

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Рогинський Олександр Володимирович

УДК 621.313

ДИСЕРТАЦІЯ
ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА
ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ
КОМПОЗИТНОЇ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук (доктора філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Рогинський О.В.

Науковий керівник:
Безпрозванних Ганна Вікторівна
доктор технічних наук, професор

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Рогинський О.В. Вплив конструктивних та технологічних факторів на електричні характеристики високовольтної композитної електроізоляційної системи електричних машин. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (14 – Електрична інженерія) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, 2020 р.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі щодо впровадження сучасних високовольтних електроізоляційних композитних систем з адаптованою технологією та сучасними системами моніторингу на технологічній стадії для забезпечення комплексу енергетичних характеристик електричних машин.

Об'єктом дослідження є процес впливу конструкторських та технологічних факторів, що визначають електричні характеристики високовольтних композитних електроізоляційних систем електричних машин.

Предметом дослідження є електричні характеристики високовольтної композитної електроізоляційної системи, що забезпечують підвищення енергетичних характеристик електричних машин.

У вступі акцентовано увагу та обґрунтовано актуальність теми, що досліджується, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, наведено наукову новизну, а також, сформульовано практичне значення отриманих результатів.

В першому розділі проведено аналітичний огляд сучасного стану та вимог до характеристик електричної ізоляції високовольтних електричних машин. Розглянуто сучасні електроізоляційні системи корпусної термореактивної ізоляції на основі попередньо просочених

склослюдинітових стрічок або не просочених з вакуум-нагнітальним просоченням в епоксидному компаунді. Показано, що забезпечення надійності і довговічності електричних машин високої напруги пов'язано з необхідністю зменшення ступеня неоднорідності електричного поля, в котрому знаходиться корпусна ізоляція обмотки статора (стрижня або котушки). Наведено конструктивні рішення, які забезпечують зменшення неоднорідності електричного поля в пазовій та лобовій частинах обмоток.

Сформульовано основні напрямки та визначено основні задачі дисертаційних досліджень.

У другому розділі вперше показано вплив електрофізичних характеристик та товщини слюдинітового діелектричного бар'єру на розподіл електричного поля в високовольтної композитної ізоляції на основі попередньо просочених склослюдинітових стрічок, що ґрунтується на моделі накопичення поверхневого заряду на границі розділу діелектричного бар'єру та підкладки на основі склотканини з просочувальним складом. Вперше експериментально доведено ефект впливу товщини діелектричного бар'єру на короточасну електричну міцність макетів термореактивної ізоляції на основі склослюдинітових стрічок. Доведено, що макети зі стрічками з підвищеним вмістом слюдинітового бар'єру і склотканиною меншої товщини мають на (8-16)% вищі значення короточасної електричної міцності.

Розроблена методика розрахунку розподілу електричного поля по поверхні ізоляції уздовж лобової частини стрижнів високовольтної електричної машини дозволяє визначити верхню границю питомого поверхневого опору напівпровідного покриття для плавного розподілу електричного потенціалу по поверхні ізоляції, що забезпечує відсутність поверхневих розрядів. Достовірність чисельних розрахунків доведено експериментальними дослідженнями розподілу потенціалу по поверхні напівпровідного нелінійного покриття уздовж лобової частини зразків стрижнів гідрогенератора на лінійну напругу 10,5 кВ. Експериментально

підтверджена стабільність нелінійних властивостей покриттів в процесі тривалого електричного і теплового старіння спеціально виготовлених зразків, а також зразків стрижнів гідрогенератора в початковому стані і після комплексного впливу електричного поля напругою 26,25 кВ промислової частоти і температури 120°C протягом 260 годин.

В третьому розділі розглянуто найбільш типові види технологічних дефектів при виготовленні композитної електроізоляційної системи та проаналізовано чутливість часового тренду опору ізоляції до визначення технологічних дефектів у високовольтної корпусної ізоляції додаткових полюсів магнітної системи тягового електродвигуна постійного струму. Підтверджено ефективність реєстрації часткових розрядів у композитної корпусної ізоляції обмотки статора турбо- і гідрогенераторів для виявлення технологічних дефектів на стадії виготовлення електроізоляційних конструкцій та налаштування технологічного процесу.

