



ЩЕРБА

Анатолій Андрійович — член-кореспондент НАН України, завідувач відділу електроживлення технологічних систем Інституту електродинаміки НАН України

НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА І СЕРТИФІКАЦІЇ СУЧАСНОЇ ВІТЧИЗНЯНОЇ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ КАБЕЛЬНО- ПРОВІДНИКОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

Стенограма доповіді на засіданні
Президії НАН України 10 серпня 2022 року

У доповіді підкреслено важливу роль, яку відіграв Інститут електродинаміки НАН України у розв'язанні певних актуальних стратегічних науково-технічних завдань з підвищення енергетичної безпеки України у воєнний і повоєнний період. Наведено найбільш вагомі результати, пов'язані з розробленням наукових основ, забезпеченням наукового супроводу, а також з практичним вирішенням невідкладних науково-технічних і технологічних проблем організації виробництва та сертифікації сучасної вітчизняної кабельно-провідникової продукції з метою підвищення надійності та безпеки електроенергетики України.

Шановний Анатолію Глібовичу!

Шановні члени Президії НАН України!

Якість кабельно-провідникової продукції відіграє надзвичайно важливу роль у забезпеченні надійної роботи всіх систем електроенергопостачання та інших об'єктів критичної інфраструктури України, особливо в період воєнного стану.

До кабельно-провідникової продукції, що випускається в Україні, належать СІПи та силові кабелі. Самоутримні ізольовані проводи, або так звані СІПи, з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ-ізоляцією) призначені для передачі й розподілу електричної енергії повітряними лініями електропередачі (ЛЕП) (рис. 1а) на напругу до 1 кВ, 6 кВ, 10 кВ, 20 кВ і 35 кВ. Найбільш поширеними в Україні є скручені у джгут низьковольтні СІПи для підвищення надійності і безпеки розгалужених повітряних ЛЕП у містах, селищах, парках, поблизу транспортних магістралей.

СІПи є стійкими до коротких замикань та обривів, що дозволяє у 20–30 разів зменшити, порівняно з неізольованими

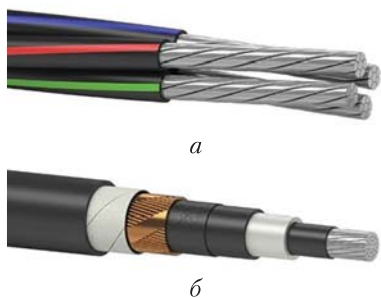


Рис. 1. Кабельно-провідникова продукція: *а* – самоутримні ізольовані провали (СШП); *б* – силовий кабель

Порівняння характеристик кабелів з різними видами ізоляції

Показники	Силові кабелі з ізоляцією	
	ЗПЕ	паперово-масляною
Перепад висот	необмежений	до 15 м
Ушкодження на 100 км	1,5	17
Діелектричні втрати (tgδ)	0,001	0,008
Енергомiсткість виробництва, %	25–40	100
Діелектрична проникність, ε	2,3	3,7
Температура експлуатації, °С	90	70
Температура прокладання, °С	-20	0

проводами, кількість аварій і відключень електроенергії в разі стихійних лих або під час ведення воєнних дій. Вони також більш безпечні на дотик, завдяки чому підвищується електробезпека населення, зокрема в разі падіння проводів. Крім того, СШП в 3–4 рази зменшують падіння напруги на струмопроводах ЛЕП.

Іншим видом кабельно-провідникової продукції є силові кабелі зі ЗПЕ-ізоляцією (рис. 1б). За рівнем напруги їх поділяють на одно- та 3-фазні кабелі на низьку напругу – до 1 кВ; кабелі на середню напругу – до 35 кВ; високу напругу – до 160 кВ і надвисоку напругу – понад 161 кВ. Найпоширенішими в Україні та Європі є кабелі на напругу до 110 кВ. Для прокладання потужних електромереж у вели-

ких містах і промислових регіонах використовують найбільш наукомісткі надвисоковольтні кабелі на напругу до 400 кВ. В Україні харківський завод «Південкабель» вже освоїв серійний випуск таких кабелів. До речі, в Європі такі силові кабелі можуть виробляти лише декілька країн.

