertasiya işinin elmi yenilikləri göstərilmişdir. Bununla yanaşı, dissertasiyadan ekstraksiya olunan məsələlərin pragmatikliyi, aprobeiası və tətbiqi göstərilmişdir.

Birinci fəsildə tikilmiş polietilen izolyasiyalı güc kabellərinin keyfiyyət göstəricilərinə təsir göstərən faktorların müəyyənəşdirilməsi və mövcud problemlərin həlli istiqamətində aparılan işlər, bu kabellərin cari vəziyyətini qiymətləndirmək üçün ədəbiyyat sorğusu aparılmışdır.

Əvvəlcə, polietilen izolyasiyalı güc kabellərinin keyfiyyətinə təsir edən amillər və mövcud problemlərin həlli yollarına aid geniş araşdırmalar aparılmışdır. Elektrik enerji sistemlərində kabel xətlərinin inkişaf tarixi və mühüm texnoloji yeniliklər təqdim edilmişdir. Xüsusilə, TPE izolyasiyalı kabellərin üstünlükləri vurğulanmışdır. Bu kabellərin ABŞ, Kanada, Almaniya, Rusiya və digər ölkələrdə geniş yayılması onların effektivliyini göstərir. O cümlədən, Azərbaycanda da 2000- ci illərdən başlayaraq bu tip kabellərin kütləvi istehsalı və istismarına başlanmışdır.

Aparılan sorğuya uyğun, tədqiqat nəticələri göstərir ki, TPE izolyasiyalı kabellərin köhnəlməsi əsasən elektrik, istilik və mexaniki gərginliklərdən qaynaqlanan elektrofiziki proseslərdən asılıdır. Xüsusilə, elektrik və su ağaclarının formalaşması, izolyasiya daxilində yaranan hava boşluqları və qismən boşalma hadisələri izolyasiyanın uzunömürlülyünə ciddi təsir göstərir.

Bununla əlaqədar olaraq, polimer materialların xüsusiyyətləri və onların izolyasiya sistemlərində tətbiqi təhlil olunmuşdur. Termoplastik kompozitlərdən hazırlanan izolyasiyaların mexaniki xassələrinin yüksək temperaturda zəiflədiyi və bu səbəbdən termiki dayanıqlığın məhdud olduğu müəyyən edilmişdir. Bu problemi həll etmək üçün polietilenin tikilmə prosesi tətbiq edilir. Nəticədə əldə edilən TPE materialı yüksək istilik və mexaniki dayanıqlığa malikdir.

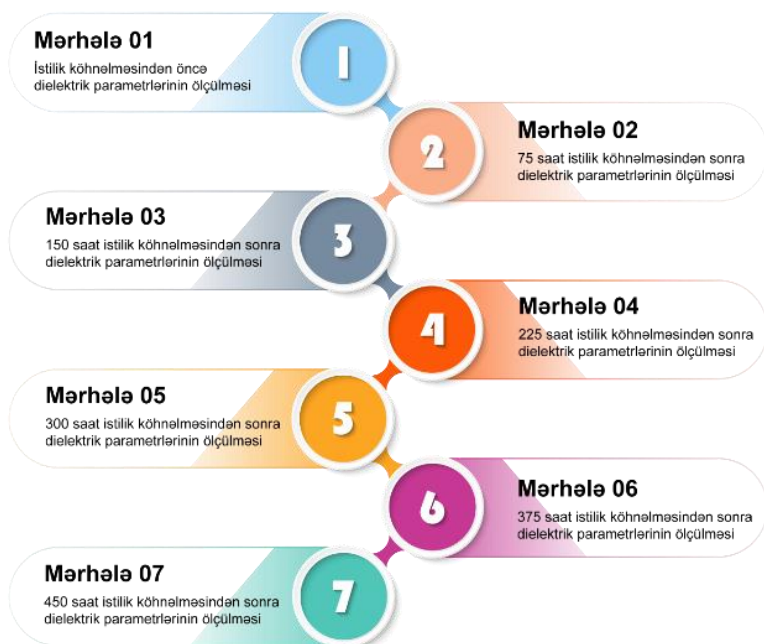
Nəhayət, TPE kompozitlərinin istehsalında üç əsas metod – peroksidli, silanlı və radiasiya üsulu müqayisəli təhlil edilmişdir. Vulkanlaşma prosesində yaranan boşluqlar və onların elektrofiziki təsiri öyrənilmiş, boşluqların ölçüsünün qismən boşalma intensivliyinə təsiri araşdırılmışdır. Bütün bu məsələlərə aid son illərdə inkişaf etmiş ölkələrdə aparılan tədqiqat işlərinin hərtərəfli, geniş ədəbiyyat sorğusu aparılmışdır.

İkinci fəsildə dissertasiya işinin məqsəd və məzmununa uyğun olaraq tədqiqat obyektləri təyin edilmişdir: orta, yüksək və ifratyüksək gərginlikli kabellər və TPE izolyasiya kompozitləri. Tədqiqat metodları, elektrofiziki proseslərin tədqiqi üçün qurulmuş modellər və alqoritmlər izah edilmişdir. Nümunələr isti presləmə üsulu ilə alınmış və ölçüləri göstərilmişdir. Elektrik möhkəmliyinin təyini sınaqları və digər zəruri eksperimentlər Yıldız Texniki Universitetində aparılmışdır. Nümunələr 500 V/san, 2 kV/san və 3 kV/san gərginlik artım sürətləri ilə test edilmişdir. Eyni metodologiya ilə çoxqatlı nümunələr üzərində də ölçmələr aparılmışdır.

İzolyasiya materiallarının dielektrik parametrləri, 450 saatlıq istilik köhnəlməsindən sonra ölçülmüş və nəticələr geniş tezlik və temperatur oblastında təhlil edilmişdir. Ölçmənin mərhələlər üzrə ardıcılığı şəkil 1-də göstərildiyi kimi yerinə yetirilir. İstilik köhnəlməsi altında izolyasiya materiallarının xüsusiyyətlərinə təsiri qiymətləndirilmişdir. Bununla yanaşı, dielektrik parametrlərinin

tədqiqi geniş tezlik və temperatur oblastında aparılaraq, materialların xassələrinin daha dolğun və dəqiq öyrənilməsi mümkün olmuşdur.

İstilik köhnəlməsinin TPE kompozitlərin qismən boşalma səviyyəsinə və morfoloji xüsusiyyətlərinə təsirini ölçmək üçün istilik köhnəlməsindən əvvəl və sonra sınaqlar aparılmışdır. Aparılan tədqiqatın ümumi sxemi şəkil 2-də verilmişdir.



Şəkil 1. Tədqiqat prosesi zamanı əməliyyatların mərhələli şəkildə sxematik təsviri

Qismən boşalmaların ölçülməsi Omicron MPD 600 cihazı ilə həyata keçirilmişdir. Eyni zamanda, Comsol Multiphysics proqramında müxtəlif ölçülü və formalı su triinqləri, hava boşluqları olan real kablərdə modelləşdirilmiş, elektrik sahəsinin, potensialın və cərəyan sıxlığının paylanmasının təyini etmək üçün qurulmuş modellərin alqoritmi və sərhəd şərtləri qeyd olunmuşdur.

Dissertasiya işinin **üçüncü fəslində** kablərin köhnəlməsinin əsas səbəbləri kimi izolyasiya sistemində yaranan qeyribircins

oblastlar və bu oblastlarda baş verən prosesləri tədqiq edilmişdir. Qeyd olunmuşdur ki, bu oblastlarda yaranan elektrik sahəsi izolyasiyanın zəif nöqtələrində müxtəlif elektrofiziki proseslərə səbəb olur və nəticədə kabelin vaxtından əvvəl dəşilməsi baş verir. Müəyyən olunmuşdur ki, bir sıra tədqiqatçılar tərəfindən verilən təkliflərlə, TPE izolyasiyalı kablərdə imtina səviyyəsi azaldılsa da, qeyribircins oblastların yaranma mexanizmi və onların izolyasiyanın köhnəlmə prosesinə təsiri tam olaraq öyrənilməyib.

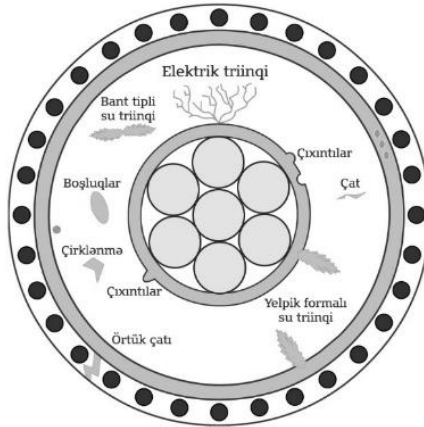


Şəkil 2. Eksperimental prosesin xülasəsi

Bundan əlavə, TPE izolyasiyalı kablərdə 50 ildən artıq bir müddətdə alınmış çoxsaylı təcrübələrin təhlili göstərir ki, kablərin istismar xüsusiyyətləri və qalıq resursları yalnız kompleks araşdırmalar nəticəsində dəqiq müəyyən edilə bilər. Eyni zamanda, kablərin köhnəlmə prosesinə xarici faktorların təsirinin öyrənilməsi, hələ də aktual məsələlərdəndir. Bu səbəbdən, bu fəsildə qeyd olunan problemlərə kompleks yanaşma tətbiq edilmişdir və qeyri-bircins oblastların təsviri sxematik olaraq şəkil 3-də verilib¹:

¹ Gutierrez, S. Effect of protrusions in HVDC cables / S.Gutierrez, L.Fontan, J.No [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2012. vol. 19, no. 5, – p. 1774-1781.

