

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

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

Мірчук Ігор Анатолійович

УДК 621.315

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**  
**СУДНОВИХ КАБЕЛІВ ЗА РАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ**  
**ОХОЛОДЖЕННЯ ТА РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ**  
**ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ**

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.

\_\_\_\_\_ Мірчук І.А.

Науковий керівник:  
Безпрозванних Ганна Вікторівна  
доктор технічних наук, професор

Харків – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Мірчук І.А.* Підвищення експлуатаційних характеристик суднових кабелів за рахунок технологічних режимів охолодження та радіаційного опромінення електричної ізоляції. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Дисертаційна робота присвячена підвищенню експлуатаційних характеристик суднових кабелів за рахунок технологічних режимів охолодження та радіаційного опромінення ізоляції і оболонки на основі сучасних, які не поширюють полум'я, безгалогенних полімерних композицій, що забезпечують необхідний комплекс електричних, фізико-механічних параметрів при відповідному контролі технологічних процесів.

Для досягнення цієї мети були поставлені задачі:

- довести доцільність поступового охолодження поліетиленової ізоляції високовольтних силових кабелів для забезпечення як експлуатаційних параметрів, так і стабільності характеристик в процесі експлуатації;

- обґрунтувати застосування методу електротеплової аналогії для побудови математичної моделі охолодження ізольованої струмопровідної жили з урахуванням розподілу температури по товщині ізоляції в несталому тепловому режимі;

- розробити методику розрахунку технологічних параметрів режиму охолодження силових кабелів, що ґрунтується на розрахунку нелінійної теплової схеми заміщення ізольованої струмопровідної жили в несталому тепловому режимі з урахуванням залежності від температури теплового

опору і теплоємності ізоляції методами дискретних резистивних схем заміщення і вузлових потенціалів;

– визначити вплив технологічних режимів охолодження на розподіл температури по товщині екструдованої ізоляції та обґрунтувати тривалість перехідного процесу, що відповідає досягненню однакової температури по всій товщині ізоляції силових кабелів різного конструктивного виконання в різні моменти часу в залежності від температури води, що охолоджує;

– експериментально перевірити ефективність виявлення технологічних дефектів в конструкції силового суднового кабелю за характеристиками часткових розрядів;

– створити методикау оптимізації силового суднового кабелю коаксіальної конструкції для забезпечення максимального розсіювання потужності теплового потоку в навколишнє середовище, що обумовлює збільшення струмового навантаження, за умови теплової стійкості ізоляції;

– довести ефективність застосування захисної полімерної оболонки з високими теплопровідними властивостями для підвищення струмового навантаження силових суднових кабелів;

– визначити вплив енергії прискорених електронів на механічні та електричні характеристики суднових кабелів та встановити діапазон коефіцієнта опромінення ізоляції, що забезпечує підвищення експлуатаційних характеристик, на підставі кореляційного зв'язку між електричними та механічними характеристиками радіаційно-модифікованої високонаповненої антипіренами безгалогенної композиції на основі співполімеру етилен-вінілацетату;

– перевірити ефективність розподілу поглиненої дози по периметру й довжині при радіаційному опроміненні суднових кабелів за результатами фізико-механічних та теплових випробувань безгалогенної, яка не поширює полум'я, полімерної захисної оболонки кабелю;

– визначити на підставі прискореного теплового старіння теплову стійкість радіаційно-модифікованої безгалогенної, яка не поширює полум'я,

полімерної захисної оболонки, для прогнозування строку служби суднових кабелів та обґрунтувати можливість роботи в умовах підвищеної вологості і високих робочих температур неекранованого кабелю на основі неекранованих кручених пар з термопластичними ізоляцією і захисною оболонкою.

Об'єкт дослідження – технологічні режими охолодження та радіаційного опромінення електричної ізоляції суднових кабелів, виготовленої з наповненої антипіренами безгалогенної композиції на основі поліолефінів.

Предмет дослідження – експлуатаційні електричні, фізико-механічні та теплові характеристики полімерної ізоляції і оболонки, на основі наповненої антипіренами безгалогенної композиції, суднових кабелів.