Важливим елементом сучасної кабельно-провідникової продукції є так звана зшита поліетиленова (ЗПЕ) ізоляція. Це тверда ізоляція з високоякісного поліетилену, довгі молекулярні ланцюжки якого з'єднані між собою додатковими поперечними зв'язками, що виникають після радіаційної, хімічної та термічної «зшивки». Найбільш надійною є ЗПЕ-ізоляція, яку отримують в інертному сухому газовому середовищі азоту в присутності пероксиду водню та інших реагентів за температури до 400 °С й тиску до 20 атм. Головні експлуатаційні переваги такої ЗПЕ-ізоляції пов'язані з її високою об'ємною однорідністю, тріщиностійкістю та експлуатаційною надійністю в сильних електричних полях. Порівняння основних характеристик кабелів зі ЗПЕ-ізоляцією і кабелів з паперово-масляною ізоляцією наведено в таблиці.

Слід зазначити, що США, Японія і країни ЄС освоїли промисловий випуск кабельно-провідникової продукції зі ЗПЕ-ізоляцією ще в минулому столітті, що на порядок підвищило надійність і безпеку їхніх систем електропостачання. Навіть у скандинавських країнах, у яких енергонасиченість є найбільшою, а природні умови – найскладнішими в Європі, використання кабелів з такою ізоляцією зменшило тривалість відключень електроспоживачів з 24 до 2,5 год/рік. В Україні в той період усі силові кабелі виготовляли з морально застарілою і екологічно небезпечною паперово-масляною ізоляцією, а в повітряних ЛЕП використовували лише неізольовані струмопроводи, які є ненадійними, небезпечними і нестійкими до впливу стихії. Так, у 2000 р. лише одна ожеледь призвела до аварій на 21 тис. повітряних ЛЕП, що паралізувало життєдіяльність понад 5 тис. населених пунктів України і завдало збитків на 700 млн грн у цінах того часу. Сьогодні навіть

складно уявити собі небезпеку аварій на повітряних ЛЕП з оголеними проводами під час бойових дій.

Після здобуття незалежності Україна не мала ні виробництва, ні технологій, ні наукових засад для освоєння випуску сучасної кабельно-провідникової продукції, оскільки вся фундаментальна і галузева наука з цього напрямку була зосереджена в Росії. З огляду на те, що безпека електроенергетики і всієї критичної інфраструктури України ставала все більш залежною від імпорту, в 2000 р. вийшов Указ Президента України, а потім і постанова Кабінету Міністрів України щодо організації виробництва кабельно-провідникової продукції, що відповідає світовим стандартам, з наданням заводу «Південкабель» (м. Харків) спеціального режиму на період 2001–2004 рр. без залучення бюджетних коштів.

За організацією наукового супроводу цього проекту завод звернувся до Інституту електродинаміки НАН України, вчені якого вже мали певний досвід дослідження впливу сильних електричних полів на надійність високовольтних полімерних ізоляторів. На основі результатів аналізу умов появи таких порогових електрофізичних процесів, як часткові розряди, в Інституті було розроблено електроекрани та багат шарові оболонки з нелінійними властивостями, використання яких у силіконових ізоляторах дало змогу в 2–3 рази зменшити локальні напруженості і в 8–10 разів — рівень часткових розрядів. У 1998 р. за освоєння промислового виготовлення і впровадження силіконополімерних ізоляторів в електромережах України колектив авторів було удостоєно Державної премії України в галузі науки і техніки. Ці ізолятори виготовляються на трьох заводах у м. Слов'янськ і нині використовуються на всіх ЛЕП України. Вони у 12–15 разів легші від фарфорових і витримують значні вібрації та силові впливи, що дуже важливо для ліній електропередач електротранспорту.