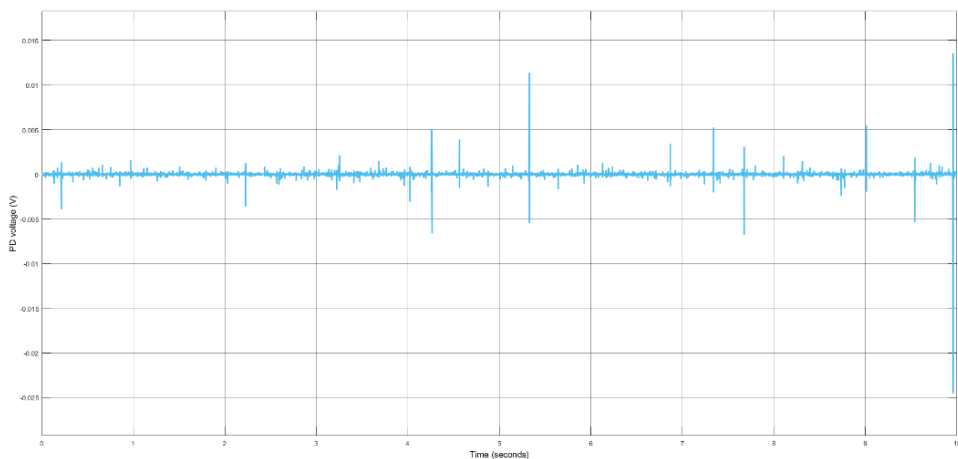
TPE izolyasiyalı kabellərdə qeyri-bircins oblastların yaranmasını üç mərhələyə bölmək olar: birincisi, istehsal prosesində yaranan defektlər, burada texnoloji defektlərlə yanaşı, materialların keyfiyyəti və təmizlik dərəcəsi də nəzərə alınır; ikincisi, kabel xətlərinin quraşdırılmasında meydana gələn defektlər; və üçüncüsü, istismar dövründə yaranan qeyri-bircins oblastlar.



Şəkil 3. Kabel izolyasiyasında ehtimal olunan defektlər

Bu mərhələlərdə yaranan qeyri-bircins oblastlar, izolyasiyanın etibarlılığına, təhlükəsiz işinə və səmərəliliyinə bu və ya digər səviyyədə təsir edir. Təhlillər və aparılan tədqiqat işlərinin nəticəsi göstərir ki, polimer kabellərin köhnəlməsinin əsas səbəblərindən biri hava boşluqlarında baş verən qismən boşalma hadisəsidir. Bu prosesin izolyasiya sisteminə təsiri, istehsal defektləri, çirklənmə və izolyasiyanın deqradasiyası nəticəsində meydana çıxır.

Qismən boşalmaların izolyasiyanın yaşam müddətini qısaldan amil olduğunu nəzərə alaraq, MATLAB/Simulink proqram təminatından istifadə edərək prosesin simulyasiyası aparılmışdır. Qurulmuş blok-sxem modeli üzərindən alınmış qrafiklərdən biri şəkil 4-də göstərilmişdir. Simulyasiya nəticəsində, izolyasiyanın daxilindəki qüsurun ölçüsünün artması ilə qismən boşalmaların amplitudunun azaldığı, daha kiçik ölçülərdə isə amplitudların daha böyük olduğu aşkar edilmişdir.



Şəkil 4. “d” indeksli hava boşluğu üçün QB modelləşdirmənin nəticələri

Qeyd olunduğu kimi, TPE izolyasiyada ən çox rast gəlinən qeyri-bircins oblastlar qaz boşluqları və nəmlikdir. Bu oblastlar həm istilik emalından əvvəl, həm də istilik emalı zamanı yaranır. Tədqiqatların nəticəsinə görə, qaz boşluqlarının ölçüsü, sayı, olduğu oblast və xarakteri kabelin elektrik möhkəmliyinə birbaşa təsir edir.

Ümumiyyətlə, polimer izolyasiyada həll olmuş komponentlərin yaranma səbəblərini üç əsas qrupa ayırmaq olar:

1. Termiki emaldan əvvəl nəmlik, hava və həlledicilər kimi müxtəlif maddələrin izolyasiyada qalma ehtimalı vardır.
2. İstilik emalı zamanı tikilmə reaksiyası zamanı ayrılan yan məhsullar, üzvi peroksidlərin parçalanma məhsulları və polimerin degradasiyası nəticəsində yaranan qazlar izolyasiya sisteminə təsir göstərir.
3. Yüksək təzyiqli istilik emalı zamanı qaz mühitindən polimərə diffuziya edən qazlar əlavə problemlər yaradır.

Peroksidli tikilmə prosesində metan və asetofenon qazlarının ayrılması xarakterikdir. Bu isə, öz növbəsində, yüksək temperaturda polietilendə qaz qabarcıqları yaradır. Nəticədə, izolyasiyada olan

boşluqlarda ionlaşma hadisəsi baş verərək izolyasiya sistemini zəiflədir və onun vaxtından əvvəl sıradan çıxmasına səbəb olur. Bütün bu qazvari məhsullar polimerdə əvvəlcədən mövcud olan r_0 radiuslu hava boşluqlarına diffuziya edərək, onun ölçülərini böyüdür.

Dissertasiya işində bu mühüm hadisənin inkişaf kinetikasi nəzəri baxımdan geniş tədqiq edilmişdir. Qabarcıqların ölçüləri isə təzyiq və modul arasındakı asılılıq aşağıdakı düsturla xarakterizə olunur:

$$\frac{P-P_0}{G} = \frac{5}{2} - 2 \left(1 - \frac{\alpha_g}{2r_0G} \right) \lambda^{-1} - \frac{\lambda^{-4}}{2} \quad (1)$$

Burada P və P_0 müvafiq olaraq daxili və xarici təzyiq, G polimerin elastiklik modulu, λ isə qabarcığın şişmə dərəcəsidir. Bu tənlikdən göründüyü kimi, qaz boşluqlarının böyüməsi polimerin fiziki xüsusiyyətlərindən və xarici təzyiqin səviyyəsindən asılıdır.

Eyni zamanda, qabarcığın böyümə ehtimalı aşağıdakı kimi müəyyən edilir:

$$W = \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (2)$$

Burada k – Boltsman sabiti, Q – qabarcığın böyüməsi üçün tələb olunan enerji, T – temperaturdur. Göründüyü kimi, temperatur artdıqca qabarcıqların böyüməsi ehtimalı yüksəlir ki, bu da izolyasiyanın dayanıqlığını azaldır. Bundan başqa, qaz qabarcığının kritik radiusu aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$r_{kr} = \frac{2\alpha_g}{(P-P_0)} \quad (3)$$

Burada α_g səthi gərilmə moduludur. Tənlikdən aydın olur ki, qabarcığın böyüməsinin qarşısını almaq üçün xarici təzyiq qabarcığın daxilindəki doymuş qazların təzyiqindən böyük olmalıdır.

Tikilmə prosesindən sonra qabarcıqların böyüməsinin qarşısını almaq üçün soyuma prosesi də yüksək təzyiqdə aparılmalıdır. Çünki temperaturun azalması ilə tarazlıq təzyiqi düşür, bu isə qaz qabarcıqlarının stabil qalmasını təmin edir.

İzolyasiya materialında və ya onun interfeysində daxili boşalma hadisələri adətən, boşluqlar, qabarcıqlar və ya qüsurlar nəticəsində yaranan güclü və qeyri-bərabər elektrik sahələrindən qaynaqlanır. İşdə qaz boşluqlarında baş verən proseslərlə yanaşı, TPE izolyasiyalı kabellərin köhnəlməsinə səbəb olan triinqlərində

elektrofiziki və kimyəvi proseslərdə dərin öyrənilmişdir. Bu tədqiqatlar kabellərin keyfiyyətini yaxşılaşdırmaq üçün təkliflər işləməyə imkanlar yaratmışdır.

Triinq boşalması da daxili boşalma ilə əlaqələndirilir. Triinqlər keçirici hissəciklərdən və ya izolyasiya daxilində mövcud olan boşluqlardan inkişaf etməyə başlayır. Burada müxtəlif ölçülü və formalı boşluqlara eləcə də, triinqlərə malik, TPE izolyasiyalı kabelin izolyasiyası daxilindəki elektrik sahə gərginliyinin və potensialının paylanmasına baxılmışdır. Müxtəlif defektlərə malik olan TPE izolyasiyalı yeraltı kabelinin tədqiqi, sonlu elementlər metoduna əsaslanan, COMSOL Multiphysics proqram təminatı istifadə edilməklə simulyasiya edilmiş və proqramda TPE izolyasiyalı kabelin ikiölçülü modeli hazırlanmışdır. Müvafiq ssenarlərdən bir-neçəsini nəzərdən keçirək:

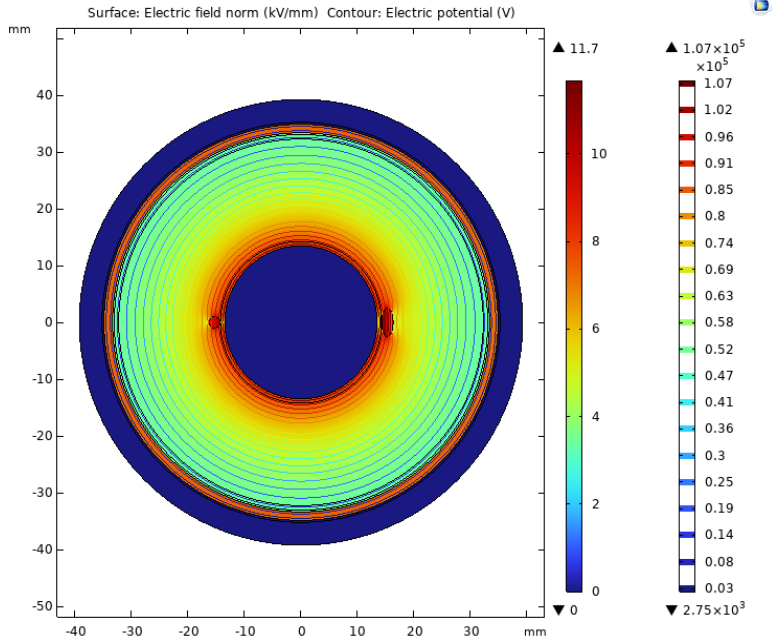
İzolyasiya daxilindəki müxtəlif boşluqların elektrik sahəsinə təsirini müəyyən etmək üçün ilk növbədə, COMSOL Multiphysics proqramında TPE izolyasiyalı kabelin ikiölçülü modeli qurulmuş və simulyasiya aparılmışdır (şəkil 5 və 6).

