

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**Золотарьов Володимир Михайлович**

УДК 620.179.148: 621.315.2

**ЕЛЕКТРИЧНИЙ МЕТОД І ПРИЛАД ДЛЯ ПОТОЧНОГО КОНТРОЛЮ  
ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ВИРОБІВ**

**Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин**

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків 2002

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків та у закритому акціонерному товаристві “Завод Південкабель” Міністерства промислової політики України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент,  
Науменко Олексій Антонович,  
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, доцент кафедри електроізоляційної та кабельної техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Білокур Іван Павлович,  
Національний авіаційний університет, м. Київ,  
завідувач кафедри машинознавства;

кандидат технічних наук,  
Москаленко Ігор Іванович,  
Харківський державний центр стандартизації,  
метрології та сертифікації, директор.

Провідна установа: Акціонерне товариство “Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань”, Національне космічне агентство України, м. Харків.

Захист відбудеться “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2002 р. о \_\_\_ год. \_\_\_ хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2002 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Інтеграція України в загальноєвропейський економічний простір неможлива без гармонізації існуючих у нас технічних стандартів з міжнародними стандартами і, в першу чергу, з такими як ІЕС та CELENEC. Історично склалося так, що в галузі кабельної техніки в Україні зостаються чинними стандарти приблизно двадцятирічної давності. Здобуття Україною незалежності відкрило перед вітчизняною кабельною промисловістю не тільки нові горизонти міжнародного співробітництва, але, в той же час, висунуло й більш високі вимоги до кабельної продукції як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках. Однією з таких вимог є забезпечення конкурентоспроможності вітчизняної кабельної продукції та постійного зростання її якості. Це в значній мірі досягається безперервним удосконаленням нормативної бази в кабельній техніці в цілому і, в особливості, удосконаленням чинних стандартів випробувань. Поточні випробування напругою – це основний засіб неруйнуючого контролю якості надзвичайно широкого асортименту кабельно-проводникової продукції, яка виготовляється з застосуванням пластмас та гуми. Відсутність сучасної нормативної бази та засобів випробування стримує не тільки впровадження сучасних технологій, але й стає все більш суттєвою перешкодою в організації випробування виробів, які виготовляються з використанням навіть традиційних технологічних процесів на всіх кабельних підприємствах України.

Таким чином, тема дисертації, пов'язана з розробкою електричних методів і приладів для поточного контролю ізоляції кабельних виробів є актуальною і своєчасною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась згідно з планами технологічного переозброєння заводу “Південкабель”, поточними планами Міністерства промислової політики, річними планами Технічного комітету 131 “Електроізоляційна та кабельна техніка” зі стандартизації, а також в межах теми Держстандарту 04.2.011-2000 “Розроблення проекту Державного стандарту України “Кабелі проводи і шнури. Методи випробування напругою”.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є створення установки для поточного контролю ізоляції широкого асортименту кабельних виробів на основі електричного методу неруйнівного контролю. Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз стану та виявити тенденції розвитку нормативної бази і засобів випробувань напругою кабельних виробів в передових країнах, виробниках кабельної продукції;

- провести дослідження електромагнітних процесів в стендах поточних випробувань напругою;

- дослідити функціональні залежності роботи технологічних ліній переробки пластикатів та гумових сумішей, а також закономірності роботи засобів випробувань, які застосовуються тут в процесі виготовлення елементів кабельних виробів;

- дати визначення неруйнівного методу випробувань напругою при поточному контролі і виконати науково- методичне обґрунтування Державного стандарту України з випробувань кабелів проводів і шнурів напругою;

- розробити зразок засобу випробувань напругою при поточному контролі з використанням виключно вітчизняної елементної бази, для його застосування, перш за все, у найсучасніших технологіях, які тільки-но освоюють кабельні заводи України, особливо в процесах нанесення силанольнозшитого поліетилену (ПЕ), полііміду(ПІ), полівінілхлориду (ПВХ) та інших сучасних електроізоляційних матеріалів.

*Об'єкт дослідження* – процес визначення раціонального неруйнівного електричного контролю ізоляції кабельних виробів в умовах їх поточного виробництва.

*Предмет дослідження* – удосконалення електричних методів і створення на цій основі приладу поточного контролю ізоляції широкого асортименту кабельних виробів в умовах їх виробництва на технологічних лініях.

*Методи дослідження.* Резонансні явища випробувальних стендів досліджувались методами теорії електричних кіл. Розробка теоретичної моделі електричних явищ в діелектрику, який рухається під час випробувань, виконана на основі теорії електромагнітного поля. Дослідження електричного поля випробувального електроду проведено із застосуванням методу електрогідродинамічних аналогій. Експериментальні дослідження виконані на реальних зразках ізольованих струмопровідних жил, а також з використанням розробленого дослідного зразка високовольтного пристрою на діючому технологічному обладнанні.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

- удосконалено електричний метод поточних випробувань ізоляції кабельних виробів та виведені теоретичні співвідношення, які мають місце в разі руху шару діелектрика скрізь високовольтний електрод, складено рівняння балансу струмів, яке встановлює кількісні співвідношення між струмами зміщення, провідності та переносу.

- виведені співвідношення між функціональними залежностями роботи випробувальних засобів і технологічних екструзійних ліній нанесення ізоляції. Це дозволило встановити критерії застосування випробувальних засобів, та стандартів випробувань;

- узагальнено класичне поняття кута діелектричних втрат на випадок рухомої ізоляції. Доведено, що в рухомому шарі ізоляції виникає так званий внесений кут діелектричних втрат, який доповнює кут діелектричних втрат в нерухомому діелектрику, до кута повних діелектричних втрат. Векторними діаграмами випробувального електроду встановлено, що внесений кут діелектричних втрат може набувати, як від'ємних так і позитивних значень;

- розроблені методики, які дозволяють проектувати засоби поточних випробувань ізоляції кабельних виробів з урахуванням повних діелектричних втрат.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати роботи знайшли практичне застосування в проекті ДСТУ “Кабелі проводи і шнури. Методи випробування напругою”, розробленому згідно ТЗ Держстандарту України, а також в створеному дослідному зразку високовольтного пристрою, який впроваджений на заводі “Південкабель”. Розроблений проект схвалений Держстандартом і проходить першу редакцію.