Перші дослідження твердої кабельної ЗПЕ-ізоляції показали, що на мікроструктурному рівні вона може бути досить неоднорідною і пористою, особливо в разі виникнення неоднорідних

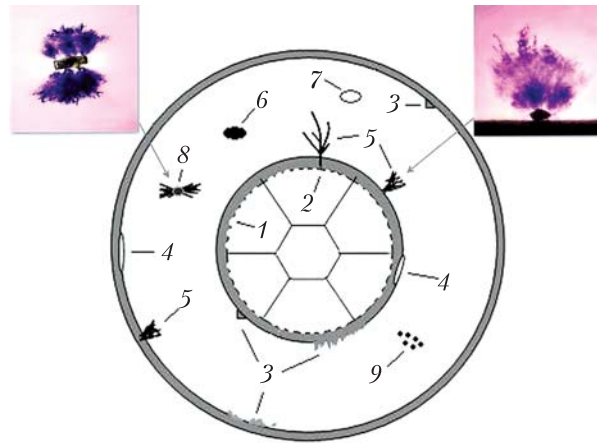


Рис. 2. Електрофізичні процеси в ізоляції: *поверхневі*: 1 — макронерівності струмопровідної жили (ефект «проволочності»); 2 — гострі мікроступи на струмопровідній жилі; 3 — нерівності напівпровідного шару; 4 — газові порожнини; 5 — водяні тріщини типу «віяло»; *об'ємні*: 6 — водяні (струмопровідні включення); 7 — газові включення; 8 — водяні тріщини типу «бант»; 9 — близько розташовані включення

рідних сильних електричних полів та наявності рідких і газових мікровключень, які можуть утворюватися при виготовленні та експлуатації кабелів.

Теоретично однорідна ЗПЕ-ізоляція має витримувати напруженість електричного поля до 1000 кВ/мм, лабораторні зразки малих розмірів витримують 100–200 кВ/мм, а ізоляцію кабелів розраховують на 10–20 кВ/мм, що, правда, з ресурсом у 30–40 років.

Було виявлено, що головною причиною зменшення надійності ЗПЕ-ізоляції є її неоднорідність, яка збурює електричне поле і підвищує його локальні напруженості до значень, за яких виникають порогові та стохастичні електрофізичні процеси руйнації мікроструктури ізоляції і, звісно, знижується її надійність. Отже, постала необхідність у дослідженні процесів збурення сильних неоднорідних електричних полів у ЗПЕ-ізоляції силових кабелів з урахуванням поверхневих нерівностей та газових і водяних мікровключень, як поодиноких, так і близько розташованих, що мають різні форми, розміри і просторові конфігурації (рис. 2).