На підставі моделювання частотних залежностей сукупних діелектричних характеристик на основі схеми заміщення обмоток статора при з'єднанні «зіркою» асинхронних електричних машин встановлено дві резонансні частоти. Достовірність результатів чисельного розрахунку сукупних діелектричних параметрів корпусної електроізоляційної системи трьох фаз підтверджено експериментальними дослідженнями зразків високовольтних асинхронних тягових двигунів.

Вперше обґрунтовано ефективність виявлення технологічних дефектів за тангенсом кута діелектричних втрат на резонансній частоті для оцінки стану композитної термореактивної електроізоляційної системи.

Показано доцільність застосування комплексних діагностичних обстежень для виявлення дефектів на технологічній стадії виготовлення і в експлуатації електричних машин на підставі аналізу характеристик корпусної електроізоляційної системи в режимі вимірювань сукупних діелектричних параметрів та індуктивності й добротності на резонансній частоті зразків електричного двигуна.

У четвертому розділі вперше обґрунтовано застосування опору ізоляції в якості інтегрального параметру стабільності технологічного процесу виготовлення високовольтних електроізоляційних систем для запобігання появи дефектів в електричних машинах.

Показана ефективність статистичного регулювання та розроблено методику контролю технологічного процесу виготовлення електроізоляційної системи, що базується на побудові і аналізі спеціальних графіків індивідуальних значень і кумулятивних сум опору ізоляції. Наведено аналіз стабільності технологічного процесу для трьох варіантів корпусної ізоляції магнітної системи тягового електродвигуна постійного струму.

Доведено, що контрольні карти кумулятивних сум є більш чутливими до варіабельності технологічного процесу виготовлення високовольтних електроізоляційних систем при обмежених обсягах значень опору ізоляції.

Вперше обґрунтовано використання контрольних карт кумулятивних сум опору ізоляції для аналізу стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем, що дозволяє визначити ранні розлади в технологічному процесі виготовлення електричних машин.

Ключові слова: високовольтна електроізоляційна композитна система, діелектричний бар'єр, електричне поле, напівпровідні покриття, питомий поверхневий опір, тангенс кута діелектричних втрат, опір ізоляції, добротність, стабільність технологічного процесу.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у журналах, які занесені до міжнародної наукометричної бази даних Scopus та Web of Science™ Core Collection:

1. Беспрозванных А. В., Костюков И.А., Рогинский А.В. Характеристики корпусной электроизоляционной системы асинхронных

электрических машин на резонансной частоте. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 4. С. 48-55. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.048>. (*Scopus*).

2. Беспрозванных А. В., Рогинский А. В. Мониторинг стабильности технологического процесса изготовления электроизоляционных систем тяговых электрических машин. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 6. С. 65-68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.10>. (*Web of Science™ Core Collection*).

3. Беспрозванных А.В., Рогинский А.В. Диэлектрическая спектроскопия корпусной термореактивной композитной электроизоляционной системы асинхронных тяговых электрических машин. *Електротехніка і електромеханіка*. 2018. № 1. С. 17-20. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.02>. (*Web of Science™ Core Collection*).

4. Беспрозванных А.В., Бойко А.Н., Рогинский А.В. Влияние диэлектрического барьера на распределение электрического поля в высоковольтной изоляции электрических машин. *Електротехніка і електромеханіка*. 2018. № 6. С. 63-65. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.09>. (*Web of Science™ Core Collection*).

5. Беспрозванных А. В., Кессаев А. Г., Мирчук И. А., Рогинский А. В. Выявление технологических дефектов в высоковольтной твердой изоляции электроизоляционных конструкций по характеристикам частичных разрядов. *Електротехніка і електромеханіка*. 2019. № 4. С. 53-58. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.08>. (*Web of Science™ Core Collection*).

6. Беспрозванных А.В., Рогинский А.В. Эффективность применения полупроводящих покрытий для регулирования электрического поля в высоковольтной изоляции электрических машин. *Електротехніка і електромеханіка*. 2019. № 6. С. 44-50. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.06> (*Web of Science™ Core Collection*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Рогинський О.В., Безпрозванних Г.В. Підвищення надійності тягових електродвигунів за рахунок сучасних систем електричної ізоляції. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXVI міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2018*, у 4 ч. Ч. II (м. Харків, 17–19 травня 2017 р.). Харків, 2017. С.237.