**Методи дослідження.** Теоретичні та експериментальні дослідження базуються на використанні методів чисельного та фізичного моделювання технологічних режимів охолодження та радіаційного опромінення прискореними електронами електричної полімерної ізоляції та захисної оболонки суднових кабелів. Методи теорії нестационарної теплопровідності для розрахунку режиму охолодження полімерної ізоляції кабелю. Диференціальні рівняння теплопровідності та електропровідності. Метод електротеплових аналогій для визначення розподілу температури по товщині ізоляції в різні моменти часу, в залежності від температури води, що охолоджує судновий силовий кабель. Нелінійні теплова та електрична схеми заміщення ізолюваної струмопровідної жили в перехідному тепловому режимі. Неявний метод Ейлера та метод вузлових потенціалів для отримання розподілу температури по товщині ізоляції кабелю. Метод оптимізації конструкції силового кабелю за умови забезпечення охолодження в експлуатації для підвищення струмового навантаження. Рівняння теплового балансу для визначення теплової стійкості ізоляції в експлуатації. Теорія радіаційного зшивання для визначення оптимальної дози опромінення полімерної ізоляції. Теорія теплового старіння ізоляції для прогнозування строку служби суднових кабелів в експлуатації. Апроксимація експериментальних електричних, фізико-механічних й теплових

характеристик радіаційно-модифікованої ізоляції суднових кабелів. Кореляційний та регресійний аналіз електричних, механічних й теплових характеристик в процесі радіаційного модифікування полімерної ізоляції та захисної оболонки суднових кабелів. Техніка реєстрації часткових розрядів у високовольтній твердій полімерній ізоляції для виявлення дефектів на технологічній стадії виготовлення силових суднових кабелів.

В роботі отримані такі наукові результати.

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу з підвищення експлуатаційних характеристик суднових кабелів за рахунок технологічних режимів охолодження та опромінення електричної ізоляції на основі сучасних безгалогенних полімерних композицій, які не поширюють полум'я.

Удосконалено математичну модель технологічного процесу охолодження ізолюваної струмопровідної жили в несталому тепловому режимі шляхом урахування температурної залежності теплофізичних характеристик полімерної ізоляції під час розрахунку розподілу температури по товщині поліетиленової ізоляції в різні моменти часу в залежності від температури води при поступовому охолодженні, що дозволило визначити умови для забезпечення стабільних характеристик судового силового кабелю в експлуатації.

Запропоновано критерій для визначення технологічних параметрів режиму охолодження силових суднових кабелів, який являє собою час перехідного процесу охолодження ізолюваної струмопровідної жили для досягнення однакової температури по всій товщині полімерної ізоляції.

Встановлено оптимальну товщину полімерної захисної оболонки за умови довготривалої теплової стійкості радіаційно-зшитої ізоляції на основі поліолефінів, що забезпечує підвищення на 30 % струмове навантаження силового судового кабелю коаксіальної конструкції.

Визначено діапазон коефіцієнта опромінення прискореними електронами безгалогенної, що не поширює полум'я ізоляції суднових кабелів, що гарантує підвищення електричного опору радіаційно-

модифікованої полімерної ізоляції більш ніж в два рази, пробивної напруги на постійному струмі в 1,3 рази відносно неопроміненого стану.

Встановлено кореляцію між механічними і електричними характеристиками радіаційно-модифікованої ізоляції з безгалогенної композиції на основі поліолефінів, в залежності від лінійної швидкості проходження кабелю під пучком електронів при незмінному струмі пучка електронів.

Встановлено, в залежності від технологічних параметрів режиму опромінення суднових кабелів, розподіл поглиненої дози по периметру і довжині полімерної захисної оболонки з безгалогенної композиції, яка не поширює полум'я, що дозволяє визначити дозу опромінення кабелів, яка забезпечує підвищення стійкості захисної оболонки до дії агресивних хімічних речовин при збереженні високих фізико-механічних характеристик

Експериментально, на підставі прискореного старіння неекранованого кабелю на основі неекранованих кручених пар, з термопластичної поліетиленової ізоляції в захисній оболонці на основі полівінілхлоридного пластикату за умови адекватного старіння в експлуатації, доведено стійкість конструкції до підвищеної температури та вологості, що дозволяє прогнозувати строк служби суднових кабелів в залежності від робочої температури.

Розроблено методику розрахунку технологічних параметрів режиму охолодження силових кабелів, що ґрунтується на розрахунку нелінійної теплової схеми заміщення ізолюваної поліетиленом струмопровідної жили в несталому тепловому режимі, з урахуванням залежності від температури теплового опору і теплоємності, методами дискретних резистивних схем заміщення і вузлових потенціалів.

Запропонована методика та алгоритми можуть бути застосовані для визначення технологічних режимів охолодження полімерної ізоляції кабелів без застосування дорогих натурних експериментів, що особливо важливо при освоєнні нових матеріалів та конструкцій, а також при

модернізації існуючого на кабельних підприємствах обладнання, для охолодження силових, симетричних, радіочастотних та оптичних кабелів.