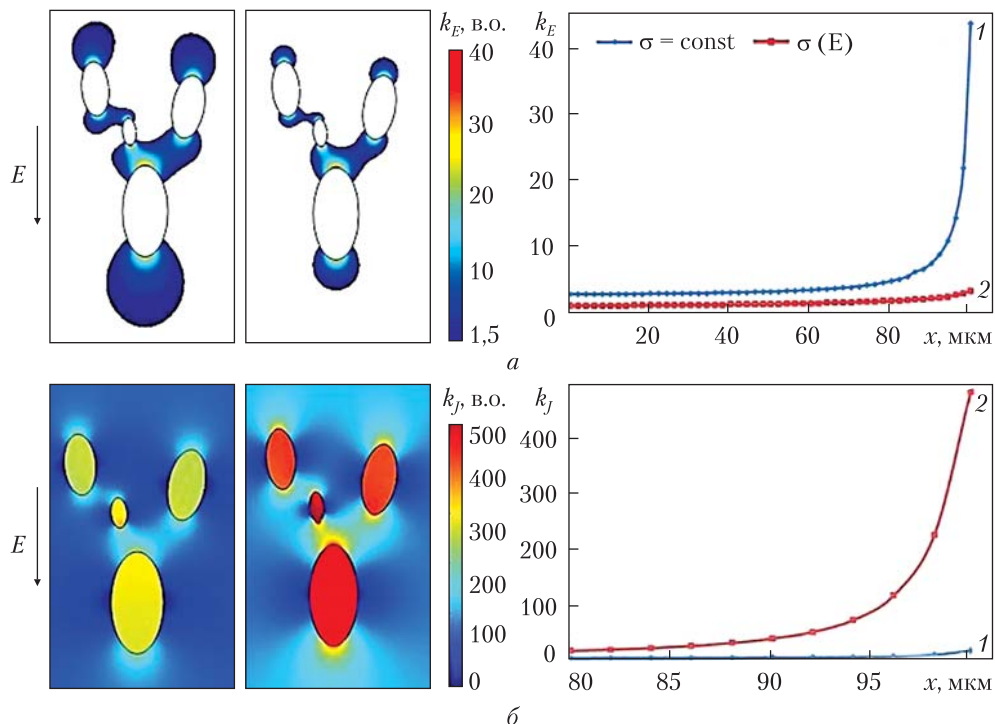


Рис. 3. Порівняння розподілу електричного поля в лінійній (а) і нелінійній (б) ізоляції

Для визначення розподілу сильного електричного поля в нелінійній і структурно неоднорідній ЗПЕ-ізоляції ми виконували розрахунок системи диференціальних рівнянь у часткових похідних у часовій області з використанням пакету програм COMSOL, ліцензійну версію 5.3 якого має наш Інститут.

Ми визначали розподіли густини зарядів на поверхнях мікрівключень та напруженості електричного поля, густини струмів і пульсуючих сил взаємодії електричного поля з різними мікрооб'ємами ізоляції та сили взаємодії між мікрівключеннями. Було виявлено, що збільшення розмірів водяного мікрівключення вздовж електричного поля може підвищити його напруженість в ізоляції в 10 разів, а поблизу трієнгу – в 30 разів. Проте поява близько розташованих струмопровідних мікрівключень може підсилити поле у 100 і більше разів.

При цьому між двома близько розташованими струмопровідними мікрівключеннями розмірами у десятки мікрометрів може виникати пульсуюча з частотою 100 Гц електрична сила в одиниці мН. Тобто утворюється своєрідний

«електроперфоратор», який діє на тверду ізоляцію з силою в десятки й сотні міліньютонів і частотою 100 Гц! До того ж через деякий час два рідких струмопровідних мікрівключення можуть об'єднатися в одне, вдвічі довше!

Слід зазначити, що у світі більшість результатів досліджень за цим напрямом є власністю відомих комерційних фірм і їх практично немає у відкритому доступі. Однак нам вдалося знайти публікації японського дослідника Т. Tokogo і американського вченого S.A. Voggs, в яких наведено дані про те, що в разі виникнення в ЗПЕ-ізоляції напруженості електричного поля, більшої за 100 кВ/мм, електропровідність може зростати на 3–7 порядків. Таке врахування нелінійних властивостей ЗПЕ-ізоляції дало можливість передбачити появу в ній локальних перегрівань, мікротріщин, водяних мікротрієнгов, а також їх довжину та розгалуження.

На рис. 3 наведено основні закономірності збурення електричного поля в реальній ЗПЕ-ізоляції. Зокрема, за результатами проведених досліджень було:

1) з'ясовано, що осесиметричні гетерогенні включення в ізоляції мають характерні параметри, які визначають змінення E_m , внаслідок чого встановлено інваріантність E_m відносно зростання розмірів гетерогенних включень без змінення їх просторової конфігурації;

2) відкрито нове електрофізичне явище — підвищення E та інтенсивності процесів деградації ЗПЕ-ізоляції при появі близько розташованих мікрровключень з розмірами, меншими за допустимі стандарти;

3) встановлено, що в електричному полі частотою 50 Гц водяні включення діють на структуру ЗПЕ-ізоляції з частотою 100 Гц і максимальним тиском на полюсах включень;

4) доведено, що в неоднорідному електричному полі в ЗПЕ-ізоляції кабелів при переміщенні близько розташованих водяних мікрровключень виникає додатний зворотний зв'язок, який прискорює процес їх злиття;

5) сформульовано новий критерій якості ЗПЕ-ізоляції кабелів, який полягає в урахуванні в ній щільності та просторового розподілу мікрровключень незалежно від їхніх розмірів. Для його використання завод «Південкабель» (м. Харків) придбав мікروагаи, які здатні вимірювати змінення маси ЗПЕ-ізоляції порядку 40–50 г при її нагріванні у вакуумі з точністю до 100 нг, що відповідає зникненню в ізоляції водяного сферичного включення радіусом $R < 5$ нм.