Основні наукові результати знайшли втілення у виданій книзі “Силові кабелі низької і середньої напруги. Конструювання, технологія, якість”, яка пройшла незалежну експертизу в Комісії з енергетики Науково-методичної ради Міністерства освіти. Згідно листа Міністерства освіти і науки України №1-11-2386 від 14.09.2000 р. вона допущена до використання в навчальному процесі, як підручник для електротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Матеріали книги використовуються також в системі підвищення кваліфікації інженерно-технічних спеціалістів кабельних підприємств України.

Одержані результати планується використати, як науково-методичну основу при освоєнні серійного зразка випробувальних засобів, які б відповідали по своїм вимогам світовому рівню, але були б виготовлені з використанням виключно вітчизняної елементної бази.

Розроблений метод, одержані співвідношення для повних діелектричних втрат в рухомому діелектрику та створений на цій основі прилад – все це може бути використано при проектуванні установок для поточного контролю ізоляції кабельних виробів безпосередньо на технологічних лініях.

**Особистий внесок здобувача.** У роботах, які виконані в співавторстві, здобувачем обґрунтований критерій вибору випробувальних засобів для технологічних ліній при випробуваннях напругою на прохід [1]. В [2] запропоновані оптимальні профілі секторних жил на основі оцінки тангенціальної складової напруженості електричного поля в кабелі на напругу до 10кВ. В [3] запропоновано використання екологічно чистого технологічного процесу при виготовленні силових кабелів, а в [4] – використання технології нанесення силанольнозшитого поліетилену на жили різної форми перерізу з використанням існуючого технологічного обладнання на вітчизняних кабельних

підприємствах. В [9] одержані статистичні характеристики якості ізоляції кабелів на 10кВ на основі таких контрольованих параметрів, як тангенс кута діелектричних втрат та приросту тангенса кута діелектричних втрат при збільшенні напруги від 5кВ до 20кВ. В [10] автором запропоновані основні вимоги до методу поточного контролю кабельних виробів та засобів випробувань напругою на прохід на технологічних лініях.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали роботи доповідались та обговорювались на таких науково-технічних конференціях: “Физико-технические проблемы электротехнических материалов и компонентов” (м. Москва, 1999 р.), “Проблемы теории и практики технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки” (м. Харків 2001 р.).

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 11 робіт: 2 статті в наукових журналах, 6 статей в збірниках наукових праць, 2 тези доповідей на науково-технічних конференціях, одна стаття ввійшла в підручник.

**Структура та об’єм дисертації.** Робота складається з вступу, п’яти розділів, висновків та 2 додатків. Повний обсяг роботи складає 194 сторінки, 19 ілюстрацій по тексту, 26 ілюстрацій на 26 сторінках; 15 таблиць по тексту, на 1 таблиця на 1 сторінці; 2 додатки на 21 сторінці, список використаних літературних джерел з 122 найменувань на 10 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність удосконалення неруйнуючих випробувань напругою на прохід з урахуванням світових тенденцій розвитку, сформульовані мета і задачі дослідження. Викладено основні наукові та практичні результати роботи. Наведені дані, щодо апробації отриманих результатів.

**В першому розділі** виявлені основні тенденції розвитку новітніх технологій виробництва кабелів з пластмасовою ізоляцією, стан і тенденції розвитку нормативної бази та засобів випробувань напругою на прохід, як головної передумови забезпечення належної якості кабельної ізоляції, що наноситься методом екструзії. Встановлено, що більшість країн Західної Європи вже гармонізували національні стандарти зі стандартами ІЕС і CELENEC. Але навіть міжнародні стандарти не дають визначення методу випробувань напругою на прохід. Відсутня також методика, яка б давала можливість порівняти між собою національні стандарти різних країн та вимоги до засобів випробувань. В різних країнах використовують для таких випробувань різні види напруг, але критерії, які встановлювали б умови такого використання, відсутні. Немає цих вимог також і в стандартах ІЕС.

В другому розділі розглянуто електромагнітні процеси при поточних випробуваннях напругою. Кількісний аналіз електромагнітних процесів проведено з використанням загальної системи рівнянь Максвелла. Струми переносу, які виникають в разі руху випробуваного кабельного виробу, враховані в першому рівнянні згаданої системи.

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \rho \vec{V}, \quad (1)$$

де  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  – вектори електричної та магнітної напруженості відповідно;

$\vec{D}$  – вектор електричної індукції;

$\gamma$  – електрична провідність;

$\rho$  – електричний об'ємний заряд;

$\vec{V}$  – вектор швидкості руху випробуваного кабельного виробу;

$t$  – час.

Застосування теореми Стокса до тороїдальної поверхні  $S$ , яка спирається на контур  $L'$  у випробувальному електроді (див. рис. 1.) дозволяє скласти рівняння балансу струмів:

$$i = i_{CK} + i_2 + i_{II}, \quad (2)$$

де  $i$  – повний струм випробувального електроду;

$i_{CK}$  – струм крізь геометричну конструктивну ємність  $C_K$ ;

$i_2$  – струм крізь недосконалу ємність  $C$  рухомого діелектрика;

$i_{II}$  – струм переносу, зарядів зовнішньою  $a'd'$  поверхнею шару діелектрика.

Проведені оцінки показали, що в просторі між високовольтним електродом, утвореним від обертання прямокутника  $bcc'b'$  навколо осі  $OO'$ , де корона не виникає, електричне поле можна описати рівнянням Лапласа в площині, перпендикулярній напрямку руху виробу:

$$\Delta \varphi = 0 \quad (3)$$

де  $\varphi$  – потенціал плоскопаралельного електростатичного поля;

$\Delta$  – оператор Лапласа.