Доведено ефективність реєстрації часткових розрядів у високовольтній твердій ізоляції для виявлення дефектів на технологічній стадії виготовлення силових суднових кабелів, а також для налаштування технологічного процесу охолодження.

Розроблено методику розрахунку теплопередачі в одножильному силовому кабелі коаксіальної конструкції на підставі критеріальних рівнянь природної конвекції, для оптимізації конструкції силового суднового кабелю, для забезпечення максимальної лінійної щільності теплового потоку, що розсіюється з поверхні кабелю.

Показано ефективність застосування полімерних матеріалів на основі мікро- і нанокомпозитів з високими теплопровідними властивостями для захисної оболонки силових високовольтних суднових кабелів, що забезпечують збільшення розсіювання кабелем теплової потужності на 30 %.

Встановлено, що енергія прискорених електронів на рівні 0,5 MeV забезпечує більш високий ступінь зшивання полімерної безгалогенної ізоляції на основі високонаповненої антипіренами композиції в порівнянні з енергією 0,4 MeV при однаковому коефіцієнті опромінення, струмі пучка і кількості проходів ізолюваної жили під пучком електронів.

Доведено підвищення механічної міцності при розтягуванні, електричного опору ізоляції та пробивної напруги на постійному струмі радіаційно-модифікованої полімерної безгалогенної ізоляції з коефіцієнтом опромінення 5–7 м/(мА·хв) при сталому значенні відносного подовження при розриві ізоляції на рівні не менше 120 %, що забезпечує компроміс між еластичністю і жорсткістю суднового кабелю.

Встановлено зростання в 1,5–2 рази часу досягнення критичного параметра – відносного подовження при розриві радіаційно-модифікованої полімерної захисної оболонки на основі безгалогенної композиції, в порівнянні з не модифікованою термопластичною оболонкою, що

еквівалентно збільшенню строку експлуатації в 1,5–2 рази суднового контрольного кабелю в області максимальних робочих температур.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю «141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціалізації «141.04 Електроізоляційна, кабельна та оптоволоконна техніка»; у ТОВ «Азовська кабельна компанія» (м. Бердянськ) при розробці і визначенні оптимальних технологічних параметрів режимів виготовлення безгалогенних суднових кабелів, що не розповсюджують горіння, асоціації «Укрелектрокабель», в ПАТ «Завод «Південкабель».

Дисертаційна робота виконана в ПрАТ «Український науково-дослідний інститут кабельної промисловості» (м. Бердянськ) та на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків), згідно програм наукових досліджень ПрАТ «Український науково-дослідний інститут кабельної промисловості» (ПМ ЕИЮВ.505.564–2018 «Вивчення термічної стійкості оболонки кабелю марки СПОВЕНГ-FRHF 12x2,5 до та після опромінення швидкими електронами», ПМ ЕИЮВ.505.584–2019 «Визначення величини та розподілу поглиненої дози при радіаційному модифікуванні оболонки суднових кабелів, що не розповсюджують полум'я»), де здобувач був одним з розробників і виконавців програм.

**Ключові слова:** суднові кабелі, електрична ізоляція, захисна полімерна оболонка, безгалогенні композиції, зшита ізоляція, технологічні режими охолодження, радіаційне опромінення, пучок електронів, струмове навантаження, електричні та фізико-механічні характеристики, теплова стійкість ізоляції, прискорене старіння, прогнозування строку служби.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Патент на корисну модель № 93685 Україна, МПК H01B 7/28. Кабель силовий для передачі і розподілення електричної енергії / Мірчук І. А., Коровін М. Г.; № u201405033; заявл. 12.05.14; опубл. 10.10.14, Бюл. № 19.

2. Мирчук И. А., Беспрозванных А. В. Обоснование оптимальной длительно допустимой рабочей температуры современных полимерных изоляционных композиций судовых кабелей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2017. № 31(1253). С. 53–58.

3. Мирчук И. А., Беспрозванных А. В. К выбору оптимального коэффициента облучения безгалогенных полимерных композиций оболочек кабелей. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXV міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2017*, у 4 ч. Ч. II (м. Харків, 17–19 травня 2017 р.). Харків, 2017. С. 224.