Встановлені закономірності було використано при розробленні технічного завдання на виготовлення першої у світі технологічної лінії похилого типу для екструзійного нанесення і структурного зміцнення тришарової ЗПЕ-ізоляції кабелів на напругу до 400 кВ (рис. 4). Раніше для високовольтних і надвисоковольтних кабелів застосовували лінії вертикального типу висотою понад 100 м, експлуатація яких істотно підвищує собівартість продукції. Нова лінія похилого типу має висоту всього 12 м при довжині 172 м, що значно спрощує її обслуговування і зменшує витрати на виготовлення продукції.

Для застосування лінії похилого типу для виготовлення кабелів на напругу до 400 кВ



Рис. 4. Технологічна лінія похилого типу для нанесення тришарової ізоляції на струмопровідну жилу надвисоковольтних кабелів

було запропоновано кілька новітніх технологічних рішень, які забезпечили нанесення досить товстого шару полімерної ізоляції на похилу струмопровідну жилу надвисоковольтних кабелів у газовому сухому середовищі азоту за температури до 400 °С і тиску до 20 атм. У результаті вдалося досягти 95–97 % зшивання всього об'єму ЗПЕ-ізоляції.

На відміну від СШів, які використовують струмопровідну жилу зі зміцненого алюмінієвого сплаву з нанесеним на неї одним шаром ЗПЕ-ізоляції потрібної товщини, високовольтні кабелі — це складна електротехнічна система, для виготовлення та надійної експлуатації якої необхідно досліджувати та оптимізувати взаємозалежні електродинамічні, електротермічні та фізико-хімічні процеси.

При організації виробництва сучасних високовольтних кабелів однією з ключових проблем є виготовлення високоякісних струмопровідних жил, оскільки мідна катанка, яка пропонується на українському ринку, не задовольняє необхідні вимоги щодо її якості.

Тому науковці Інституту електродинаміки НАН України і заводу «Південкабель» розробили метод підвищення надійності та збільшення ресурсу потужних установок для виготовлення мідної катанки найвищої якості (з вмістом міді 99,99 %) для струмопровідних жил надвисоковольтних кабелів. Було здійснено 5-річний безперервний моніторинг змінення температури 72 зон на поверхні металевого корпусу установки, розроблено ме-



Рис. 5. Резонансна установка для випробування ізоляції кабелів напругою до 500 кВ

тоди розрахунку магнітогідродинамічних і теплових процесів, що відбуваються в ній, а також метод експрес-контролю її поточного технічного стану.

У результаті було розроблено і впроваджено нове технічне рішення для створення багатошарової термоізоляції установки, яке забезпечило зниження температури на її поверхні на 20 °С, зменшило питомі енерговитрати на 5 % та підвищило якість мідної катанки. Зокрема, на 10 % збільшився вихід катанки з вмістом міді не менш як 99,99 %.

На заводі «Південкабель» спільно з фахівцями нашого Інституту створено спеціалізований центр для випробування та міжнародної сертифікації вітчизняної кабельно-провідникової продукції, атестований Національним агентством з акредитації України на технічну компетентність відповідно до міжнародного стандарту ISO/IEC 17025.

Для оцінювання якості ізоляції готової продукції на заводі «Південкабель» створено випробувальну установку резонансного типу для вимірювання рівня часткових розрядів в ізоляції кабелів з точністю до 1 пК, зовнішній вигляд якої наведено на рис. 5. В установці використано індуктори фірми Hipotronics (США) вагою по 16 т кожний. Реалізація в установці високочастотного резонансного контуру забезпечила зменшення її потужності в десятки разів (до 500 кВА).