В нормальному режимі роботи випробувального стенду, коли не виникають резонансні явища, ємності  $C_K$  і  $C$  виявляються з'єднаними між собою паралельно. Тому, потенціал поверхонь  $S_K$  і  $S_{II}$  можна покласти рівними нулю а потенціал  $\varphi$  визначити з рішення задачі Дирихле. Якщо відстань  $bb'$  та  $\delta'$  набагато менші за довжину високовольтного електроду  $L$ , то ємності  $C_K$  і  $C$  можна розглядати незалежно одну від одної. Ємність  $C_K$  визначалась за результатами моделювання рішення задачі Дирихле для рівняння Лапласа методом електрогідродинамічних аналогій для дійсної геометрії поперечного перерізу розробленого випробувального електроду. Однак, при проектуванні засобів випробувань напругою на прохід, бажано мати більш доступний для

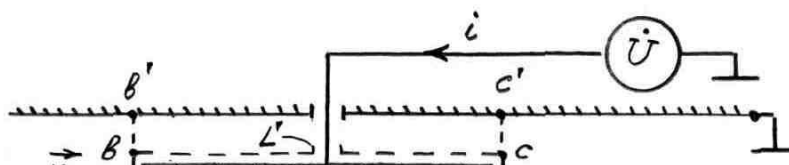


Рис. 1. Схема струмів випробувального електроду

$\vec{n}$  – зовнішня нормаль до поверхні  $S$ ;  
 $S_n$  – поверхня металевої жили;  
 $S_K$  – внутрішня поверхня захисного металевого кожуха;  
 $OO'$  – вісь руху виробу.

інженерної практики розрахункові моделі поперечного перерізу випробувального електроду, які не потребували б рішення такої складної задачі кожен раз. Для цього запропоновано з достатньою точністю визначати конструктивну ємність шляхом розрахунку ємності двох прямокутних (в перерізі) оболонок, які обхвачують одна одну. Ємність  $C$ , при таких умовах, визначається, як ємність коаксіального конденсатора. На цьому базується запропонована методика визначення ємностей випробувального електроду, яка значно спрощує загальні розрахунки електричних параметрів при розробці засобів випробувань напругою на прохід.

**В третьому розділі** встановлені співвідношення між функціональними залежностями, які описують роботу екструзійних технологічних ліній та засобів випробування, на яких вони встановлюються при випробуваннях напругою на прохід в процесі виготовлення ізоляційних елементів кабельних виробів. На основі цього побудована інженерна методика вибору області застосування засобів випробувань напругою на прохід, які відтворюють вимоги різних стандартів UL-1581 (США), BS:5099 (Великобританія) та ГОСТ 2990-78, який, чинний нині в країнах СНД, для екструзійних технологічних ліній з екструдерами, що мають діаметр черв'яка 45...160 мм і більше (див. табл. 1).



## Області переважного застосування засобів випробувань

Матеріал ізоляції; Стандарт		Тип екструдера технологічної лінії				
		НТ-45	МЕ-1-60	МЕ-1-90	МЕ-1-125	МЕ-1-160
ПВХ, ПЕ	UL	+	+	+	-	-
	BS	-	-	+	+	+
	ГОСТ	-	-	-	+	+

Це дозволило дати визначення неруйнуючих випробувань напругою на прохід, як методу випробувань шляхом безперервної перевірки цілісності ізоляції, оболонки або шланга кабельного виробу в процесі їх руху за допомогою високовольтного пристрою мінімальної конфігурації. Тобто він повинен мати в своєму складі джерело високої напруги, випробувальний електрод, вимірювач напруги, систему реєстрації наявності дефекту, а також необхідні електричні з'єднання.

**Четвертий розділ** присвячений дослідженню явища діелектричних втрат в шарі діелектрика, що рухається крізь високовольтний електрод. В цьому разі вираз для тангенса повного кута  $\delta_{\Sigma}$  діелектричних втрат має вигляд:

$$\operatorname{tg} \delta_{\Sigma} = \frac{I_a}{I_p} = \frac{I_{RII} + I_{RP}}{I_{CK} + I_{CP}} = \frac{\frac{I_{RII}}{I_{CP}} + \frac{I_{RP}}{I_{CP}}}{1 + \frac{I_{CK}}{I_{CP}}} = \frac{\operatorname{tg} \delta + \frac{I_{RII}}{I_{CP}}}{1 + k}, \quad (4)$$

де  $\delta$  – кут діелектричних втрат в нерухомому діелектрику;

$I_a, I_p$  – активна та реактивна компоненти струму випробувального електроду;

$$k = \frac{[U / (1 / \omega C_K)]}{[U / (1 / \omega C_P)]} = \frac{C_K}{C_P} \text{ – дійсний коефіцієнт;}$$

$\omega = 2\pi f$  – циклічна частота;

$C_P, R_P$  – еквівалентні параметри діелектрика: геометрична ємність та активний опір, відповідно;

$R_{II}$  – активний опір струму переносу  $I_{RII}$  ;

$I_{CK}$  – реактивний струм, який тече через конструктивну ємність  $C_K$ ;

$I_{RP}, I_{CP}$  – активна та реактивна складова струму  $I_2$  крізь діелектрик;

$U, I$  – комплекси напруги та повного струму випробувального електроду.