4. Беспрозванных А. В., Мирчук И. А. Оценка возможности нормальной эксплуатации кабелей на основе витых пар в поливинилхлоридной защитной оболочке в условиях повышенной влажности и температуры. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2017. № 5. С. 51–54. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.08>

5. Беспрозванных А. В., Мирчук И. А. Корреляция между электрическими и механическими характеристиками кабелей с радиационно-модифицированной изоляцией на основе безгалогенной полимерной композиции. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. № 4. С. 54–57. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2018.4.09>

6. Мірчук І. А. Особливості радіаційного модифікування кабелів з безгалогенної наповненої полімерної композиції на основі етилен-вінілацетату. *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. 155.

7. Bezprozvannykh G. V. Mirchuk I. A. Influence of technological dose of irradiation on mechanical and electrical characteristics of polymeric insulation of wires. *Problems of atomic science and technology (PAST)*. 2018. № 5(117). P. 40–44.

8. Патент на корисну модель № 127200 Україна, МПК H01B 7/02. Кабель контролю і телекомунікації для морських бурових платформ / Коровін М. Г., Мірчук І. А., Савушкін І. В.; № u201800770; заявл. 29.01.18; опубл. 25.07.18, Бюл. № 14.

9. Патент на корисну модель № 127201 Україна, МПК H01B 7/02. Кабель силовий для морських бурових платформ / Коровін М. Г., Мірчук І. А., Савушкін І. В.; № u201800771; заявл. 29.01.18; опубл. 25.07.18, Бюл. № 14.

10. Мирчук И. А. Безгалогенные композиции для кабельно-проводниковой продукции. Преимущества, недостатки и особенности применения. *The Scientific Heritage*. 2018. Vol. 1, № 30. С. 32–41.

11. Мирчук И. А. Безгалогенные композиции для кабельно-проводниковой продукции. Преимущества, недостатки и особенности применения. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2018. № 2. С. 204–213.

12. Беспрозванных А. В., Мирчук И. А., Кессаев А. Г. Технологические параметры режима охлаждения полимерной изоляции силовых кабелей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2019. № 3. С. 44–49. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2019.3.07>

13. 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>

14. Мірчук І. А. Вплив технологічних параметрів лінійного прискорювача електронів на ступінь зшивання поліетиленової ізоляції кабелів бортових систем. *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. 164.

15. Мірчук І. А. Вплив радіаційного модифікування оболонки з безгалогенної композиції, що не поширює полум'я, на експлуатаційні властивості кабелів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2019. № 2. С. 35–42.

16. Беспрозванных А. В., Мирчук И. А. Распределение поглощенной дозы по периметру и длине полимерной защитной оболочки при радиационном облучении судового кабеля. *Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ)*. 2019. № 5(123). С. 44–48.

17. Беспрозванных А. В., Мирчук И. А. Оптимизация конструкции силовых судовых кабелей по условиям охлаждения в эксплуатации. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2019. № 14. С. 71–77.

18. Мірчук І. А. Особливості режиму охолодження поліетиленової ізоляції високовольтних силових кабелів. *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. 120.

## ABSTRACT

*Mirchuk I.A.* Increasing the operational properties of shipboard cables due to technological modes of cooling and electron beam irradiation of electrical insulation. – Qualified scientific work presented as a manuscript.

Ph.D. thesis undertaken in research specialization 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electric Mechanics" (14 – Electrical Engineering). – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to increasing of the operational properties of shipboard cables due to the technological modes of cooling and electron beam irradiation of insulation and sheath based on modern flame retardant halogen-free polymeric compounds, which provide the necessary complex of electrical, physical and mechanical properties with appropriate control of technological processes.

To achieve this, the following tasks were set:

– to prove the expediency of gradual cooling of polyethylene insulation of high-voltage power cables to ensure both operational parameters and stability of properties during operation;

– to substantiate the application of the method of electro-thermal analogy for the construction of a mathematical model of cooling of insulated conductor taking into account the temperature distribution over the thickness of insulation in a non-constant thermal mode;

– to develop a method of calculating the technological parameters of the cooling mode of power cable, based on the calculation of a nonlinear thermal equivalent circuit of insulated conductor in a non-constant thermal mode, taking into account dependence the thermal resistance and heat capacity of the insulation from the temperature by methods of discrete resistive equivalent circuits;

– to determine the influence of technological cooling modes on the temperature distribution in the thickness of extruded insulation and to justify the duration of the transition process, which corresponds to achievement of the same

temperature over the entire thickness of power cables insulation various design at different time points, depending on the cooling water temperature;

- to verify experimentally the efficiency of detecting technological defects in the design of the power shipboard cable by partial discharges values;