8. Рогинський О.В. Сучасні просочувальні компаунди з підвищеним класом нагрівостійкості для тягових електричних машин. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXVI міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2018*, у 4 ч. Ч. II (м. Харків, 16–18 травня 2018 р.). Харків, 2018. С.167.

9. Рогинський О.В. Вплив товщини склослюдопаперових стрічок на електричні параметри високовольтної термореактивної ізоляції обмоток статора. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXVII міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2019*, у 4 ч. Ч. II, (м. Харків, 15–17 травня 2019 р.). Харків, 2019. С. 167.

10. Рогинський О.В. Напівпровідні покриття як фактор підвищення ефективності регулювання електричного поля в статорній обмотці високовольтної електричної машини. *Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем: зб. наук. праць III міжнар. наук.-практ. конф. EEES-2019* (м. Харків, 12–15 листоп. 2019 р.). Харків, 2019. С. 139.

ABSTRACT

Roginskiy O.V. The influence of design and technological factors on electrical characteristics of high-voltage composite electrical insulation system of electric machines. - Manuscript.

The thesis is submitted to obtain a scientific degree of Doctor of Philosophy, specialty 141 – Electricity, electronics and electrical engineering – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and applied problem on introduction of modern high - voltage electroinsulating composite systems with the adapted technology and modern monitoring systems at a technological stage for maintenance of a complex of power characteristics of electric machines.

The object of research is the process of influence of design and technological factors that determine the electrical characteristics of high-voltage composite electrical insulation systems of electric machines.

The subject of research is the electrical characteristics of high-voltage composite electrical insulation system, which increase the energy performance of electric machines.

The introduction emphasizes the attention and substantiates the relevance of the research topic, shows the relationship of work with scientific programs, plans and topics, presents scientific novelty, as well as formulates the practical significance of the results.

The first section provides an analytical review of the current state and requirements for the electrical insulation characteristics of high-voltage electric machines. Modern electrical insulating systems of hull thermosetting insulation based on pre-impregnated glass mica tapes or not impregnated with vacuum injection impregnation in epoxy compound are considered. It is shown that ensuring the reliability and durability of high-voltage electric machines is associated with the need to reduce the degree of inhomogeneity of the electric field

in which the housing insulation of the stator winding (rod or coil). The constructive decisions which provide reduction of inhomogeneity of an electric field in groove and frontal parts of windings are resulted.

The main directions are formulated and the main tasks of dissertation researches are defined.

The second section shows for the first time the influence of electrophysical characteristics and thickness of the mica-dielectric barrier on the distribution of the electric field in high-voltage composite insulation based on pre-impregnated glass mica tapes, based on the model of surface charge accumulation at the interface of the dielectric barrier and impregnating composition. For the first time, the effect of the dielectric barrier thickness on the short-term electrical strength of thermosetting models based on glass-mica tapes was experimentally proved. It is proved that the models with tapes with a high content of mica barrier and fiberglass of smaller thickness have (8-16)% higher values of short-term electrical strength.

The developed method of calculating the electric field distribution on the insulation surface along the front part of the rods of a high-voltage electric machine allows determining the upper limit of the resistivity of the semiconductor coating for smooth distribution of electric potential on the insulation surface, which ensures no surface discharges. The credibility of numerical calculations is proved by experimental studies of the potential distribution on the surface of the semiconductor nonlinear coating along the frontal part of the samples of the hydrogenerator rods at a linear voltage of 10,5 kV. The stability of nonlinear properties of coatings during long-term electric and thermal aging of specially made samples, as well as samples of hydrogenerator rods in the initial state and after complex exposure to an electric field of 26,25 kV industrial frequency and 120°C for 260 hours was experimentally confirmed.

The third section considers the most typical types of technological defects in the manufacture of composite electrical insulation system and analyzes the sensitivity of the time trend of insulation resistance to determine technological

defects in high-voltage insulation of additional poles of the magnetic system of DC traction motor. The efficiency of registration of partial discharges in the composite body insulation of the stator winding of turbo- and hydrogenerators for detection of technological defects at the stage of manufacturing electrical insulation structures and adjustment of the technological process is confirmed.