З (4) видно, що кут діелектричних втрат в нерухомому діелектрику  $\delta$  доповнюється до кута повних втрат в рухомому діелектрику  $\delta_{\Sigma}$  кутом  $\delta_{вн}$ , який слушно назвати кутом внесених діелектричних втрат:

$$\delta_{\text{вн}} = \arctg \left[ \frac{\text{tg} \delta + \frac{I_{RII}}{I_{CP}}}{1+k} \right] - \delta. \quad (5)$$

При цьому зсув фаз  $\varphi$  між комплексами напруги  $\dot{U}$  і струму  $\dot{I}$  дорівнює (рис. 2.):

$$\varphi = \pi/2 - \delta_{\Sigma}. \quad (6)$$

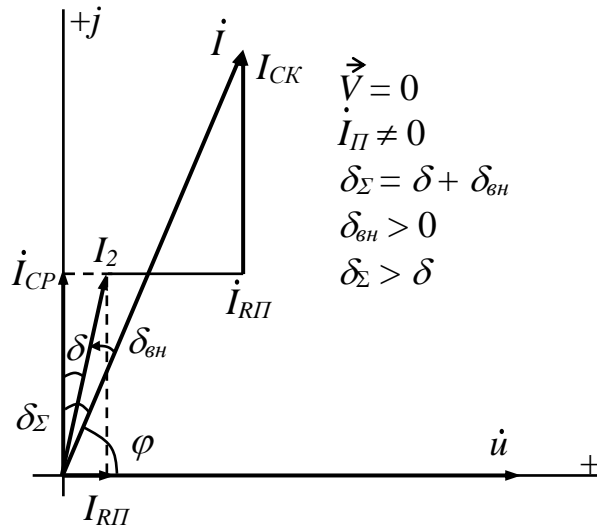


Рис. 2. Векторна діаграма для випробувального електроду

З векторної діаграми для цього випадку (рис. 4) видно, що кут  $\delta_{\text{вн}}$  може бути більшим від нуля, якщо  $I_{CK} > 0$  і  $I_{RII} > 0$ , або меншим за нього, якщо  $I_{CK} > 0$  і  $I_{RII} = 0$ . І тільки в разі відсутності конструктивної ємності  $C_K$  та нульової швидкості руху  $\vec{V}$ , повний кут діелектричних втрат повністю співпадає з кутом втрат в нерухомому діелектрику. Таким чином, повний кут  $\delta_{\Sigma}$  є узагальненням класичного поняття кута діелектричних втрат  $\delta$  на випадок рухомого діелектрика.

З урахуванням граничної умови на зовнішній поверхні, яка обмежує об'єм діелектрика (лінія перетину цієї поверхні  $a'd'$  на рис. 1.), маємо вираз для поверхневої щільності заряду  $\sigma$  на ній:

$$\sigma = \varepsilon_0 (\varepsilon_g E_g - E_{np}), \quad (7)$$

де  $\varepsilon_0$  – абсолютна діелектрична проникність вакууму;

$\varepsilon_g$  – відносна діелектрична проникність діелектрика;

$E_g$  – середня напруженість електричного поля в діелектрику;

$E_{np}$  – пробивна напруженість електричного поля в повітрі ( $E_{np} \approx 30 \text{ кВ/см}$ ).

Струм переносу зовнішньою поверхнею діелектрика периметром  $\Pi$  пропорційний швидкості його руху:

$$I_{RП} = ПσV . \quad (8)$$

Тоді складова  $I_{RП}/I_{CP}$  в (5) дорівнює:

$$\frac{I_{RП}}{I_{CP}} = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_g E_g - E_{np})П}{E_g \varepsilon_g \varepsilon_0 ПL\omega} = \left(1 - \frac{E^*}{\varepsilon_g}\right) \frac{V}{L\omega} = \frac{mV}{L\omega}, \quad (9)$$

де  $E^* = E_{np}/E_g$  – відносна напруженість електричного поля;

$f = \omega/2\pi$  – частота випробувальної напруги;

$m = 1 - E^*/\varepsilon_g$  – деякий коефіцієнт.

Значення коефіцієнта  $m$  для різних діелектриків коливається в межах від 0,87 до 0,99 в залежності від умов випробування. Зважаючи на те, що для одного випробування значення  $k$  постійне, ліву частину (4) можна записати у зведеному вигляді  $tg^* \delta_{\Sigma}(f, V) = (k+1)tg \delta_{\Sigma}$ . Після чого (4) набуває вигляду:

$$tg^* \delta_{\Sigma}(f, V) = (k+1)tg \delta_{\Sigma}(f) = tg \delta(f) + \frac{mV}{2\pi Lf}. \quad (10)$$

Функція  $tg \delta(f)$  таблична і наводиться в довідниковій літературі. В певному частотному діапазоні вона може бути спадаючою, зростаючою, або не залежною від частоти  $f$ .

Останній вираз показує, що коли в певному частотному діапазоні функція  $tg \delta(f)$  зростає, то тут функція  $tg^* \delta_{\Sigma}(f)$  обов'язково буде мати мінімум (рис. 3.). Якщо функція  $tg \delta(f)$  не залежить від частоти або спадає на деякому проміжку  $f$ , то функція  $tg^* \delta_{\Sigma}(f)$  теж монотонно спадає і не має екстремуму. При граничних швидкостях роботи технологічного обладнання 1 м/с та 10 м/с функція  $tg^* \delta_{\Sigma}(f)$  набуває мінімальних значень при частотах  $f_1^{\min} = 90 Гц$  та  $f_2^{\min} = 270 Гц$ . Ці умови, в даному випадку, є оптимальними з точки зору вибору частоти випробувальної напруги. В загальному розумінні наявність мінімуму функції  $tg^* \delta_{\Sigma}(f)$  притаманна багатьом полярним діелектрикам в тому діапазоні  $f$ , де функція  $tg \delta(f)$  зростає. З рис. 3 також видно, що значення функції  $tg^* \delta_{\Sigma}(f)$ , при певних умовах, можуть бути набагато більшими від значень функції  $tg \delta(f)$ . Це має суттєве значення при проектуванні засобів випробувань напругою на прохід та визначення еквівалентного електричного опору навантаження  $R_H$ .

Тобто, у випадку рухомого діелектрика, величину  $R_H$  необхідно визначати так:

$$R_H = \frac{1}{\omega C tg^* \delta_{\Sigma}}, \quad (11)$$

Таким чином проведене дослідження дає змогу визначити активну складову електричного навантаження  $R_H$  з урахуванням повного кута діелектричних втрат  $\delta_{\Sigma}(f)$  на відміну від попереднього, коли цей параметр визначався тільки з урахуванням кута  $\delta(f)$  в нерухомому діелектрику. З виразу (10) видно також, що в разі випробування напругою на прохід конкретної ізоляції згідно наперед визначених умов (стандарту випробувань) параметри  $m$ ,  $L$  і  $f$  набувають

постійних значень, а тому зведений тангенс повного кута діелектричних втрат є лінійна функція технологічної швидкості  $V$ , тобто  $tg^* \delta_{\Sigma} = tg^* \delta_{\Sigma}(V)$  рис. 4.