- to create a methodology for optimizing the power shipboard cable with coaxial construction to ensure maximum heat flow power dissipation into the environment, which causes an increase in current load, if insulation thermal resistance provided;

- to prove the efficiency of the use a protective polymer sheath with high thermal conductive properties to increase the current load of power shipboard cables;

- to determine the effect of accelerated electron beam energy on the mechanical and electrical properties of shipboard cables and determine the irradiation coefficient range for insulation which provides an increase of operational characteristics, on the basis of correlation between the electrical and mechanical properties of filled with flame retardants halogen-free compound based on ethylene-vinyl acetate modified by electron beam;

- to verify the efficiency of absorbed dose distribution along the perimeter and length of shipboard cables after irradiation according to obtained results of mechanical and thermal tests of polymeric halogen-free flame retardant protective sheath of cable;

- to determine the thermal stability of the halogen-free flame-retardant polymeric protective sheath modified by irradiating, on basis of accelerated thermal aging, to predict the service life of shipboard cables and to substantiate the possibility of operation in conditions with high humidity and high operating temperatures for unscreened cable with unscreened twisted pairs and thermoplastic insulation and protective sheath.

Object of research – technological modes of cooling and irradiation of electrical insulation of shipboard cables, based on halogen-free filled with flame retardants polyolefin compound.

Subject of research – electrical, mechanical and thermal operational properties of the shipboard cables polymer insulation and sheath based on filled with flame retardants halogen-free compounds.

Research methods. Theoretical and experimental studies are based on the use of methods of numerical and physical modeling of technological modes of cooling and electron beam irradiation of polymeric electrical insulation and protective sheath of shipboard cables. Methods of theory of non-stationary thermal conductivity to calculation of cooling mode of polymeric cable insulation. Differential equations of thermal conductivity and electrical conductivity. The method of electro-thermal analogies to determine the temperature distribution in the thickness of insulation at different time points, depending on the temperature of cooling water for shipboard power cable. Nonlinear thermal and electrical equivalent circuits of insulated conductor in transient thermal mode. Implicit Euler method and nodal potentials method for obtaining temperature distribution in thickness of cable insulation. A method of optimizing the design of the power cable provided cooling during operation to increase the current load. Thermal balance equation to determining the thermal resistance of insulation during operation. Irradiation crosslinking theory to determine the optimal irradiation dose of polymeric insulation. The theory of thermal aging of insulation to predict the service life of shipboard cables. Approximation of experimental electrical, mechanical and thermal properties of modified by irradiation insulation of shipboard cables. Correlation and regression analysis of electrical, mechanical and thermal properties after modification by irradiation of polymeric insulation and protective sheath of shipboard cables. Partial discharge detection technique in high voltage solid polymeric insulation for defect detection on technological stage of production power shipboard cable.

The following scientific results are obtained in the work.

The dissertation solves the scientific and practical problem of increasing the operational properties of shipboard cables due to the technological modes of

cooling and irradiation of electrical insulation based on modern halogen-free flame retardant polymeric compounds.

The mathematical model of technological process of cooling insulated conductor in unsteady thermal mode, by taking into account dependence of thermal and physical characteristics of polymeric insulation from the temperature, for determine the temperature distribution throughout the thickness of polyethylene insulation at different time points depending on water temperature under gradual cooling, has been improved. Mathematical model allows to determine the conditions for ensuring stable characteristics of the shipboard power cable during operation.

The criterion for determination of technological parameters of the cooling mode of power shipboard cables, which is the time of the transitional process of cooling the insulated conductor to achieve an equal temperature throughout the thickness of the polymeric insulation, is proposed.

The optimum thickness of the polymeric protective sheath on condition of long-term thermal stability of irradiated cross-linked based on polyolefin insulation has been established. It provides a 30 % increase current load of the coaxial design shipboard power cable.

The range of irradiation coefficient for halogen free flame retardant insulation of shipboard cables when guarantees increasing electrical resistance of polymeric insulation modified by electron beam more than twice, the breakdown direct current voltage 1,3 times relative to the non-irradiated condition, is determined.

The correlation between mechanical and electrical properties of halogen-free based on polyolefin insulation modified by electron beam, depending on the linear velocity of the cable under the electron beam and constant value of electron beam current.

The distribution of the absorbed dose along the perimeter and length of the halogen-free flame retardant polymeric protective sheath depending on the technological parameters of the irradiation modes of shipboard cables, is

established and allows to determine the irradiation dose for cables, when protective sheath provides increasing the resistance to aggressive chemicals while high physical and mechanical properties is still available.