- Bir tərəfdən, ellipsvari boşluqda lokal elektrik sahə intensivliyinin dairəvi boşluğa bənzər şəkildə daha yüksək olduğu müşahidə edilmişdir (11,5 kV/mm / 10,1 kV/mm).

- Digər tərəfdən, radiusu 1 mm və 2 mm olan boşluqlar üçün analiz göstərdi ki, kiçik radiuslu boşluqlarda elektrik sahəsi daha yüksək olur (10,1 kV/mm / 9,5 kV/mm).

Bütün bunlar onu göstərir ki, boşluğun forması və ölçüsü elektrik sahəsinin qeyri-bərabər paylanmasına və ionlaşma şərtlərinə birbaşa təsir edir.

Su triinqlərinin təsirini qiymətləndirmək üçün həmçinin elektrostatik sahə modelləri qurulmuşdur. Bunun üçün, müxtəlif ölçülü yelpik formalı triinqlərdə sahənin paylanması analiz edilmişdir. İki müxtəlif ölçülü yelpik su triinqlərində elektrik sahə intensivliyinin paylanması və onun qrafikləri təsvir olumuş şəkil 7- də göstərilmişdir.

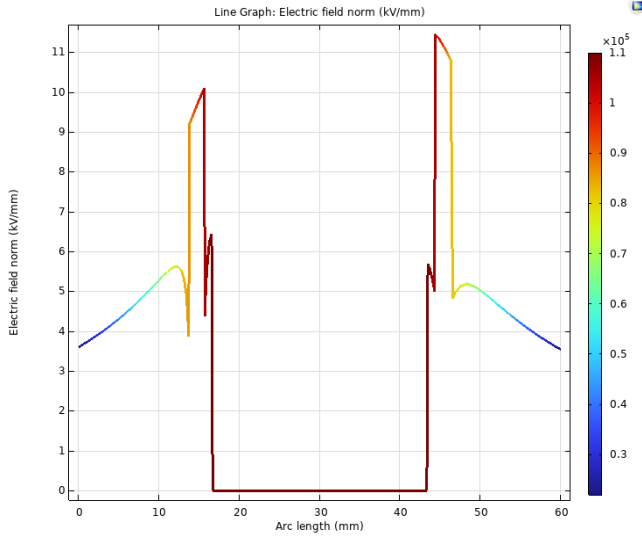


Şəkil 5. Müxtəlif formalı boşluqlar olan halda elektrik sahəsinin paylanması

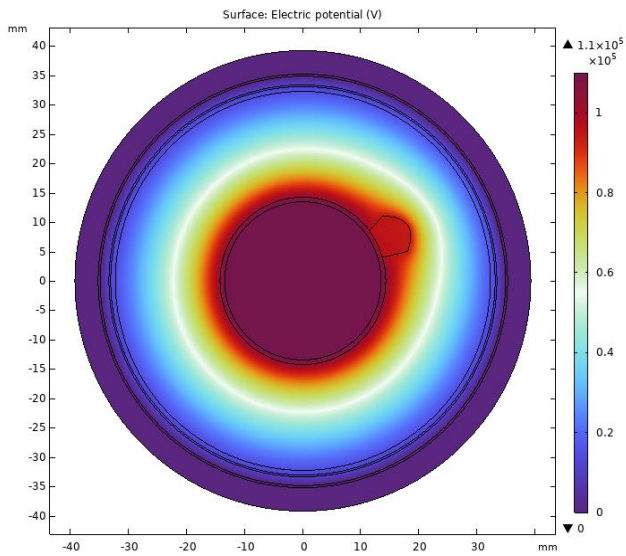
- Böyük ölçülü triinqdə sahə maksimum 22 kV/mm;
- Kiçik ölçülü triinqdə isə bu qiymət 17 kV/mm olmuşdur.

Nəticə etibarilə, bu analizlər göstərir ki, su triinqlərinin böyüməsi kabel izolyasiyasında dəşilmə riskini artırır və elektrodlar arasında qapanmaya səbəb ola bilər. Beləliklə, izolyasiya daxilində boşluqlar və triinqlər elektrik sahəsinin qeyri-bərabər paylanmasına gətirib çıxarır ki, bu da yüksək gərginlikli kabellərin istismar müddətini azaldır. Bütün bu tədqiqat işlərinin nəticələri TPE izolyasiyalı güc kabellərinin izolyasiya sisteminin dağılma mexanizmini təyin etməyə və qabaqlayıcı tədbirlər görməyə imkan verir.

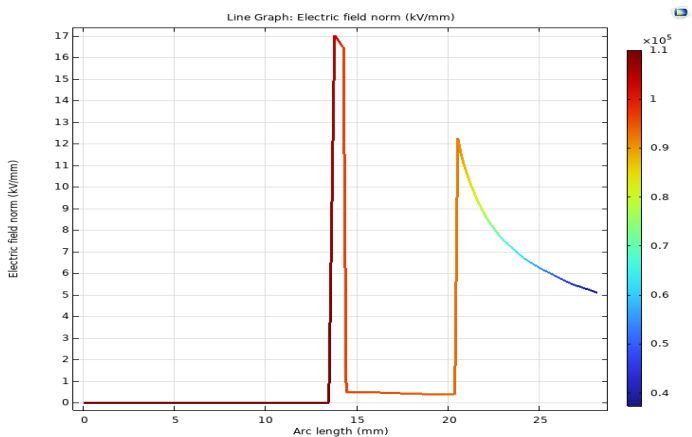
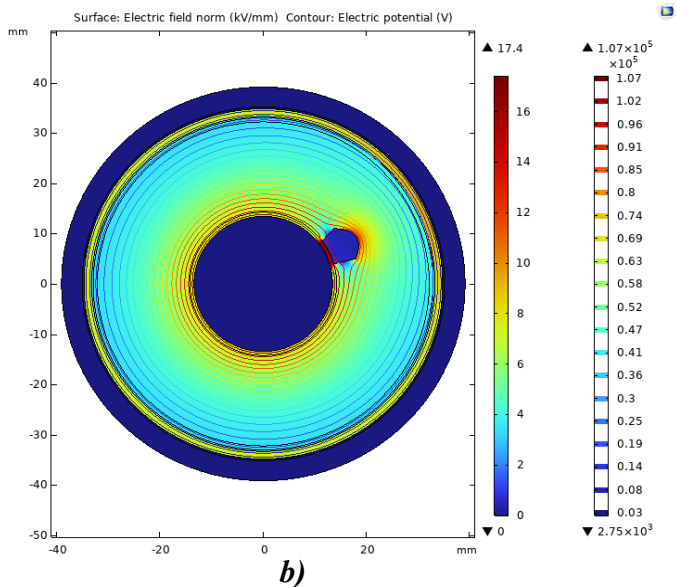
Analoji olaraq, bant formalı su triinqinin modelinə və elektrik sahəsinin formasına da dissertasiya işində baxılmışdır.



Şəkil 6. Müxtəlif formalı boşluqlar olan halda elektrik sahəsinin paylanma qrafiki



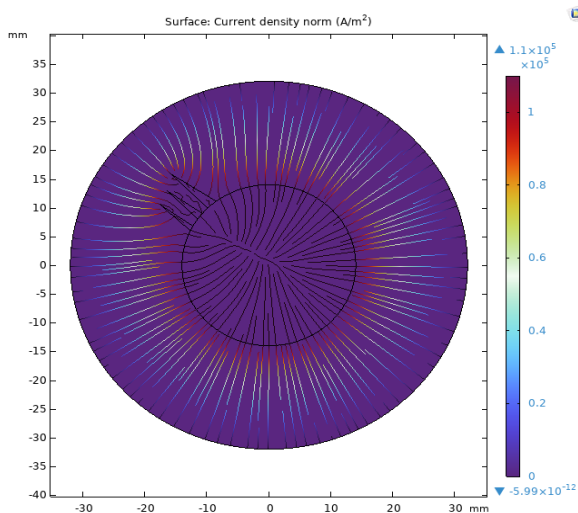
a)



Şəkil 7. Yəlpik formalı su triinqində elektrik sahəsinin paylanması və onun grafiki ayrıləri: a) elektrik sahəsinin; b) potensialın; c) triinqdə elektrik sahəsi və potensialın paylanma ayrıləri

Su triinqləri, adətən, ən böyük elektrik sahəsinin nəmliyin olduğu bölgədə formalaşır, çünki polyar su molekulları dielektroforetik qüvvələrin təsiri altında bu sahələrə yönəlir. Bu hadisə, kabel damarına yaxın ərazilərdə triinqlərin müşahidəsi ilə təsdiqlənir.

Bu istiqamətdə aparılan hesablamalar izolyasiyada cərəyan sıxlığını təyin etmək məqsədilə yarımkeçirici təbəqəyə həmsərhəd bölgədə həyata keçirilmişdir. Daha dəqiq nəticələr əldə etmək üçün üç fərqli ölçüdə triinq modeli hazırlanmışdır. Bundan əlavə, izolyasiyanın qeyri-xətti xüsusiyyətlərə malik olduğu nəzərə alınaraq, xüsusi elektrik keçiriciliyin elektrik sahəsindən asılılığı da tədqiq edilmişdir. Bu araşdırmaların nəticələri şəkil 8-də triinq budaqlarında cərəyan sıxlığının paylanması şəklində göstərilmişdir.

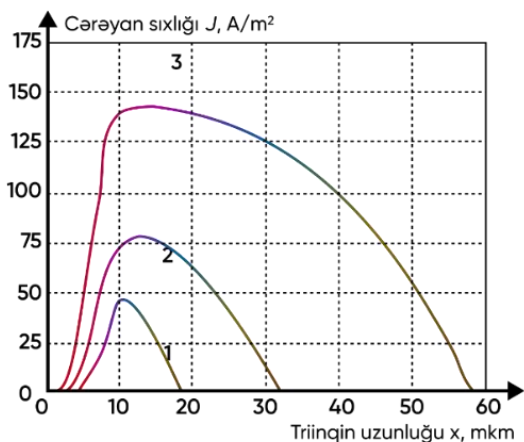


Şəkil 8. Su triinq budaqlarında cərəyan sıxlığının paylanma təsviri

Triinqin uzunluğunun və qalınlığının təsirini öyrənmək məqsədilə, triinqin digər parametrləri dəyişdirmədən konusvari 2D formasında triinq budaqlarında cərəyan sıxlığı tədqiq edilmişdir. Üç

fərqli triinq budaqlarında cərəyan sıxlıqlarının paylanmasının qrafiki 1-də göstərilmişdir.