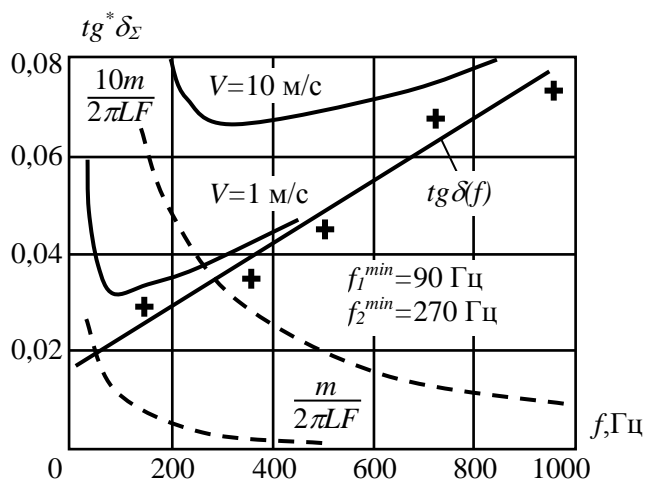


Рис. 3. Експериментальна (+)  $tg \delta(f)$  та розрахункова функції  $tg^* \delta_{\Sigma}(f)$  для ізоляції з полівінілхлоридного пластику при граничних швидкостях роботи технологічного обладнання

В цьому випадку функція  $tg^* \delta_{\Sigma}(V)$  набуває вигляду:

$$tg^* \delta_{\Sigma}(V) = a + bV, \quad (12)$$

де  $a = tg \delta(f_0)$  – відрізок, який відсікає функція  $tg^* \delta_{\Sigma}(V)$  на осі ординат при  $V=0$  та фіксованій частоті  $f_0$  (тобто,  $a$  чисельно дорівнює тангенсу кута діелектричних втрат в нерухомому діелектрику на частоті  $f_0$ );

$b = m/L\omega$  – постійний для даних умов випробувань коефіцієнт.

Як видно з основного виразу (10), похибка визначення зведеного тангенса кута повних діелектричних втрат в рухомій ізоляції складається, головним чином, з похибки вимірювання тангенса кута діелектричних втрат в нерухомому діелектрику. Останній визначається загально прийнятими методами. На рис. 3 наведені втрати для ізоляції з полівінілхлоридного пластику марки И40-13А, який широко застосовується на кабельних підприємствах в СНД. Кут втрат в нерухомому діелектрику визначався методом Q-метра з відносною похибкою, яка не перевищувала 10%. Останній член в (10) може бути визначений з похибкою не більшою 5% тому, що параметри, які входять в нього можна визначити досить точно. Так, значення коефіцієнта  $m$  можна визначити з похибкою не більшою 3%, оскільки остання практично обумовлена похибкою вимірювання випробувальної напруги. Швидкість  $V$ , довжину  $L$  та частоту  $f$  сучасними засобами вимірювань можна визначити з похибкою, яка не перевищує 0,5...1%. Отже, загальна похибка виразу (10), який визначає даний метод, не перевищує 12...14%. Ця точність задовільна, оскільки саме значення

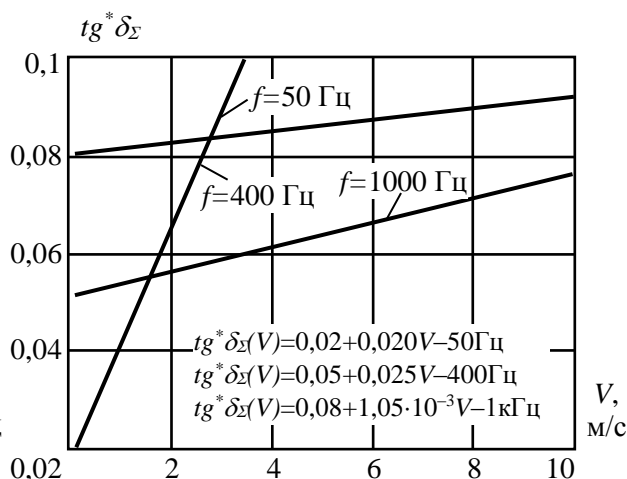


Рис. 4. Залежність  $tg^* \delta_{\Sigma}$  від технологічної швидкості для ізоляції з полівінілхлоридного пластику від технологічної швидкості

$tg^* \delta_{\Sigma}(f, V)$  може коливатись, в залежності від умов випробувань, в межах одного або двох порядків.

Суть процесу проектування приладу поточного контролю ізоляції кабельних виробів на технологічних лініях полягає в наступному.

Для конкретної технологічної лінії виробництва заданого типу ізоляції (з поліетилену, полівінілхлоридного пластикату чи поліімідної плівки), що має екструдер з певним діаметром черв'яка, визначається стандарт випробування (Табл. 1) та довжина випробувального електроду.

Встановлюють залежність тангенса кута діелектричних втрат  $tg \delta(f, V_0)$  для визначеної технологічної швидкості  $V_0$  в діапазоні частот до 3 кГц та заданої композиції матеріалу ізоляції нерухомого діелектрика стандартними методиками в умовах центральної заводської лабораторії.

З виразу (10) встановлюють мінімум зведеного тангенса кута повних діелектричних втрат рухомого діелектрика  $tg^* \delta_{\Sigma}(f, V_0)$  з урахуванням значення випробувальної напруги  $U_g$ , яка обумовлена вибраним стандартом випробування.

Вибирають значення частоти випробувальної напруги поблизу  $f_0$ , на якій функція  $tg^* \delta_{\Sigma}(f_0, V_0)$  набуває мінімального значення.