Крім того, на заводі періодично перевіряють стійкість кабелю до монтажних вигинів та погонну електричну ємність кабелю. Типовими випробуваннями є також вимірювання електричного опору мідного екрана, тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ в ізоляції, вимірювання питомого електричного опору напівпровідних шарів, випробування ізоляції та оболонок на електричний пробій, стійкість до хімічних і фізичних чинників, випробування кабелів старінням за підвищеної температури.

Високочастотна кабельно-провідникова продукція ПАТ «Завод «Південкабель» експлуатується на багатьох великих енергооб'єктах як в Україні (Запорізька АЕС, Ботієвська ВЕС), так і в інших країнах світу (Опольська ТЕС та насосна електростанція в Жидові в Польщі; Бушерська АЕС в Ірані; АЕС «Куданкулам» в Індії тощо).

Хотів би привернути вашу увагу до зростання наукового рівня досліджень, які виконуються на заводі «Південкабель». У колективі його науково-технічного центру, оснащеного унікальними установками, працюють уже 2 доктори і 7 кандидатів наук.

На сьогодні у плідній співпраці науковців Інституту електродинаміки НАН України, ПАТ «Завод «Південкабель», Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» розроблено наукові засади, технології та конструкції, які забезпечили створення на заводі «Південкабель» електротехнологічного комплексу для серійного виробництва вітчиз-

няної інноваційної кабельно-провідникової продукції із сучасною полімерною ізоляцією на всі рівні напруги до 400 кВ. Цей комплекс дає можливість забезпечити як внутрішні потреби України в усіх видах кабельних систем найвищого рівня якості, так і їх експорт. Стратегічну важливість використання цієї продукції та її підвищену стійкість до сильних механічних впливів, коротких замикань та обривів ліній електрозабезпечення міст, селищ і підприємств України підтверджено під час її експлуатації в умовах бомбардувань з боку російського агресора.

Отримані результати, зокрема щодо підвищення стійкості полімерної ізоляції до високих температур та інтенсивного радіаційного випромінювання, дозволяють ефективно вирішувати питання апробації нових наукових, технологічних і конструктивних рішень, їх доведення до серійного виробництва та мають широкі перспективи для використання в дослідженнях, пов'язаних зі створенням нових конкурентоспроможних пожежобезпечних і радіаційно стійких силових і контрольно-вимірювальних кабелів.

Anatolii A. Shcherba

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0200-369X>

SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT FOR THE ORGANIZATION OF PRODUCTION AND CERTIFICATION OF MODERN DOMESTIC HIGH-VOLTAGE CABLE AND CONDUCTOR PRODUCTS

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, August 10, 2022

The report emphasizes the important role played by the Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine in solving certain urgent strategic scientific and technical tasks to improve the energy security of Ukraine in war and post-war period. The most important results related to the development of scientific foundations, the provision of scientific support, as well as the practical solution of urgent scientific, technical and technological problems of the organization of production and certification of modern domestic cable and conductor products in order to increase the reliability and safety of the electric power industry of Ukraine are presented.

Зазначені результати науково-технічної співпраці представників науки і виробництва свідчать про необхідність подальшого розвитку та розширення обсягів виконання спільних науково-дослідних робіт у галузі сучасної електроенергетики.

Сьогодні в Україні через зростання потужностей відновлюваних джерел енергії спостерігається істотне погіршення якості електроенергії в кабельних ЛЕП, що потребує створення відповідних технологій захисту, оскільки тверда полімерна ізоляція кабелів є досить чутливою до несинусоїдальних напруг і струмів. Тому доцільно провести комплексні дослідження процесів розвитку аварійних ситуацій, появи несинусоїдальних режимів та визначити їх вплив на деградацію і технічний стан сучасної ЗПЕ-ізоляції силових кабелів, для чого слід розробити відповідні методики, інформаційно-діагностичну апаратуру й рекомендації щодо підвищення надійності та стійкості кабельних мереж електроенергетики України.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик