

На правах рукопису

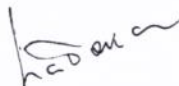
Набока Борис Григорович

ВИСОКОВОЛЬТНА ТВЕРДА ТОНКОШАРОВА ІЗОЛЯЦІЯ :  
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ, ТЕХНОЛОГІЇ  
ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ДІАГНОСТИКИ

05.09.13 - Техніка сильних електричних  
та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків - 1997



ЛННБ України ім.В.Стефаника



00751854 (U)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Харківському державному політехнічному університеті.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор  
Кононов Борис Тимофійович

доктор технічних наук, професор  
Себо Вадим Пантелійович

доктор технічних наук  
Гурин Валерій Миколайович

Провідна організація - Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування (НДТІП), м.Харків

Захист відбудеться "10" квітня 1997 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.15 у Харківському державному політехнічному університеті за адресою :

310002, м.Харків-2, МСП, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий "20" лютого 1997 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

  
ЛНЧБ № 8 Студентів  
Харківського політехнічного університету

Стгоров В.О.

Актуальність теми роботи.

Тверда тонкошарова ізоляція (ТТІ) - широке поняття, що охоплює стрічкову ізоляцію товщиною до 0.1 мм. Вона просякнена, як правило, термореактивними компаундами. Найчастіше - це полімерний композиційний матеріал, наприклад, слюдапапір, просякнутий епоксидним компаундом. Сюди ж відноситься чисто плівкова ізоляція електричних конденсаторів, трансформаторів, котушок.

При будь-якій технології виготовлення ТТІ завжди містить певну кількість повітряних включень. В цьому полягає її принципова відмінність від інших видів тонкошарової стрічкової ізоляції, просякнених рідкими нетвердіючими речовинами.

Застосування просякнюючих сумішей з досить малим зсіданням та термоскорочуваних плівок дало змогу створити ТТІ, придатну для експлуатації при високій напрузі. Поява тонких (20 мкм) слюдапаперових стрічок та нових термореактивних компаундів (епоксидних, полісульфонових, кремнійорганічних) створило передумови для розробок ряду унікальних пристроїв з робочою температурою від -60 до +150-220 °С (для наукового приладобудування, силового приво-ду, імпульсного енергопостачання).

Створення якісної ТТІ вимагає подолання ряду специфічних проблем, пов'язаних з тим, що дефектоутворення в ній носить незворотний характер:

- а) послаблення ефектів сильного поля в ТТІ (крайових ефектів, теплоутворень внаслідок діелектричних втрат та часткових розрядів);
- б) виявлення природи дефектоутворень в ТТІ на всіх етапах її виробництва (під час просякнення, формування, полімеризації);
- в) розробка ефективних методик контролю всіх основних стадій технологічного процесу виготовлення та якості готової ТТІ.

Фізичні процеси в ТТІ мають багато спільного також і з іншими видами ізоляції (електромашинною, кабельною, апаратною). Проте тут вони яскравіше проявляються; зразки з ТТІ значно дешевші (що дає змогу завдяки великим об'ємам виборок отримувати надійні статистичні дані), мають незначну власну індуктивність, завдяки чому досягається висока чутливість схем реєстрації ЧР; нарешті, вони - прозорі, а це дає змогу застосовувати чутливі методи ІЧ-спектроскопії для досліджень причин макронеоднорідностей ізоляції.

*Мета роботи* - створення теоретичних засад проектування, технології виготовлення та діагностики високовольтної твердої тонкошарової ізоляції, головним чином, на підставі конденсаторного слюдонаперу та термореактивних просякнучих сумішей.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні *завдання*.

1. Досліджена роль крайових ефектів, які проявляються перш за все у відповідному розподілу місць пробів та впливові полярності прикладеної напруги.

2. Досліджені фактори впливу на концентрацію напруженості поля, особливо ті, які обумовлені неоднорідністю діелектрика.

3. Обґрунтовані методики інтерпретації амплітудних та фазових спектрів імпульсів часткових розрядів з метою оцінки розмірів повітряних краплин та швидкості релаксації поверхневих зарядів.

4. Встановлена природа дефектоутворень в ТТІ та вказані засоби їхньому запобіганню.

*Автор вносить на зашт:*

1. Методики математичного моделювання процесів дефектоутворення в ТТІ та результати їхніх експериментальних досліджень, включаючи прямі та побічні ознаки хроматографічних явищ, способи впливу на мікроструктуру, поточний контроль якості [1,6, 16, 19,20-23].

2. Методику аналізу крайових ефектів в ТТІ, засновану на оцінці *асимптотичних* характеристик електростатичних полів в ближніх зонах країв електродів. Важливою умовою її застосування є обмеження порівнянням тільки *подібних* структур полів [2,9-11].

3. Методику знаходження параметрів повітряних краплин в ТТІ по сімействам амплітудних спектрів ЧР, знятим при кількох рівнях випробувальної напруги [4,5,8,12].

4. Спосіб експрес-аналізу якості ТТІ по ширині сімейства амплітудних спектрів ЧР, представленому в напівлогарифмічному масштабі [14].

5. Спосіб якісної оцінки поверхневої електропровідності краплин по фазовим спектрам ЧР [24,25].