З урахуванням значення випробувальної напруги  $U_g$  розробляють конструкцію випробувального електроду та визначають значення конструктивної ємності і ємності жили на високовольтний електрод.

Розробляють або вибирають схему генерації випробувальної напруги, яка відповідає вибраному стандарту випробувань, з урахуванням одержаних основних параметрів випробувального електроду (вираз 11).

Розробляють канал реєстрації дефектів ізоляції з урахуванням струму, який обумовлений рухом діелектрика (див. вираз 4 та рис. 2). Розрізняючи можливість приладу визначають так, щоб амплітудне значення повного струму  $I$  на максимальній швидкості руху кабельного виробу на технологічній лінії або в процесі контрольованого перемотування не перевищувало максимального значення струму при повній втраті електричної міцності ізоляції. Це забезпечує надійне визначення дефектів рухомої ізоляції кабельних виробів.

**В п'ятому розділі** проведено дослідження умов випробування методом електрогідродинамічних аналогій. Зокрема встановлено, що найбільша відстань між центрами повздовжніх рядів чоткових електродів не повинна перевищувати 6,3 мм, якщо діаметр кульки складає 2,5 мм, та 9 мм, якщо діаметр кульки дорівнює 5 мм. Відстань між центрами чоткових електродів в повздовжніх рядах може вибиратись, як і раніше рівною 14 мм. Ці умови забезпечують надійне запалювання корони у всьому діапазоні випробувальних напруг. З урахуванням цього на основі співставлення вимог стандартів США, Великобританії, ФРН, ІЕС, CENELEC та чинного нині ГОСТ 2990-78 проведено обґрунтування

проекту національного стандарту України в частині випробувань кабельних виробів електричною напругою.

## ВИСНОВКИ

1. В роботі наведено теоретичне узагальнення і рішення наукової задачі неруйнівних випробувань ізоляційних елементів кабельних виробів напругою при поточному контролі. Воно полягає в обґрунтуванні теоретичної моделі електромагнітного процесу, який має місце в стендах випробувань, в установленні функціональних залежностей роботи засобів випробувань та технологічних екструзійних ліній нанесення ізоляції, а також у виявленні суті фізичних процесів, які призводять до діелектричних втрат в рухомій ізоляції. Вирішення задачі дало змогу провести науково-методичне обґрунтування проекту національного стандарту України з випробувань кабельних виробів напругою та створити теоретичну базу розробки вітчизняних засобів випробувань напругою на технологічних лініях. Це дозволяє, вивести в цій сфері нормативну базу України на рівень загальноєвропейських стандартів.

2. Розробка та впровадження в практику дослідного зразка приладу для поточних випробувань напругою до 30 кВ вже створило необхідні передумови забезпечення належної якості продукції, яка виготовляється зокрема заводом “Південкабель” по найсучаснішій технології нанесення ізоляції з використанням силанольнозшитого поліетилену. Це дозволило закріпитись на вітчизняному ринку шахтних кабелів з пластмасовою ізоляцією та витіснити з нього аналогічну імпортовану до цього часу кабельну продукцію.

3. Проведений аналіз стану і тенденцій розвитку світової нормативної бази та засобів випробувань напругою на прохід доводить, що основним напрямком розвитку є уніфікація національних стандартів передових країн з використанням напруг різного виду (змінної напруги промислової частоти, імпульсної напруги частотою слідування 200- 600 Гц, змінної напруги підвищеної частоти 1-3 кГц, постійної напруги) та безперервне розширення зразків приладів, які реалізують ці умови випробувань.

4. На основі рішення загальної системи рівнянь Максвелла розроблена теоретична модель електромагнітних процесів в стендах випробувань напругою на прохід. Складено рівняння балансу струмів випробувального електроду, яке, на відміну від попереднього, враховує струм переносу зовнішньою поверхнею випробуваного діелектрика. Доведено, що загальна ємність в схемі заміщення випробувального електроду, в нормальному режимі роботи складається з недосконалої ємності діелектрика, який підлягає випробуванню, та конструктивної (геометричної) ємності високовольтного електроду. Встановлено, що при перемотуванні кабельних виробів можливе виникнення

резонансу струмів на частоті 3,31 кГц і резонансу напруг на частоті 20,9 кГц. В екструзійних технологічних лініях це явище не виникає внаслідок наявності ванни охолодження. Запропонована інженерна методика визначення погонної конструктивної ємності з використанням розрахункової моделі поперечного перерізу випробувального електроду у вигляді двох металевих оболонок, які обхвачують одна одну. Це значно спрощує інженерні розрахунки при проектуванні засобів випробувань.

5. Установлені і досліджені функціональні залежності роботи екструзійних технологічних ліній та засобів поточних випробувань напругою. На основі критерію обмеження повної потужності останніх значенням 200 ВА, одержана інженерна методика, яка дозволяє співставити між собою неоднорідні по своїх вимогах стандарти випробувань, що застосовуються в різних країнах (США, ФРН, Великобританія, країни СНД). З використанням узагальненої кривої залежності пробивної напруги від часу її дії на тверді діелектрики установлені кількісні критерії вибору для технологічних ліній випробувальних засобів, які відтворюють вимоги конкретного стандарту випробувань.

6. Доведено, що на технологічних лініях з діаметром черв'яка екструдера 45...90мм можливе ефективне застосування приладів, які відтворюють вимоги випробувань згідно стандарту UL-1581 (США), при діаметрі черв'яка 90...160 мм і більше перевага має бути надана випробувальним засобам, які працюють згідно стандарту BS (Великобританія). Застосування вимог чинного нині в Україні ДСТУ 2990-78 дозволяє ефективно використовувати парк приладів, які відтворюють вимоги цього стандарту і знаходяться в експлуатації на вітчизняних кабельних підприємствах, тільки при діаметрі черв'яка 125мм і більше.