The stability of the cables structure to high temperature and humidity is experimentally proved on the basis of accelerated aging of unscreened cable with unscreened twisted pairs, with thermoplastic polyethylene insulation and protective polyvinylchloride sheath with adequate aging during operation. It allows predicting the service life of shipboard cables depending on the operating temperature.

A technique for calculating the technological parameters of the power cable cooling mode by the methods of discrete resistive equivalent circuits has been developed. A technique based on the calculation of a nonlinear thermal scheme of substitution of conductor with polyethylene insulation in a non-constant thermal mode, taking into account the dependence of thermal resistance and heat capacity from the temperature.

The proposed methodology and algorithms can be applied to determine the technological modes of cooling cable polymeric insulation without using expensive full-scale experiments, especially important for the new compounds development and cable constructions, as well as modernization available at cable factories equipment for cooling power cable, data cable with twisted pairs, radio frequency and optical cables.

The efficiency of determining partial discharges in high-voltage solid insulation has been proved to detect defects at the technological stage of the producing of power shipboard cables, as well as to adjust the technological process of cooling.

The methodology for heat transfer in a coaxial design single-core power cable based on criterial equations of natural convection has been developed to optimize the design of the power shipboard cable to ensure the maximum linear density of heat flow dissipated from the cable surface.

The efficiency of application of polymeric materials based on micro- and nanocomposites with high thermal conductivity for sheath of high-voltage

shipboard cables, providing a 30 % increase in thermal dissipating of power cable, is shown.

It is established the energy of accelerated electrons 0.5 MeV provides a higher degree of crosslinking of polymeric halogen-free insulation based on filled with flame retardants compound compared to the energy of 0.4 MeV at the same irradiation coefficient, electron beam current and the number of wire passages under electron beam.

It is established an increase of tensile strength, electrical insulation resistance and breakdown DC voltage of crosslinked polymeric halogen-free insulation with irradiation coefficient 5-7 m/(mA·min) with constant value of elongation at break not less than 120 % which ensure a compromise between rigidity and flexibility of the shipboard cable.

It is established an increase in 1,5–2 times the time of reaching the critical parameter – elongation at break of the modified by electron beam polymeric sheath based on a halogen-free compound compared to the same thermoplastic non-modifying sheath. It is an increase service life of the shipboard control cable at maximum operational temperatures in 1,5–2 times.

The materials of the dissertation are used at the educational process Department of Electrical Insulating and Cable Technique of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" at education bachelors and masters in disciplines of specialty "141 – Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electric Mechanics" (specialization "141.04 Electrical Isolating, Cable and Fiber-Optic Technique"), at "Azov Cable Company" (Berdians'k) at development and determination of optimal technological parameters of production modes of halogen-free, flame retardant shipboard cables, Association "Ukrelectrocable", in PJSC "Yuzhkable Works".

Dissertation work was performed at the PJSC "Ukrainian Scientific and Research Institute of Cable Industry" (Berdians'k) and Department of Electrical Insulating and Cable Technique of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv) according to research programs of PJSC

“Ukrainian Scientific and Research Institute of Cable Industry” (PM EIUV.505.564–2018 “The research of thermal stability of the sheath cable SPOVEng-FRHF 12x2,5 before and after exposure under electron beam”, PM EIUV.505.584–2019 “Determination of the quantity and distribution of the absorbed dose after irradiation of the sheath of shipboard flame retardant cables”) wherein the applicant was one of the program developers and executor of individual sections.

Keywords: shipboard cables, electrical insulation, protective polymeric sheath, halogen-free compounds, cross-linked insulation, technological cooling modes, irradiation, electron beam, current load, electrical properties, physical and mechanical properties, thermal stability of insulation, accelerated aging, service life prediction.

#### LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT

1. Patent na korysnu model' # 93685 Ukrayina, MPK H01B 7/02. Kabel' sylovyi dlya peredachi i rozpodilennya elektrychnoyi enerhiyi / Mirchuk I. A., Korovin M. H.; # u201405033; zayavl. 12.05.14; opubl. 10.10.14, Byul. # 19.

2. Mirchuk I. A., Bezprozvannykh G. V. The substation of the optimum long term operating temperature of modern polymer insulating composition of ship cables. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Enerhetyka: nadiynist' ta enerhoefektyvnist'*. 2017. # 31(1253). S. 53–58.