Əldə edilən nəticələrə əsasən, su triinqlərində cərəyan keçirici mühit vasitəsilə axır. Xüsusilə, triinq budağının dibində keçirici defektin ən kəşik sahəsində baş verən dəyişiklik cərəyan sıxlığının artmasına səbəb olur. Bununla yanaşı, budaq boyunca cərəyanın bir hissəsi nəmlik kanalı vasitəsilə axır, digər hissəsi isə izolyasiyanın divarları boyunca yayılır ki, bu da cərəyan sıxlığının azalmasına gətirib çıxarır. Beləliklə, maksimum cərəyan sıxlığı triinqin başlanğıc hissəsində müşahidə edilir.



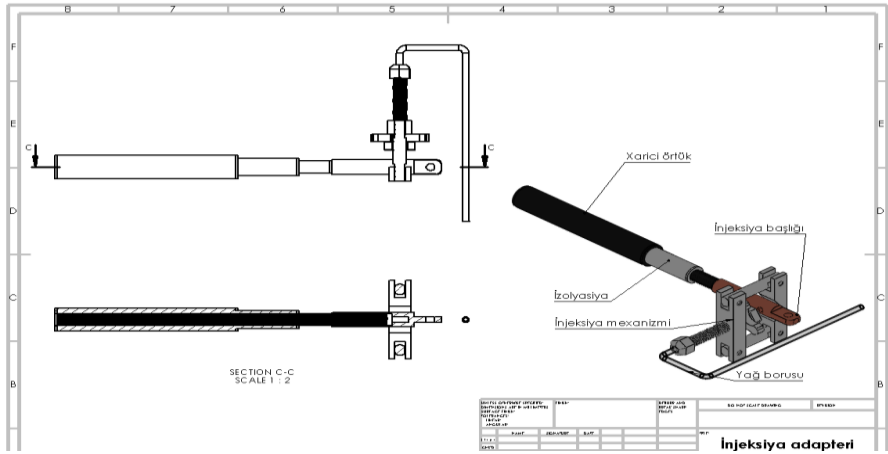
Qrafik 1. Müxtəlif ölçülü su triinqlərində cərəyan sıxlığının paylanması

Kabel xətlərinin vəziyyətini və qalıq resurslarını müəyyən etmək üçün periodik diaqnostika sınaqları aparılır; nəticələrə əsasən, sınaq periodikliyi müəyyən edilir. Kabel izolyasiyasının vəziyyəti tgδ və qismən boşalma ilə qiymətləndirilir, çünki bu parametrlər izolyasiyadakı defektlərə və struktur dəyişikliklərinə həssasdır. Qərb ölkələrinin təcrübəsi əsasında qəbul edilən kriteriyalarla, aparılan sınaqlarda, 100 kabel xəttinin 48-i yararlı, 14-ü qismən yararlı, 38-i isə yararsız olaraq qiymətləndirilmişdir. Bu sınaqlar Azərişiq ASC -nin Tədris mərkəzilə birlikdə N saylı şəbəkədə aparılmışdır. Zay kabel

xətlərinin böyük əksəriyyəti, TPE izolyasiyalı kabellərin istehsalının, çəkilişinin və istismarının ilk illərinə təsadüf edir.

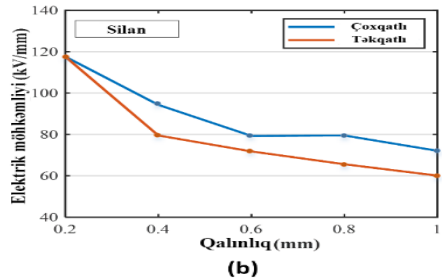
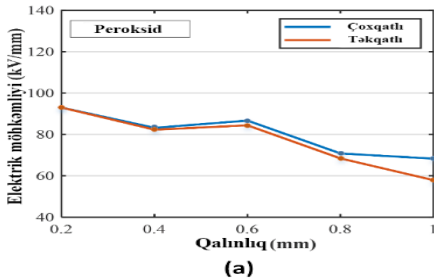
Azərbaycanın kabel sisteminin vəziyyətini nəzərdən keçirdikdə bir daha əmin olduq ki, orta, yüksək və ifratyüksək gərginlikli kabellərin izolyasiya sistemində, müxtəlif mərhələlərdə, yaranan defektlər onların istismar xarakteristikalarını korlayan və uzunömürlülüyünü qısaldan başlıca faktorlardır. Bu problemlərin həlli üçün ən effektiv metodlardan biri, defektlərin inkişafını məhdudlaşdırmaq və mövcud boşluqları xüsusi məhlulla doldurmaqdır. Bu metod, kabelin "cavanlaşdırılması" olaraq tanınır və silikon mayenin izolyasiyaya yeridilməsi yolu ilə kabelin ömrünü 20-30 il uzadır. Cavanlaşdırma üsulu, silikon maye vasitəsilə kabelin izolyasiyasındakı su triinqləri və qeyri-bircinslikləri bərpa edir, beləliklə elektrik möhkəmliyini artırır. Mayenin tərkibi, seçilən cavanlaşdırma mexanizminə uyğun olaraq dəyişir. Diffuziya prosesi zamanı maye, izolyasiyadakı zədələnmiş hissələrə daxil olur. Nəticədə, bu proses kabelin etibarlı ömrünü uzatmaq üçün izolyasiyanın kimyasını və fizikasını dəyişdirir. Bu metodun ölkəmizdə tətbiqi üçün xüsusi injeksiya başlığı hazırlanmış və Solidworks proqramında modelləşdirilmişdir (Şəkil 9).

TPE izolyasiyalı orta və yüksək gərginlikli kabellərin istismar keyfiyyət göstəricilərinin, onlarda istifadə olunan polimer kompozitlərin keyfiyyətindən və bu xassələrin müxtəlif faktorların təsirindən dəyişməsinin böyük rol oynamasını nəzərə alaraq, disstertasiya işinin **dördüncü fəslində**, TPE izolyasiyalı kabel kompozitlərinin, çoxfaktorlu və bir-biri ilə əlaqəli aparılan geniş tədqiqat işlərinin nəticələri şərh edilmişdir. Həmçinin onu da qeyd edək ki, tədqiqat obyekti kimi ölkəmizin kabel zavodlarında istehsal olunan analogi kabellərdə istifadə olunan, kabel kompozitləri seçilmişdir. Alınmış nəticələr ilk tədqiqat işi olduğundan aktualdır və ölkəmizin kabel sənayesi üçün faydalı və dolğun tədqiqat materialıdır. Müxtəlif variantda nümunələrin elektrik möhkəmliyi ilə yanaşı, onların digər dielektrik parametrləri, struktur dəyişiklikləri və onların dəyişmə mexanizmi müasir üsullarla ölçülmüş, alınmış nəticələrin təhlili və praktikliyinin elmi əsasları verilmişdir.



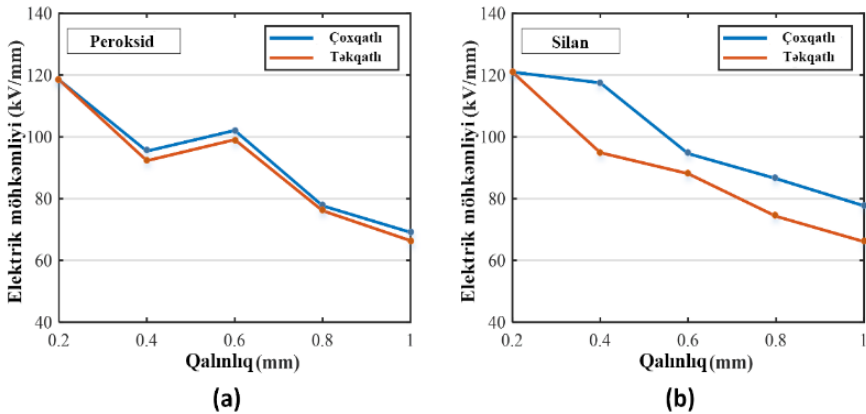
Şəkil 9. İnjesiya başlığının eskizi və görünüşü

İlk olaraq, tədqiqat COMSOL proqramı vasitəsilə həyata keçirilmiş və 500 V/san və 3000 V/san gərginlik artım sürətlərində təkqatlı və çoxqatlı nümunələrin elektrik möhkəmliyi IEC 60243-1 standartına uyğun hesablanmışdır (Qrafik 2 və 3). Nəticələr göstərmişdir ki, qatlı strukturların dielektrik xassələri daha yüksəkdir. Bununla yanaşı, simulyasiya nəticələrinin sahə tədqiqatları ilə üst-üstə düşdüyü müşahidə edilmişdir ki, bu da əldə olunan nəticələrin etibarlılığını artırır. (Qrafik 4.).

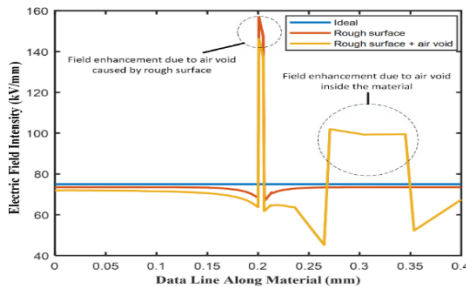


Qrafik 2. 500 V/s altında elektrik möhkəmliyinin izolyasiyanın qalınlığından və qatların sayından asılılığı: (a) peroksid (b) silan

Dissertasiya işində, istilik köhnəlməsinin nümunələrin xassələrinə təsiri də tədqiq edilmişdir. 450 saatlıq istilik köhnəlməsi şəraitində üç fərqli TPE izolyasiya materialının dielektrik xassələri (ϵ' , ϵ'' və $\tan\delta$), müxtəlif gərginlik və tezlik diapazonlarında öyrənilmişdir. Təcrübələr göstərmişdir ki, termal köhnəlmə artdıqca dielektrik itki bucağı və dielektrik itkiləri yüksəlir, lakin materialların qeyri-polyar molekulyar quruluşa malik olması səbəbindən dielektrik nüfuzluğunda əhəmiyyətli dəyişikliklər müşahidə olunmur. Qrafik 5-də isə yalnız bir material nümunəsi üçün alınmış dielektrik itki bucağının köhnəlmə periodundan asılılıq əyriləri əks olunur.