7. На основі теоретичної моделі електромагнітних процесів, які мають місце при поточних випробуваннях напругою, дано тлумачення механізму діелектричних втрат в рухомій ізоляції. Зокрема, узагальнене класичне поняття кута діелектричних втрат на випадок замкнутого навколо внутрішнього провідника шару діелектрика, який рухається крізь електрод, що коронує. Установлено, що при русі ізоляції виникає так званий внесений кут діелектричних втрат, який доповнює кут втрат в нерухомому діелектрику до кута повних діелектричних втрат. Побудовані векторні діаграми струмів і напруг для випробувального електроду і по них встановлена особливість, яка властива електромагнітному процесу у випадку руху діелектрика, тобто: внесений кут діелектричних втрат, на відміну від кута діелектричних втрат в нерухомому діелектрику, може набувати значень як більших так і менших, від нуля.

8. З урахуванням закономірностей виникнення корони на зовнішньому боці випробувального діелектричного шару проведено дослідження умов випробувань напругою на прохід і доведено, що відстань між центрами чоткових

електродів з діаметром кульки 2,5мм в поперечних рядках повинна складати не більше 6,3мм, а при діаметрі кульки 5мм, - вона не повинна перевищувати 9мм. Ці вимоги, в основному, визначають умови виникнення коронного розряду, який створює зовнішню провідникову “обкладку” випробувального діелектрика.

9. Результати роботи загалом дозволили дати чітке визначення методу поточних випробувань напругою, як методу неруйнуючого контролю цілісності ізоляційних елементів кабельних виробів при їх русі в процесі виготовлення на технологічних лініях або обладнанні контрольного перемотування. Таке визначення не дано до цього часу жодним з національних або міжнародних стандартів. Похибка методу не перевищує 14%. Ці результати, зокрема, дозволили провести науково-методичне обґрунтування проекту національного стандарту України з випробувань кабельних виробів напругою в інтересах Держстандарту, Міністерства промислової політики та Міністерства оборони України.

10. Розроблений і пройшов досліду експлуатацію на випробувальному стенді в умовах заводу перший дослідний зразок вітчизняного засобу поточних випробувань напругою до 30 кВ, який відповідає міжнародним вимогам і може бути рекомендований до серійного виготовлення та використання на кабельних підприємствах України.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Золотарев В.М., Науменко О.А. Стандартизація випробувань напругою на прохід / В кн. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість / Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антоненко Ю.О., Науменко О.А. – Харків: Регіон – інформ, 2000. – С. 270 – 289.

2. Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антоненко Ю.А., Науменко А.А. К оценке максимальной тангенциальной напряженности электрического поля в трехжильном силовом кабеле на напряжение 10кВ // Электротехника. 1998.- №5. – С. 12 – 17.

3. Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Кутовой В.В., Кутовой С.В., Махоньков В.И., Пешков И.Б., Хижняк Н.А. Экологически чистая вакуумная установка для сушки кабеля с бумажной изоляцией. // Электротехника. 1998. - №5 С. 10-13.

4. Золотарев В.М., Бузько С.В., Карпушенко В.П., Науменко А.А. Силовые кабели с изоляцией из силанольносшитого полиэтилена // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Труды Харьковского государственного политехнического университета, – Ч. 4. Харьков: ХГПУ, 1998, С. 520 – 522.



5. Золотарев В.М. Испытания напряжением на проход: современные требования к методу и средствам // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 64. – С. 62– 66.
6. Золотарев В.М. Функциональная кривая средств испытаний напряжением на проход, воспроизводящих требования различных стандартов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып.127. – С. 14 – 16.
7. Золотарев В.М. Функциональная зависимость, характеризующая технологический ряд экструзионных линий нанесения изоляции на кабельные изделия / Вісник інженерної академії наук України. Харків: 2000. – С. 575 – 576.
8. Золотарев В.М. Принципы построения стандартов испытаний изоляции напряжением на проход / Труды Харьковского авиационного института. – 2000. – Вып. 14 С. 390-393.
9. Золотарев В. М., Карпушенко В.П., Антоненц Ю. А., Чувурин Н.П., Щербенюк Л.А. Мониторинг показателей качества бумажной изоляции силовых кабелей на напряжение 10кВ на заводе “Южкабель”. // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 88. – С. 22 – 31.
10. Золотарев В.М. Науменко А.А. Современные требования к способу и средствам испытаний напряжением на проход. Труды III –й международной конференции “Физико-технические проблемы электрических материалов и компонентов”. – М. – 1999. – С. 101–102.
11. Золотарев В.М. Проект Государственного стандарта Украины “Кабели, провода и шнуры. Методы испытаний напряжением.” –Труды международной научно-технической конференции “Проблемы теории и практики технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки”. – Харьков, 2001. – Вісник інженерної академії України. – Київ. – 2001. – С. 287-289.

## АНОТАЦІЇ

Золотарьов В.М. Електричний метод і прилад для поточного контролю параметрів ізоляції кабельних виробів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2002.

Розглянуто коло питань удосконалення випробувань широкого асортименту кабельних виробів з пластмасовою та гумовою ізоляцією напругою на прохід в процесі їх виготовлення на екструзійних лініях та перемотування на технологічному обладнанні. Розроблена теоретична модель електромагнітних процесів в стендах таких випробувань.

Узагальнено класичне поняття кута діелектричних втрат на випадок рухомого діелектрика. Встановлено, що в рухомій ізоляції виникає так званий внесений кут діелектричних втрат, який може бути як більшим, так і меншим нуля і доповнює кут втрат в нерухомому діелектрику до кута повних діелектричних втрат у випадку руху діелектрика. Запропонована методика вибору засобів випробувань, які відтворюють вимоги різних стандартів, для конкретних екструзійних ліній. Досліджені умови випробування і сформульовані вимоги до випробувального електроду.

Результати дослідження покладені в основу розробки національного стандарту України з випробувань кабельних виробів напругою, а також втілені в розробці вітчизняного засобу поточних випробувань напругою.

Ключові слова: випробування напругою, силові кабелі, електрод, тангенс кута діелектричних втрат, діелектрична проникність, змінне електромагнітне поле, об'ємний електричний заряд.

Золотарев В.М. Электрический метод и прибор для поточного контроля параметров изоляции кабельных изделий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2002.