3. Mirchuk I. A., Bezprozvannykh G. V. K vyboru optimalnogo koeffitsiyenta oblucheniya bezgalogenykh polimernykh kompozitsiy obolochek kabeley. *Informatsiyi tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: tezy dop. XXV mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2017, u 4 ch. Ch. II (m. Kharkiv, 17–19 travnya 2017 r.).* Kharkiv, 2017. S. 224.

4. Bezprozvannykh G. V., Mirchuk I. A. The evaluation of possibility of normal operation of cables based on twisted pairs with PVC jacket under the conditions of high humidity and temperature. *Electrical engineering &*

*electromechanics*. 2017. # 5. S. 51–54. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.08>

5. Bezprozvannykh G. V., Mirchuk I. A. Correlation between electrical and mechanical characteristics of cables with radiation-modified insulation on the basis of a halogen-free polymer composition. *Electrical engineering & electromechanics*. 2018. # 4. S. 54–57. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2018.4.09>

6. Mirchuk I. A. Osoblyvosti radiatsiynoho modyfikuvannya kabeliv z bezhalohennoyi napovnenoyi polimernoyi kompozytsiyi na osnovi etylen-vinilatsetatu. *Informatsiyni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: tezy dop. XXVI mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2018, u 4 ch. Ch. II* (m. Kharkiv, 16–18 travnya 2018 r.). Kharkiv, 2018. S. 155.

7. Bezprozvannykh G. V. Mirchuk I. A. Influence of technological dose of irradiation on mechanical and electrical characteristics of polymeric insulation of wires. *Problems of atomic science and technology (PAST)*. 2018. # 5(117). P. 40–44.

8. Patent na korysnu model' # 127200 Ukrayina, MPK H01B 7/02. Kabel' kontrolyu i telekomunikatsiyi dlya mors'kykh burovykh platform / Korovin M. H., Mirchuk I. A., Savushkin I. V.; # u201800770; zayavl. 29.01.18; opubl. 25.07.18, Byul. # 14.

9. Patent na korysnu model' # 127201 Ukrayina, MPK H01B 7/02. Kabel' sylovyi dlya mors'kykh burovykh platform / Korovin M. H., Mirchuk I. A., Savushkin I. V.; # u201800771; zayavl. 29.01.18; opubl. 25.07.18, Byul. # 14.

10. Mirchuk I. A. Halogen-free compounds for wire and cable. Advantages, flaws and features of application. *The Scientific Heritage*. 2018. Vol. 1, № 30. S. 32–41.

11. Mirchuk I. A. Halogen-free compounds for wire and cable. Advantages, flaws and features of application. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2018. # 2. S. 204–213.

12. Bezprozvannykh G. V., Mirchuk I. A., Kyessayev A. G. Technological parameters of the cooling mode of polymer insulation of power cables. *Electrical engineering & electromechanics*. 2019. # 3. S. 44–49. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2019.3.07>

13. Bezprozvannykh G. V., Kyessayev A. G., Mirchuk I. A., Roginskiy A. V. Identification of technological defects in high-voltage solid insulation of electrical insulation structures on the characteristics of partial discharges. *Electrical engineering & electromechanics*. 2019. # 4. S. 53–58. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.08>

14. Mirchuk I. A. Vplyv tekhnolohichnykh parametriv liniynoho pryskoryuvacha elektroniv na stupin' zshyvannya polietylenovoyi izolyatsiyi kabeliv bortovykh system. *Informatsiyi tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: tezy dop. XXVII mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2019, u 4 ch. Ch. II (m. Kharkiv, 15–17 travnya 2019 r.)*. Kharkiv, 2019. S. 164.

15. Mirchuk I. A. Influence of irradiation of the sheath of halogen free flame retardant compound on the operational properties of cables. *Vcheni zapysky Tavrijs'kogo nacional'nogo universytetu imeni V.I. Vernads'kogo. Tekhnichni nauky*. 2019. # 2. S. 35–42.

16. Bezprozvannykh G. V. Mirchuk I. A. Distribution of absorbed dose by the perimeter and the length of the polymeric protective sheath at radiacinous irradiation of the ship cable. *Problems of atomic science and technology (PAST)*. 2019. # 5(123). P. 44–48.

17. Bezprozvannykh G. V. Mirchuk I. A. Optimization of design of ship power cables with conditions of cooling in operation. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Enerhetyka: nadiynist' ta enerhoefektyvnist'*. 2019. # 14. S. 71–77.