Qrafik 3. 3000 V/s altında elektrik möhkəmliyinin izolyasiyanın qalınlığından və qatların sayından asılılığı: (a) peroksid (b) silan



Qrafik 4. İdeal, nahamar səth və boşluq olan hallar üçün elektrik sahə intensivliyinin dəyişmə əyriləri

Köhnəlmənin izolyasiya nümunələrinə təsirinin müxtəlif faktorlar nəzərə alınmaqla tədqiqinin nəticələri ilə yanaşı, dielektrik parametrlərinin izolyasiyanın mühüm göstəriciləri olması nəzərə alınaraq, həmçinin 25 Hs ilə 1MHs tezlik və 20-120 °C temperatur intervalında iki fərqli izolyasiya materialının, uyğun olaraq, peroksid və silan əlavə edilmiş TPE izolyasiyalı kompozit materialların dielektrik parametrləri (ϵ' , ϵ'' və $\tan\delta$) tədqiq edilmişdir.

Eyni zamanda, elektrik boşalmalarının izolyasiya materiallarına təsiri araşdırılmışdır. QB ölçmələri izolyasiyanın vəziyyətini qiymətləndirmək üçün mühüm qeyri-dağıdıcı metodlardan biridir. Dissertasiyada QB-ların üç fərqli materialda təsiri öyrənilmiş və QB səviyyəsinin istilik köhnəlməsindən asılı olaraq dəyişməsi araşdırılmışdır (Qrafik 6).

Bu araşdırma nəticəsində məlum olmuşdur ki, istilik köhnəlməsi artdıqca QB başlanğıc gərginliyi azalır. Xüsusilə, bu artım peroksidli nümunələrdə daha qabarıq şəkildə özünü göstərmişdir.

Sınaq edilən kompozit nümunələrin istilik köhnəlməsindən sonra struktur dəyişiklərinin öyrənilməsi məqsədilə, müxtəlif müasir metod və texnikalar istifadə etməklə sınaqlar aparılmışdır.

➤ Furiye transformasiyalı infraqırmızı spektroskopiya metodu (FTİQ) (Qrafik 7);

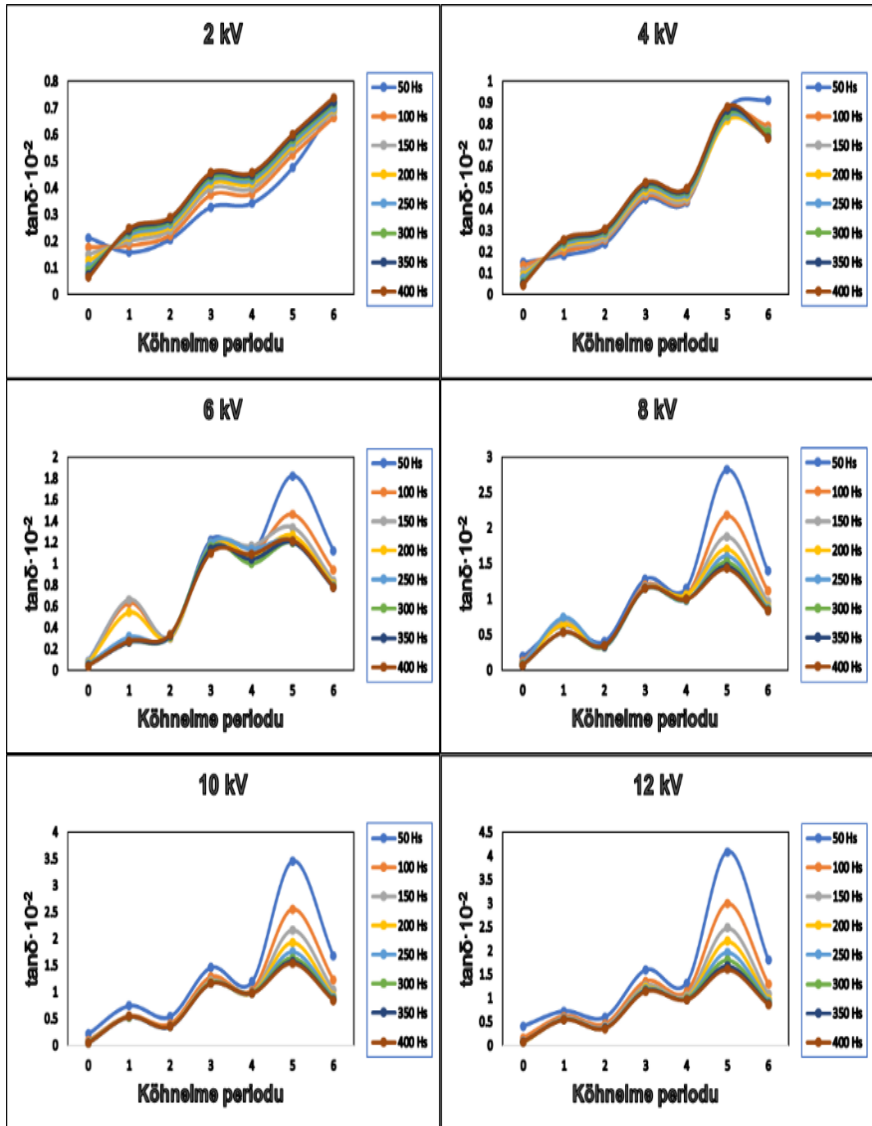
➤ X-şüalarının difraksiyası (XŞD) (Qrafik 8);

➤ Ultrabənövşəyi-görünən işıq spektroskopiyası (UB/G) (Qrafik 9);

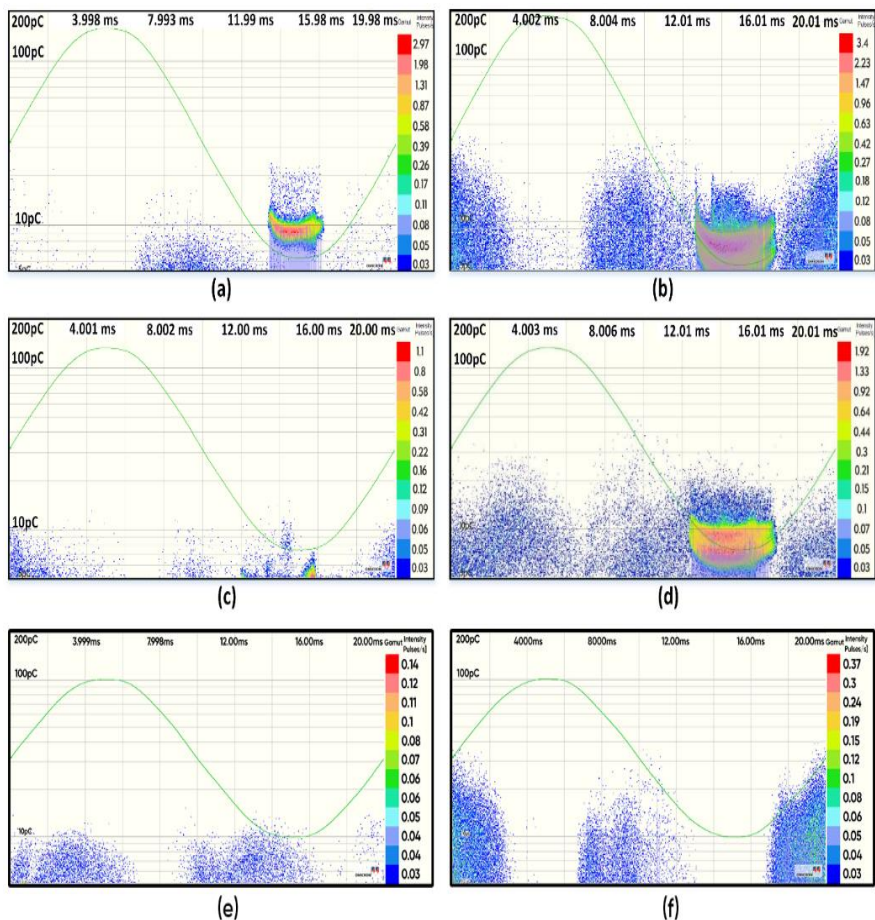
➤ Skanedici elektron mikroskop (SEM) (Şəkil 9).

FTİQ-dən tikilmiş polietilen materiallarının struktur dəyişikliklərini qiymətləndirmək üçün istifadə olunmuşdur. FTİQ analizi, həm köhnəlməmiş, həm də köhnəlmiş nümunələr üzərində aparılmışdır. Ölçmənin nəticələrinə görə 2915 sm^{-1} və 2848 sm^{-1} -də CH_2 qruplarının asimmetrik və simmetrik dartılma titrəyişləri, 1377 sm^{-1} -də CH_3 metil qrupunun simmetrik deformasiyası, 1715 sm^{-1} -də karboksilik turşuların və ketonların udulması müşahidə olunmuşdur.²

² Stancu, C. Space charge and electric field in thermally aged multilayer joints model / C. Stancu, P.V. Notingher, P. Notingher [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – Apr. 2016. vol. 23, no. 2, – p. 633–644.