On the basis of modelling of frequency dependences of aggregate dielectric characteristics on the basis of the scheme of replacement of stator windings at connection by "star" of asynchronous electric machines two resonant frequencies are established. The reliability of the results of numerical calculation of the total dielectric parameters of the hull electrical insulation system of three phases is confirmed by experimental studies of samples of high-voltage asynchronous traction motors.

For the first time, the efficiency of detecting technological defects by the tangent of the dielectric loss angle at the resonant frequency for the assessment of the state of a composite thermosetting electrical insulation system is substantiated.

The expediency of application of complex diagnostic tests for detection of defects at the technological stage of manufacturing and operation of electric machines on the basis of the analysis of characteristics of case electrical insulating system in the mode of measurements of aggregate dielectric parameters and inductance and Q-factor on resonant frequency of electric motor samples is shown.

The fourth section substantiates for the first time the use of insulation resistance as an integral parameter of the stability of the technological process of manufacturing high-voltage electrical insulation systems to prevent the appearance of defects in electrical machines.

The efficiency of statistical regulation is shown and the technique of control of technological process of manufacturing of electroinsulating system based on construction and the analysis of special schedules of individual values and cumulative sums of resistance of isolation is developed. The analysis of stability of technological process for three variants of case isolation of magnetic system of the traction electric motor of a direct current is resulted.

It is proved that the control maps of cumulative sums are more sensitive to the variability of the technological process of manufacturing high-voltage electrical insulation systems with limited values of insulation resistance.

For the first time the use of control maps of cumulative sums of insulation resistance for the analysis of stability of technological process of manufacturing of electroinsulating systems that allows defining early frustration in technological process of manufacturing of electrical machines is substantiated.

Keywords: high-voltage electrical insulating composite system, dielectric barrier, electric field, semiconductor coatings, surface resistivity, dielectric loss angle tangent, insulation resistance, Q-factor, process stability.

LIST OF PUBLICATIONS ON THE SUBJECT OF THE DISSERTATION

Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Besprozvannykh A. V., Kostiukov I.A., Rohynskiy A.V. Kharakterystyky korpusnoi elektroyzoliatsyonnoi systemy asynkhronnykh elektrycheskykh mashyn na rezonansnoi chastote. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. № 4. S. 48-55. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.048>. (*Scopus*).

2. Besprozvannykh A. V., Rohynskiy A. V. Monitorynh stablynosti tekhnolohycheskoho protsessa yzghotovleniya elektroyzoliatsyonnykh system tiahovukh elektrycheskykh mashyn. *Elektrotekhnika i elektromekhanika* . 2017. № 6. S. 65-68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.10>. (*Web of Science™ Core Collection*).

3. Besprozvannykh A.V., Rohynskiy A.V. Dielektrycheskaia spektroskopyia korpusnoi termoreaktyvnoi kompozytnoi elektroyzoliatsyonnoi systemu asynkhronnykh tiahovukh elektrycheskykh mashyn. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 2018. № 1. S. 17-20. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.02>. (*Web of Science™ Core Collection*).

4. Besprozvannykh A.V., Boiko A.N., Rohynskiy A.V. Vlyianye dielektrycheskoho barera na raspredelenye elektrycheskoho polia v vusokovoltnoi yzoliatsyy elektrycheskykh mashyn. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2018. № 6. S. 63-65. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.09>. (*Web of Science™ Core Collection*).

5. Besprozvannykh A. V., Kessaev A. G., Myrchuk I. A., Rohynskiy A. V. Vuiavlenye tekhnolohycheskykh defektov v vusokovoltnoi tverdoi yzoliatsyy elektroyzoliatsyonnykh konstruktsiyi po kharakterystykam chastychnykh razriadov. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2019. № 4. S. 53-58. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.08>. (*Web of Science™ Core Collection*).

6. Besprozvannykh A.V., Rohynskiy A.V. Effektyvnost pryimeneniya poluprovodiashchykh pokrutyi dlia rehulyrovaniya elektrycheskoho polia v vusokovoltnoi yzoliatsyy elektrycheskykh mashyn. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2019. № 6. S. 44-50. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.06> (*Web of Science™ Core Collection*).

Published works of approbatory character:

7. Rohynskiy O.V., Bezprozvannykh H.V. Pidvyshchennia nadiinosti tiahovykh elektrodyvnykh za rakhunok suchasnykh system elektrychnoi izoliatsii. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dop. KhKhVI mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2017, u 4 ch. Ch. II (m. Kharkiv, 17–19 travnia 2017 r.). Kharkiv, 2017. S.237.