18. Mirchuk I. A. Osoblyvosti rezhymu okholodzhennya polietylenovoyi izolyatsiyi vysokovol'tnykh sylovykh kabeliv. *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. 120.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ВИМОГИ ДО ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ КАБЕЛІВ .....	19
1.1 Загальні вимоги до суднових кабелів .....	19
1.2 Характеристики сучасних безгалогенних полімерних композицій для ізоляції та захисних оболонок кабелів .....	23
1.3 Технологічні режими охолодження та радіаційного опромінення як фактори забезпечення експлуатаційних характеристик суднових кабелів .....	33
1.4 Алгоритми розрахунку режимів охолодження екструдованої ізоляції .....	34
1.5 Фізичні аспекти радіаційного опромінення ізоляції кабелів .....	40
1.6 Висновки по розділу 1 .....	50
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕЖИМУ ОХОЛОДЖЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ СУДНОВИХ КАБЕЛІВ .....	54
2.1 Особливості режиму охолодження поліетиленової ізоляції високовольтних силових кабелів .....	54
2.2 Теоретичне підґрунтя математичної моделі охолодження ізоляції кабелів .....	61
2.3 Теплова схема заміщення ізолюваної жили в перехідному тепловому режимі .....	68
2.4 Теплофізичні властивості полімерних композицій на основі поліетилену .....	71
2.5 Методика визначення температурного поля по товщині ізоляції при її охолодженні .....	74

2.6 Вплив технологічних режимів охолодження на розподіл температури по товщині екструдованої поліетиленової ізоляції.....	77
2.7 Ефективність виявлення технологічних дефектів за характеристиками часткових розрядів .....	85
2.8 Висновки по розділу 2 .....	88
<b>РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ СУДНОВИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ЗА УМОВИ ОХОЛОДЖЕННЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....</b>	
3.1 Вимоги до струмового навантаження суднових силових кабелів .....	91
3.2 Методика розрахунку теплопередачі в одножильному силовому кабелі коаксіальної конструкції .....	96
3.3 Лінійна щільність теплового потоку як цільова функція оптимізації конструкції кабелю .....	103
3.4. Визначення теплової стійкості силового кабелю на підставі теплового балансу .....	108
3.5 Підвищення струмового навантаження силових кабелів шляхом впровадження наповнених полімерних композицій .....	112
3.6 Обґрунтування довготривалої робочої температури суднових кабелів .....	116
3.7 Висновки по розділу 3 .....	120
<b>РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ РАДІАЦІЙНОГО МОДИФІКУВАННЯ ПОЛІМЕРНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ БЕЗ ВМІСТУ ГАЛОГЕНІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДНОВИХ КАБЕЛІВ .....</b>	
4.1. Радіаційне модифікування полімерної ізоляції кабелів .....	122
4.2 Особливості властивостей та технологічних режимів виготовлення ізоляції на основі високонаповнених антипіренами етилен-вінілацетатних композицій для ізоляції і оболонки суднових кабелів ..	126
4.3 Технологічні параметри радіаційного модифікування .....	130
4.4 Вплив енергії прискорених електронів на механічні та електричні характеристиками радіаційно-модифікованої ізоляції суднових кабелів .....	134

4.5 Кореляція між електричними та механічними характеристиками суднових кабелів з радіаційно-модифікованою ізоляцією .....	138
4.6 Розподіл поглиненої дози по периметру й довжині полімерної захисної оболонки при радіаційному опроміненні суднового кабелю ..	141
4.7 Вплив поглиненої дози на фізико-механічні та теплові характеристики полімерної захисної оболонки суднових кабелів .....	147
4.8 Обґрунтування апроксимуючих функцій для обробки експериментальних даних .....	152
4.9 Висновки по розділу 4 .....	155
<b>РОЗДІЛ 5 ПРОГНОЗУВАННЯ СТРОКУ СЛУЖБИ СУДНОВИХ КАБЕЛІВ НА ПІДСТАВІ ПРИСКОРЕНОГО ТЕПЛОВОГО СТАРІННЯ.....</b>	
5.1 Умови проведення адекватного теплового старіння.....	157
5.2 Визначення теплової стійкості полімерної оболонки суднових кабелів .....	160
5.3 Обґрунтування можливості роботи в умовах підвищеної вологості і високих робочих температур неекранованого кабелю на основі неекранованих кручених пар .....	163
5.4 Висновки по розділу 5 .....	169
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>170</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>173</b>
<b>ДОДАТОК А – Патенти на корисну модель .....</b>	<b>191</b>
<b>ДОДАТОК Б – Акти впровадження .....</b>	<b>194</b>
<b>ДОДАТОК В – Список публікацій здобувача за темою дисертації .....</b>	<b>199</b>