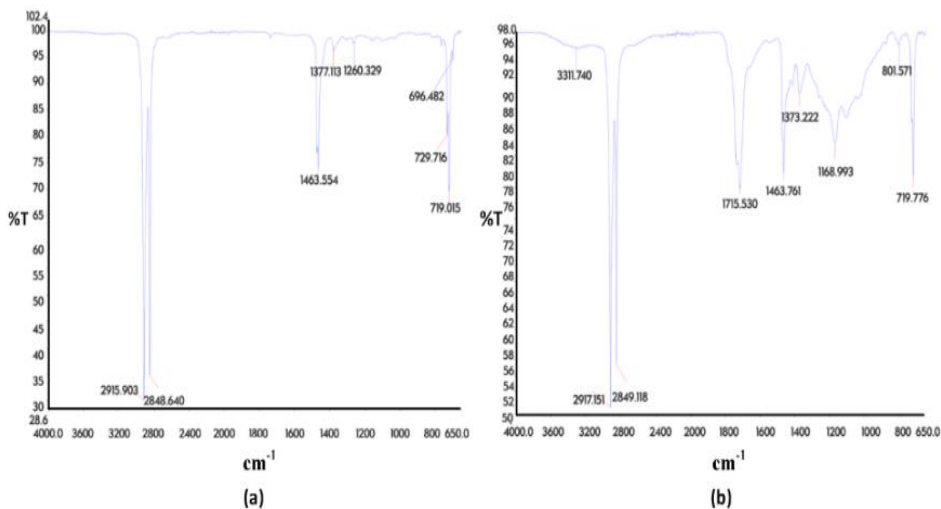


Qrafik 5. Peroksidli tikilmiş polietilen nümunənin $\tan \delta$ -nın müxtəlif gərginlik və tezliklərdə köhnəlmə müddətindən asılılıqları

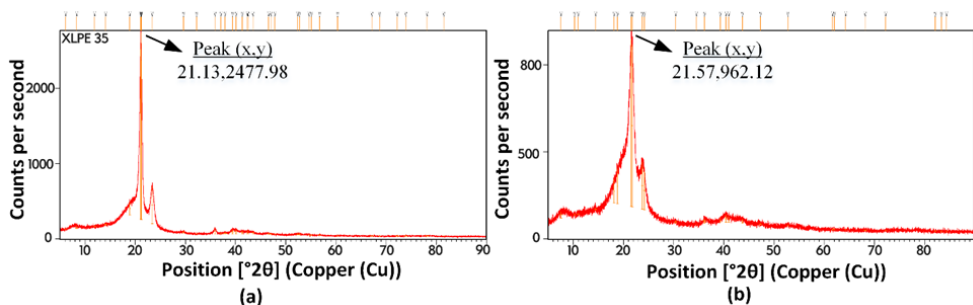


Qrafik 6. QB xüsusiyyətləri peroksidli TPE (a) köhnəlmədən əvvəl (b) köhnəlmədən sonra; silanlı TPE (c) köhnəlmədən əvvəl (d) köhnəlmədən sonra; işıqadavamlı TPE (e) köhnəlmədən əvvəl (f) köhnəlmədən sonra

1168 sm^{-1} -də -C-O-C- rabitəsinin titrəmələri ilə bağlı udulma müşahidə olunmuşdur. FTİQ spektrindəki dəyişikliklər, istilik köhnəlməsinin izolyasiyada hidroksil və karbonil qruplarının əmələ gəlməsinə səbəb olduğunu göstərir.



Qrafik 7. Nümunələrin FTİQ spektri (a) peroksidli TPE – köhnəlmədən əvvəl (b) peroksidli TPE - köhnəlmədən sonra

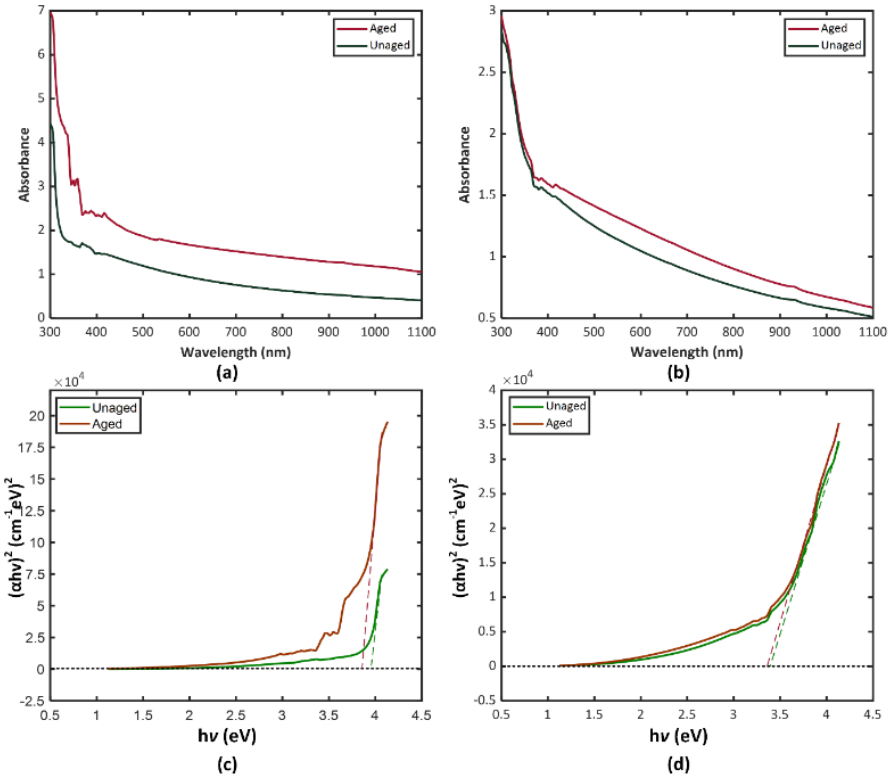


Qrafik 8. XŞD spektri peroksidli TPE (a) köhnəlmədən əvvəl (b) köhnəlmədən sonra

Rentgen difraktometri (XŞD) metodundan istifadə edilərək, TPE materiallarının kristal quruluşundakı dəyişikliklər analiz edilmişdir. XŞD nəticələri, istilik köhnəlməsinin materialın kristal quruluşuna yeni fazalar yaratmadığını, lakin kristallik morfolojiyaya təsir etdiyini göstərir.

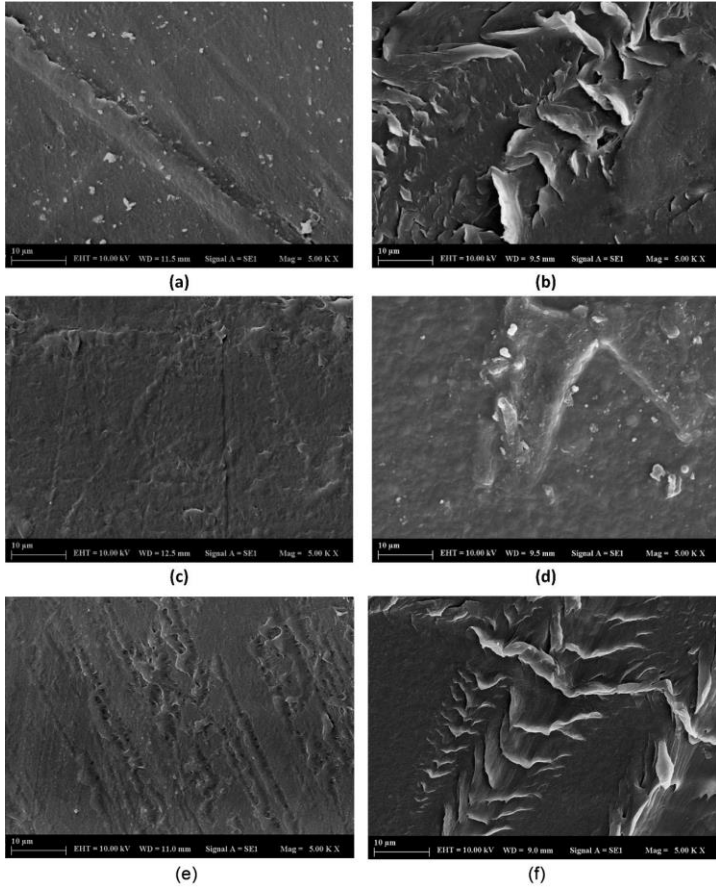
Qadağan olunmuş zonanın enerji səviyyələri Tauc tənliyi ilə hesablanmışdır. Köhnəlmə prosesindən sonra peroksidli TPE

nümunələrində qadağan olunmuş zonanın enerjisinin 3,91 eV-da 3,80 eV-a düşməsi müşahidə edilmişdir. Silanlı TPE üçün isə bu dəyər 3,40 eV-dan 3,36 eV-a enmişdir.



Qrafik 9. UB/G qrafikləri: (a) Peroksid əlavə edilmiş nümunələrin udma spektrləri; (b) Silan əlavə edilmiş nümunələrin udma spektrləri; (c) peroksid əlavə edilmiş nümunələrin qadağan olunmuş zonanın enerjisi; (d) silan əlavə edilmiş nümunələrin qadağan olunmuş zonanın enerjisi

Köhnəlmiş nümunələrdə 1000-1400 sm⁻¹ bölgəsində absorsiya genişlənir, bu da polimerdə C-C rabitəsinin yaranmasına bağlıdır. Silanlı TPE nümunəsində 3000-3500 sm⁻¹ bölgəsində hidroksil qruplarının -OH funksiyasının udulmasında artım müşahidə edilmişdir.



Şəkil 9. SEM təsvirləri peroksidli TPE (a) köhnəlmədən əvvəl (b) köhnəlmədən sonra; silanlı TPE (c) köhnəlmədən əvvəl (d) köhnəlmədən sonra; işıqadavamlı TPE (e) köhnəlmədən əvvəl (f) köhnəlmədən sonra

SEM analizi göstərir ki, köhnəlmə prosesi zamanı izolyasiya materiallarının səthində qeyri-bircins oblastlar və nahamarlıqlar yaranır, bu da izolyasiyanın elektrik xüsusiyyətlərini pisləşdirir və ömrünü azaldır.

Köhnəlmə prosesinin təhlilində qismən boşalma (QB) və tanges delta ($\tan\delta$) arasındakı güclü əlaqə Pearson korrelyasiya əmsalı

(r) ilə təsdiqlənmişdir. Təhlil edilən peroksidli, silanlı və işığadavamlı TPE nümunələrində korrelyasiya əmsalı uyğun olaraq 0.7734, 0.7895 və 0.7779 olmuşdurki, bu da tədricən artıqca QB-nın artmağa meyilli olduğunu göstərir. Həmçinin, P-dəyəri 0.05-dən kiçik olduğundan, bu əlaqənin statistik olaraq əhəmiyyətli olduğu sübut etmişdir. Eyni zamanda, T-test nəticələri sıfır fərziyyəsinin inkar olunduğunu və qarşılıqlı əlaqənin mövcud olduğunu göstərir.