Рассмотрен круг вопросов усовершенствования испытаний широкого ассортимента кабельных изделий с пластмассовой и резиновой изоляцией напряжением на проход в процессе их изготовления на экструзионных линиях и перемотки на технологическом оборудовании.

На основе системы уравнений Максвелла, учитывающей ток переноса движущейся внешней поверхности диэлектрического слоя, нанесенного на проводящую подложку (токопроводящую жилу, оболочку или броню), разработана теоретическая модель и составлено уравнение баланса токов в испытательном электроде устройства поточного контроля параметров изоляции в процессе ее изготовления на технологических экструзионных линиях. Показано, что внешнее электрическое поле испытательного электрода в пространстве между высоковольтным электродом и защитным кожухом может быть найдено из решения задачи Дирихле для уравнения Лапласа. В результате решения задачи предложена методика определения конструктивной емкости испытательного электрода.

Установлены соотношения между функциональными зависимостями, характеризующими работу современных экструзионных технологических линий и средств испытаний напряжением на проход в процессе изготовления изоляционных элементов кабельных изделий. Предложена инженерная

методика выбора области применения средств испытаний напряжением на проход, которые воспроизводят требования различных стандартов (UL, BS, ГОСТ). Установлено, что на технологических линиях с диаметром червяка экструдера 90мм и ниже целесообразно применение средств испытаний, воспроизводящих требования американского стандарта UL – 1581, а при диаметре червяка экструдера 125мм и выше наиболее целесообразно применение испытательных средств, воспроизводящих требования стандарта BS: 5099 (Великобритания) или ГОСТ 2990-78, действующего сейчас в странах СНГ. Обобщено классическое понятие угла диэлектрических потерь на случай движущегося через коронирующий высоковольтный электрод слоя диэлектрика, нанесенного на металлическую подложку. Установлено, что в случае движущегося диэлектрического слоя, вследствие переноса зарядов из коронирующей области высоковольтного электрода внешней поверхностью диэлектрика, возникает так называемый внесенный угол диэлектрических потерь, который может быть как большим, так и меньшим нуля, и дополняет угол потерь в неподвижном диэлектрике до угла полных диэлектрических потерь в движущемся диэлектрике. Показано, что в случае движения диэлектрика приведенный тангенс полного угла диэлектрических потерь численно равен тангенсу угла диэлектрических потерь в неподвижном диэлектрике, к которому добавляется слагаемое, пропорциональное скорости движения и обратно пропорциональное произведению угловой частоты испытательного напряжения и длины высоковольтного электрода. Это позволило установить, что в том диапазоне частот где тангенс угла потерь в неподвижном диэлектрике возрастает (случай полярных диэлектриков), приведенный тангенс полного угла диэлектрических потерь имеет минимум. Для неполярных диэлектриков характеризующихся слабым убыванием угла потерь с ростом частоты испытательного напряжения, тангенс полного угла диэлектрических потерь также является монотонно убывающей функцией.

При испытании конкретных диэлектриков напряжением определенной частоты, приведенный тангенс полного угла диэлектрических потерь пропорционален технологической скорости движения изолированной жилы в линии наложения изоляции. При нулевой скорости движения кабельного изделия, значение приведенного тангенса полного угла диэлектрических потерь численно равно тангенсу угла диэлектрических потерь в неподвижном диэлектрике. Установленные закономерности позволяют сформулировать требования к средствам испытаний напряжением на проход и конструировать их на уровне, отвечающем современным требованиям.

С учетом закономерностей возникновения короны на внешней стороне испытуемого диэлектрического слоя проведено исследование условий испытаний напряжением на проход и показано, что расстояние между центрами

четочных электродов с диаметром шарика 2,5 мм в поперечных рядах должна составлять не более 6,3 мм. При диаметре шарика испытательного электрода 5 мм, это расстояние не должно превышать 9 мм. Эти требования, в основном, определяют условия возникновения коронного разряда, который создает внешнюю проводящую “обкладку” коаксиального конденсатора с испытываемым диэлектриком.

Результаты исследования положены в основу разработки национального стандарта Украины по испытаниям кабельных изделий напряжением, а также внедрены в разработанном в Украине средстве испытаний напряжением на проход.

Ключевые слова: испытания напряжением, силовые кабели, электрод, тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрическая проницаемость, переменное электромагнитное поле, объемный электрический заряд.

Zolotaryov V.M. Electric method and device for spark testing of cables and wires – Manuscript.

The thesis is for technical sciences candidate's degree, specialty 05.11.13 – devices and methods for control and detection of material's composition. – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2001.

The question concerning development of the tests for widely assorted plastic and rubber insulated cables and wires by means of spark testing has been analyzed.

A theoretical model of electromagnetic processes taking place in spark test benches during such a tests is developed. The classic conception of dielectric scattering angle in the conditions of moving dielectric has been summarized. It has been proven that there exists so called introduced angle of dielectric scattering, which can have positive or negative value. This angle of dielectric scattering for moving dielectric, being added to the angle of dielectric scattering for stationary dielectric, results in angle of full dielectric scattering. The technique of spark testers' selection is proposed for different testing standards and for predefined extrusion lines. The conditions of testing have been researched and requirements for testing electrode have been proposed.

The results of research have been considered as the basics of the Ukrainian National Standard for spark testing of cables and wires and also are state-of-the-art in the device for spark testing developed in Ukraine.

Keywords: tests by voltage, power cable, electrode, tangent of angle of dielectric scattering, dielectric permeability, alternative electromagnetic field, volumetric electric charge.

Відповідальний за випуск д.т.н., проф. Себко В.П.

Підписано до друку 29.07.02 р. Формат 145×215.  
Формат паперу 60×90/16. Папір Могра. Друк – ризографія.  
Обсяг 0,9 авт. арк. 1,6. Тираж 100 прим. Зам. № 307.

---

Видавничий центр НТУ “ХПІ”, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21  
Свідоцтво про реєстрацію ДК №196 від 10.07.2000.

---

Друкарня видавничого центру НТУ “ХПІ”