8. Rohynskiy O.V. Suchasni prosochuvalni kompaundy z pidvyshchenym klasom nahrivostiikosti dlia tiahovykh elektrychnykh mashyn. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dop. KhKhVI mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2018, u 4 ch. Ch. II (m. Kharkiv, 16–18 travnia 2018 r.). Kharkiv, 2018. S.167.

9. Rohynskiy O.V. Vplyv tovshchyny sklosliudopaperyvykh strichok na elektrychni parametry vusokovoltnoi termoreaktyvnoi izoliatsii obmotok statora.

Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dop. KhKhVII mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2019, u 4 ch. Ch. II, (m. Kharkiv, 15–17 travnia 2019 r.). Kharkiv, 2019. S. 167.

10. Rohynskiy O.V. Napivprovidni pokryttia yak faktor pidvyshchennia efektyvnosti rehuliuвання elektrychnoho polia v statornoj obmottsi vysokovoltnoi elektrychnoi mashyny. Enerhoefektyvnist ta enerhetychna bezpeka elektroenerhetychnykh system: zb. nauk. prats III mizhnar. nauk.-prakt. konf. EEES-2019 (m. Kharkiv, 12–15 lystop. 2019 r.). Kharkiv, 2019. S. 139.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ВИСОКОВОЛЬТНА КОМПОЗИТНА ІЗОЛЯЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН, ВИМОГИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	14
1.1 Види електричної ізоляції у високовольтних електричних машинах	15
1.2 Корпусна термореактивна композиційна ізоляція електричних машин високої напруги на основі просочених стрічок.....	21
1.3 Конструкторські та технологічні рішення вирівнювання електричного поля на виході обмотки з паза високовольтних електричних машин.....	29
1.4 Висновки по розділу 1	36
РОЗДІЛ 2 РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ У ВИСОКОВОЛЬТНОЇ КОМПОЗИТНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН.....	39
2.1 Математична модель накопичення поверхневого заряду на плоскій границі розділу двох діелектриків	40
2.2 Вплив електрофізичних характеристик і товщини діелектричного бар'єра на розподіл електричного поля в високовольтної композитної ізоляції.....	45
2.3 Верифікація математичної моделі розподілу електричного поля у високовольтної термореактивної композитної ізоляції електричних машин	49
2.4 Електричне поле в пазовій частині електричних машин високої напруги.....	54
2.5 Регулювання електричного поля в лобовій частині електричних машин високої напруги.....	58

2.6 Експериментальна перевірка стабільності нелінійних властивостей напівпровідних противокоронних покриттів в процесі прискореного електричного і теплового старіння	64
2.7 Висновки по розділу 2.....	66
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНІ ДЕФЕКТИ У ВИСОКОВОЛЬТНОЇ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН, ДІАГНОСТИЧНІ ОЗНАКИ ТА ТЕХНІКА ВИЯВЛЕННЯ	69
3.1 Типові технологічні дефекти у електроізоляційної системі електричних машин.....	70
3.2 Чутливість часового тренду опору ізоляції до технологічних дефектів у електроізоляційної системі електричних машин	73
3.3 Ефективність виявлення технологічних дефектів в композитної електроізоляційної системі електричних машин за характеристиками часткових розрядів.....	78
3.4 Діелектрична спектроскопія термореактивної композитної електроізоляційної системи електричних машин.....	84
3.5 Сукупні характеристики корпусної електроізоляційної системи у режимі вимірювань параметрів індуктивності та добротності.....	92
3.6 Висновки по розділу 3.....	96
РОЗДІЛ 4 МОНІТОРИНГ СТАБІЛЬНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН.....	98
4.1 Статистичні характеристики для оцінки стабільності технологічного процесу.....	99
4.2 Опір ізоляції як інтегральний показник стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем.....	101
4.3 Статистичний аналіз за опором ізоляції стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем	105
4.4 Контрольні карти кумулятивних сум для оцінки стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем.....	110

4. 5 Висновки по розділу 4.....	113
ВИСНОВКИ	115
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	118
ДОДАТОК А – Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	133
ДОДАТОК Б – Акти впровадження.....	136