Alınmış nəticələr bir daha ona dəlalət edir ki, kabel izolyasiyasının keyfiyyət göstəricilərini qiymətləndirən zaman iki parametrdən birinin qiymətini bilmək kifayətdir. Başqa sözlə istismar müddətində iki parametrdən birinə görə diaqnostika aparmaqla kabelin izolyasiya sisteminin cari vəziyyətini qiymətləndirmək olur. Bu isə kabellərin diaqnostika zamanını, nəticələrin etibarlılığına xələl gətirmədən, sınaq müddətini qısaldır.

DİSSERTASIYA İŞİNİN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ

1. Enerji sistemlərinin dayanıqlığı və etibarlılığı TPE izolyasiyalı müxtəlif gərginlik sinifli kabellərin keyfiyyətindən asılıdır. Ölkəmizdə bu kabellərin istehsalı və istifadəsi geniş yayıldığı üçün onların keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması önəmlidir.

TPE kabellərin vaxtından əvvəl sıradan çıxmasının səbəbləri ilə bağlı vahid konsepsiya yoxdur. Dissertasiyada TPE izolyasiyalı orta və yüksək gərginlikli kabellərdə yaranan elektrofiziki və kimyəvi proseslər, köhnəlmə mexanizmi və keyfiyyətə təsir edən problemlər kompleks şəkildə araşdırılmışdır.

Əldə olunan nəticələr kabellərin istismar xüsusiyyətlərinin yaxşılaşdırılması və qalıq resurslarının qiymətləndirilməsində əhəmiyyətlidir.

2. Müəyyən olunmuşdur ki, TPE izolyasiyalı kabellərdə köhnəlmə prosesini sürətləndirən, onun istismar xarakteristikalarını korlayan əsas faktorlar izolyasiya sistemində, kabellərin istehsal və istismar mərhələlərində meydana çıxan hava (qaz), su və elektrik triinqləri eləcə də digər qeyri-bircinsliklərdir.

Bunu nəzərə alaraq, izolyasiya sistemində mövcudluğu ehtimal olunan ilkin mikroboşluqların inkişaf kinetikasının riyazi

modeli qurulmuş, onların böyümə şərtləri və sərhədləri təyin edilmişdir. Göstərilmişdir ki, boşluqların böyüməsi onların təzyiqlər fərqiindən və polimerin səthi gərilmə qüvvəsindən asılıdır: $1 - \frac{\alpha_g}{2r_0G} >$

$0, \frac{2(P-P_0)}{G} \geq 5$ şərtləri ödənildikdə mikroboşluqlar inkişaf edir.

Bu şərt $P-P_0 < 2\alpha_g/r_0$ olduqda isə boşluqların inkişafı baş vermir. Müəyyən olunmuşdur ki, ilkin ölçüləri 10^{-4} m-dən kiçik olan mikroboşluqların ölçülərinin böyüməsi ehtimalı çox aşağıdır və bu tip mikroboşluqlar orta gərginlikli kabellər üçün təhlükəli hesab olunmur. Alınmış nəticələr istehsal prosesini idarəetməyə və məhsuldarlığın yüksəldilməsinə birbaşa təsir göstərir.

Qaz boşluqlarında elektrofiziki proseslər və izolyasiyaya təsiri elektrik potensialı və sahə intensivliyindən də asılıdır. İşdə, təcrübə ilə ölçülməsi mümkün olmadığından, Comsol Multiphysics proqramı ilə elektrik sahəsinin və potensialın paylanması simulyasiya aparılıb. Nəticələr göstərir ki, ellipsvari boşluqda elektrik sahəsi dairəvi boşluğa nəzərən daha böyük (11,5 kV/mm və 10,1 kV/mm), həmçinin kiçik radiuslu boşluqlarda isə sahə daha yüksəkdir (1 mm – 10,1 kV/mm, 2 mm – 9,5 kV/mm). Qeyd olunan nəticələr də, eyni zamanda istehsal prosesində zədələrinin minimizasiyası və təyini üçün təsirli üsullardandır. Simulyasiya ilə həmçinin, müxtəlif ölçü və formalı boşluqlarda qismən boşalmanın xarakterik əyrisi də qurulmuşdur ki, əldə olunanlar kabel istehsalının optimallaşdırılması üçün faydalıdır [8].

3. TPE izolyasiyalı orta və yüksək gərginlikli kabellərdə keyfiyyətin pozulmasına və köhnəlmənin sürətlənməsinə əsas səbəb izolyasiyada yaranan su triinqləridir. Lokal və yüksək elektrik sahəsi izolyasiyanın məhz bu yerlərdən deqradasiyasına yol açır.

Dissertasiyada su triinqlərinin yaranması, inkişafı və elektrofiziki-kimyəvi prosesləri “Comsol Multiphysics” proqramı ilə dərinlən araşdırılıb. Böyük triinqlərdə elektrik sahəsinin intensivliyi 22 kV/mm, kiçiklərdə isə 17 kV/mm alınmışdır. Triinqlərin budaqlarında cərəyan sıxlığı 45-dən 140 A/m²-yə qədər dəyişir ki, bu da həmin bölgələrdə istiliyin artmasına səbəb olur. Həmin bölgələrdə nəmlik quruyur, su triinqi elektrik triinqinə çevrilir və izolyasiyanın sürətlə sıradan çıxmasına gətirib çıxarır.

Bu nəticələr kabelin istilik artımı olan hissələrini müəyyən etməyə və istilik rejimini optimallaşdırmağa imkan verir. Beləliklə, nominal yük cərəyanının düzgün tənzimlənməsi və elektrik boşalmalarının qarşısının alınması kabelin ömrünü uzadır və etibarlılığını artırır.

4. TPE izolyasiyalı kabellərin 50 ildən çox istismar təcrübəsi göstərir ki, onların keyfiyyəti və dayanıqlılığı əsasən izolyasiya materiallarının xüsusiyyətləri və stabilliyindən asılıdır.

Dissertasiyada TPE kompozitlərinin elektrik möhkəmliyi və dielektrik xassələri müxtəlif şəraitdə sınaqdan keçirilmişdir. 0,2 mm qalınlığındakı peroksidli nümunənin elektrik möhkəmliyi 95 kV/mm, silanlı nümunənin isə 120 kV/mm olmuşdur; 1 mm qalınlıqda isə hər iki nümunənin göstəricisi təxminən 60 kV/mm təşkil edir. Peroksidli nümunələrdə daha çox defektlərin olması bu fərqi izah edir. Əldə olunan nəticələrdə, silan texnoloji üsulundan istifadənin üstünlüyü müəyyən olunmuşdur.

Çoxqatlı strukturlar elektrik möhkəmliyini təqvatlı nümunələrlə müqayisədə 18–23% artırır. Aparılan simulyasiyalar təcrübə nəticələri ilə yüksək uyğunluq göstərərək, əldə edilən nəticələrin etibarlılığını təsdiqləyir. İstehsalda təbəqəli strukturlardan istifadə elektrik möhkəmliyini artırması, yəni istismar xarakteristikalarının yüksəldilməsi üsullarından biri kimi qeyd olunmuşdur.

Elektrik möhkəmliyinin artırılması vasitəsilə kabelin etibarlılığı və ömrü uzadılır, istehsal proseslərinin optimallaşdırılması üçün əsaslar yaradılır. Nəticələr kabel sənayesində keyfiyyətə nəzarətin gücləndirilməsinə və enerji sistemlərinin dayanıqlığının təmin olunmasına töhfə verir [11].

5. TPE izolyasiyalı orta və yüksək gərginlikli kabellərdə temperaturun rolu böyükdür, çünki normadan artıq qızma istilik köhnəlməsini sürətləndirir və kabelin ömrünü azaldır. Buna görə də, kabel kompozitlərinin istilik təsirinə qarşı dayanıqlığı araşdırılmışdır.

Dissertasiyada peroksidli, silanlı və işığadavamlı TPE kompozitlərinin istilik köhnəlməsinə qarşı müqaviməti qiymətləndirilmiş, dielektrik itki bucağının tangensi ($\tan\delta$) istilik təsirinə ən həssas parametrlər kimi müəyyən olunmuşdur. Maksimal $\tan\delta$

dəyərləri müvafiq olaraq 0,041; 0,025 və 0,022 olmuş, dielektrik nüfuzluğu isə əsasən sabit qalmışdır. Köhnəlmə müddəti artdıqca tgδ qiymətinin artması materialın köhnəlmə səviyyəsinə təsir göstərir. Geniş tezlik və temperatur aralığında aparılan ölçmələrdə peroksidli nümunədə tgδ maksimumu 0,045-də, silanlı nümunədə isə iki maksimum (0,005 və 0,011) müşahidə edilmiş, temperatur artdıqca dielektrik nüfuzluğu 2,2-yə qədər azalmışdır.

Alınmış nəticələrdən belə demək olar ki, bu parametrlərin təyini materialın keyfiyyətini, köhnəlmə sürətini, gizli zədələrin mövcudluğunu və avadanlığın etibarlılıq səviyyəsini qiymətləndirməyə imkan verir, nəticədə elektrik qurğularının təhlükəsiz və uzunömürlü işləməsi təmin olunur. Eyni zamanda, istilik köhnəlməsinin TPE kompozitlərinin dielektrik xassələrinə təsir səviyyəsini göstərir və köhnəlmə dərəcəsinin tgδ vasitəsilə effektiv qiymətləndirilməsinə imkan verir [7,12,13,15].

6. TPE izolyasiyalı orta və yüksək gərginlikli kabellərin istismar vəziyyətini qiymətləndirmək üçün köhnəlmə ilə qismən boşalmanın (QB) intensivliyi arasında əlaqənin öyrənilməsi çox vacibdir. Təcrübə göstərir ki, köhnəlmə artdıqca QB intensivliyi 70% yüksəlir və bu, dielektrik itki bucağı tangensi (tgδ) ilə paralel artır.

Buna görə, kabel diaqnostikasında QB və tgδ ölçmələri ən effektiv üsullardır. Bakı elektrik şəbəkəsində aparılan sınaqlar da bu nəticələri təsdiqləyib. Pearson üsulu korrelyasiya analizində QB ilə tgδ arasında 0,77–0,79 səviyyəsində güclü əlaqə aşkar olunub. Bu o deməkdir ki, bir parametrin ölçülməsi ilə digərinin vəziyyəti və kabelin izolyasiyasının qiymətləndirilməsi dəqiq müəyyən edilə bilər [14].

7. Orta, yüksək və ifratyüksək gərginlikli kabellərin izolyasiya sistemində yaranan defektlər onların istismar etibarlılığını azaldır və ömrünü qısaldır. Bu problemlərin həllində ən səmərəli üsullardan biri silikon maye yeridilməsi ilə boşluq və triinqlərin qarşısını alan, “kabelin cavanlaşdırılması” adlanan texnologiyadır ki, bu da kabellərin ömrünü 20–30 il uzada bilər. Ona görə də köhnəlmiş kabellərin bərpasında bu metodun Azərbaycanda tətbiqi məqsədəuyğundur.

Ölkəmizdə bu üsulun tətbiqi üçün kabelin daxilinə maye yeridərək zədələnmiş hissələri bərpa etməyə imkan verən injeksiya

başlığının forması hazırlanmış, eskizi çəkilmiş və modeli SolidWorks proqramında işlənmişdir [16].

8. İstilik köhnəlməsindən sonra TPE izolyasiyalı orta və yüksək gərginlikli kabellərin izolyasiya sisteminin araşdırılması nəticəsində onlarda struktur dəyişikliklərinin baş verməsi müşahidə olunmuşdur.

Struktur dəyişiklikləri materialın deqradasiyasını sürətləndirən faktorlardan biri olduğu nəzərə alınaraq, FTİQ, XŞD, UB/G və SEM ölçmələri aparılmışdır. Köhnəlmədən sonra FTİQ ölçmələrində alınmış nəticələrdə $1000-1400 \text{ sm}^{-1}$ aralığındakı zolaq xeyli genişlənmişdir. Bu isə C-C rabitəsinin artması ilə əlaqəlidir. XŞD ölçmələrində qəfəs parametrləri hesablandığı zaman a, b və c parametrlərinin hər üçünün azaldığı təyin edilmişdir. XŞD ölçmələrində köhnəlmədən əvvəl və sonra qrafiklərdəki maksimumların intensivliyinin peroksidli nümunədə $2477,98 \rightarrow 962,12$ qədər azaldığı, silanlı nümunədə isə $2826,26 \rightarrow 3117,75$ qədər artdığı müəyyən edilmişdir ki, bununla silan əlavə edilmiş TPE ilə müqayisədə peroksid əlavə edilmiş TPE-nin kristallik quruluşunun istilik köhnəlməsindən daha çox təsirləndiyini söyləmək olar. UB ölçmələri zamanı isə peroksidli nümunədə zolaq boşluğu üçün $3,91 \rightarrow 3,8$ və silanlı üçün $3,4 \rightarrow 3,36$ qiymətlər əldə olunmuşdur. Bu nəticələrdə, peroksidli nümunələrin strukturunun elektrofiziki proseslərə daha çox həssas olduğu müşahidə olunmuşdur.

Nəticələrdən göründüyü kimi dissertasiya işində əldə olunmuş nəzəri-praktik məsələlər TPE izolyasiyalı orta və yüksək gərginlikli kabellərin istismar keyfiyyət göstəricilərinin yüksəldilməsində və qalıq resurslarının proqnozlaşdırılmasında tətbiq edilə bilər [14].

DISSERTASIYA İŞİNİN MÖVZUSUNA DAİR DƏRC OLUNMUŞ ELMİ ƏSƏRLƏRİN SİYAHISI

1. Х.С.Алиев, А.О.Оруджев, М. А. Джамалов. Некоторые вопросы старения кабелей с полимерной изоляцией. Збірник наукових праць “Велес” За матеріалами III міжнародної конференції “Зимові наукові читання” 1 частина м.Київ 31 січня 2018.

2. A.O.Orucov H.S.Əliyev, M.Ə.Camalov. Kabel izolyasiyasının köhnəlmə prosesinə qismən boşalmaların təsirinin təhlili. Azərbaycan Xalq Cümhuriyyətinin 100 illik yubileyinə həsr olunmuş” Təhsil – tədqiqat- istehsalat mexanizminin qurulması” mövzusunda keçirilən Respublika Elmi – texniki konfransı. Azərbaycan Texniki Universiteti 4-5 aprel 2018.

3. A.O.Orucov H.S.Əliyev, M.Ə.Camalov. Tikilmiş polietilen izolyasiyalı kabellərin istismar müddətinin proqnozlaşdırılması və istismar xarakteristikalarının yaxşılaşdırılması üsulları Azərbaycan Xalq Cümhuriyyətinin 100 illik yubileyinə həsr olunmuş “Tətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri” Beynəlxalq elmi konfransı 24-25 may 2018. Sumqayıt Dövlət Universiteti

4. A.M.Həşimov A.O.Orucov M.Ə.Camalov. İstehsal prosesində kabellərin polimer izolyasiyasında yaranan defektlər “Azərbaycan və Türkiyə Universitetləri: təhsil, elm, texnologiya" I Beynəlxalq elmi-praktiki konfrans Azərbaycan Texniki Universiteti 18-20 dekabr 2019.

5 . M.A.Jamalov. Frequency dispersion of dielectric properties of cable polymer insulation composites. Machine-building and Energy: New Concepts and Technologies” International Scientific-practical Conference materials, December 2-3, 2021, AzTU, Baku, Azerbaijan.

6. B.M. Sadıqlı, M.A.Jamalov.Accounting the parameters of the electrostatic corona model to specify the calculation of power transmission lines Machine-building and Energy: New Concepts and Technologies” International Scientific-practical Conference materials, December 2-3, 2021, AzTU, Baku, Azerbaijan.

7. M.Ə.Camalov .Kabel polimer izolyasiya kompozitlərinin dielektrik xassələrinin tezlik və temperatur dispersiyası AzTU Elmi əsərlər – Ученые записки – Scientific works, №1, 2021 ISSN 1815-1779.

8. A.M.Hashimov A.O.Orucov, M.A.Jamalov. Some theoretical issues of formation and development of gas voids in cross-linked polyethylene insulation. AJP FIZIKA 2022 volume XXVIII № 3, section En.

9. A.M. Həşimov, A.O. Orucov, M.Ə. Camalov. Termal köhnəlmənin tikilmiş polietilen izolyasiyasının dielektrik xassələrinə təsiri. “Elektroenergetikanın müasir problemləri və inkişaf

perspektivləri” Beynəlxalq elmi-texniki konfransının məruzə materialları. (17-18 noyabr 2022, ADDA, Bakı, Azərbaycan)

10. A.M. Həşimov, A.O. Orucov, K.B. Qurbanov, M.Ə. Camalov. Gərginliyin və temperaturun birgə təsirindən polietilen kompozitin dielektrik xassələrinin öyrənilməsi. Energetikanın problemləri № 1, 2023.

11. Mehti Camalov, Allahverdi Orucov, Arif Hashimov, Oktay Arikan, Firat Akin, “Breakdown strength analysis of XLPE insulation types: A comparative study for multi-layer structure and voltage rise rate,” Electric Power Systems Research, Volume 223, 2023, 109703, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109703>.

12. Arif Hashimov, Allahverdi Orucov, Mehti Jamalov. Analysis of structural changes and dielectric properties under thermal aging of cross-linked polyethylene used as power cables insulation. Energy Sustainability: Risks and Decision-Making Vol. 1 No. 2 (2023). <https://doi.org/10.61413/IVLN4952>

13. Camalov Mehti, Elmir Bagirli, and Khikmat Aliyev (2024). Investigation of Dielectric Properties and Structural Changes in XLPE Composite Insulation of Covered Conductor due to Thermal Aging. In Materials Science Forum (Vol. 1119, pp. 13–24). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/p-8vtimz>

14. Camalov, M., Akin, F., Hashimov, A. et al. The Degradation Analysis of XLPE Materials Under Thermal Aging: A Comprehensive Study Through Partial Discharge Measurements and Structural Characterization Techniques. Trans. Electr. Electron. Mater. (2024). <https://doi.org/10.1007/s42341-024-00533-4>

15. Camalov M.A., Orucov A.O., Aliyev H.S., Bagirli E.F., Assessing dielectric property variations in XLPE insulated composite materials under different voltage and frequency. VI international scientific and practical conference «Energy- and resource saving technologies: experience and prospects». Kyzylorda – 2024, p. 119-129

16. Camalov M.Ə., İstismardaki kabellərdə zədələrin aradan qaldırılmasının müasir üsulları. AzTU Elmi əsərlər, Bakı, 2024, № 1, s. 22-30. DOI:10.61413/CFXT5917

17. Orucov A.O., Əliyev H.S., Bağırılı E.F., Camalov M.Ə. Yüksək gərginlikli elektrik enerjisinin ötürülməsində istifadə olunan sualtı kablərlərin xüsusiyyətləri tendensiya və perspektivlər. Energetikanın problemləri, Bakı, 2024, № 3, s. 16-30

Həmmüəlliflərlə birgə işlərdə iddiaçının şəxsi fəaliyyəti

[5,7,16]- müəllif tərəfindən müstəqil yerinə yetirilmişdir. [1,2,3,4,6,8,9,10,11,12,13,14,15,17]— məsələnin qoyulduğu, tədqiqat, təhlil və nəticələrin emalı üzrə aparılan işlərin əsas həmmüəllifi olmuşdur.

Dissertasiyanın müdafiəsi 17 oktyabr 2025-ci il tarixində saat 15⁰⁰-da Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən BFD 2.04 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ 1073 Bakı, Azərbaycan, Hüseyn Cavid prospekti 25.

Dissertasiya işi ilə Azərbaycan Texniki Universitetinin kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

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

Avtoreferat 08. sentyabr 2025-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 02.09.2025
Kağızın formatı: A5
Həcm: 39988
Tiraj: 100