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше одержані наступні результати:

А) в області досліджень ефектів сильного поля -

- 1) висунута методика розрахунків крайових ефектів в ТТІ, яка дає можливість одержання точних формул для складних моделей з криволінійними межами розподілу середовищ;
- 2) знайдені точні аналітичні розв'язання ряду задач з врахуванням неоднорідності діелектрика;
- 3) створені математичні основи діагностики ТТІ по характеристикам імпульсів ЧР, які включають інтегральні рівняння Вольтера та загальні розв'язання останніх відносно функції розподілу краплин по напругам початку ЧР  $\psi(U_{пчр})$ .
- 4) сформульовані принципи аналізу фазових спектрів ЧР та ознаки швидкої релаксації поверхневих зарядів;

Б) в області досліджень фізичних явищ в ТТІ -

- 1) встановлена природа механізмів утворень повітряних краплин в ході виготовлення ТТІ;
- 2) доведена наявність хроматографічного розшарування багатоконпонентних компаундів при просякненні ТТІ - причини макронеоднорідностей ізоляції;
- 3) встановлено вплив термомеханічних напружень на дефектоутворення в ТТІ навіть у відсутності зовнішніх навантажень;
- 4) встановлена флікер-природа характеристик ЧР, обумовлена процесами взаємодії розрядів і діелектрика та кумулятивними ефектами сильного поля в ізоляції.

Практична цінність роботи полягає в наступному.

А) в області удосконалення технології виготовлення ТТІ -

- 1) обґрунтовані рекомендації по зменшенню кількості повітряних краплин в секціях ТТІ;
- 2) вказані способи подолання хроматографічних явищ при просякненні ТТІ та запропонована математична модель цього процесу;
- 3) обґрунтовані методики контролю стану ТТІ по характеристикам імпульсів ЧР, направлені на підвищення достовірності аналізу та покращення відтворюваності вимірювань.

Б) В області розробки нових різновидностей ТТІ -

- 1) знайдений оптимальний вміст компонентів комбінованого діелектрика, при якому забезпечується максимальне зменшення концентрації поля на краях обкладинок;
- 2) запропонований спосіб формування мікроструктури ТТІ, при якому частина усадочних краплин заповнюється рідким діелектриком.

В) В області діагностики ТТІ -

- 1) розроблена методика та алгоритм візуалізації параметрів повітряних краплин по результатам вимірів амплітудних спектрів ЧР та встановлені ознаки прискореної релаксації поверхневих зарядів;
- 2) запропонований спосіб побудови розгорнутої схеми заміщення ТТІ з врахуванням часткового перекриття лусок слюди;
- 3) створений лабораторний комплекс по неруйнуючій діагностиці ТТІ та методика його тестування .

*Методологія роботи* базується на аналізі експериментальних даних випробувань ТТІ (руйнуючих - короткочасних та довгострокових, а також неруйнуючих випробувань), побудові фізичних та математичних моделей досліджуваних процесів, формулюванню на цій основі рекомендацій та їхньої перевірки на практиці. Протиріччя між модельними та експериментальними даними давали поштовх до подальшого пошуку, що в деяких випадках сприяло глибшому розумінню суті справи - механізмів формування краплин, природи макронеоднорідностей, зчеплення лусок слюди, тощо.

*Апробація роботи.*

Основні результати роботи доповідалися на засіданнях секції ІV АН СРСР "Техніка та електрофізика високих напруг" (Томськ, 1976, Ленінград, 1980, Харків, 1981) та "Фізика діелектриків" (Баку, 1982, Москва, 1986, С.Петербург, 1993), галузевих науково-технічних конференціях (Серпухов, 1988, Москва, 1989, Київ, 1990, Харків, 1994, 1995 р.), семінарах кафедри електроізоляційної та кабельної техніки ХПІ-ХДПУ і МЕІ (м.Москва, 1991 г.). Її основний зміст відображено в монографії [1], довіднику [2], статтях [3-13], авторських свідоцтвах [14-17], депонованих рукописах [18-21] та доповідях [23-25].

Впровадження головних результатів роботи знайшло в науковій апаратурі, створеній по госпрозрахунковим роботам з Харківським інститутом радіоелектроніки (з обсягом робіт понад 600 тис. крб. в цінах 1986 р.) та в технології виготовлення конденсаторів К78-15 у ВО "Елітан" (м. Харків).

Особиста участь автора - наукового керівника цих робіт - полягала в постановці задач, їхньому обґрунтуванні, участі в розробках методик експериментів та контролю результатів.

Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. Містить 261 стор. разом з 85 рисунками; в списку літератури - 317 найменувань.

В першому розділі виконаний огляд загальних проблем ТТІ, характерних для всіх полімерних композиційних матеріалів, а також ряд специфічних задач, обумовлених ефектами сильного поля в ТТІ та особливостями технології її виготовлення.

Статистика розподілу місць пробів та мікрофотографії дендритів свідчать, що крайові ефекти відіграють визначальну роль для високоресурсної ізоляції, робочі напруженості в якій менше 100 МВ/м. Концентрація електростатичного поля - основна причина крайових ефектів (інша причина - термомеханічні напруження). Ставиться задача розробки методики, яка б давала можливість охопити всі основні розрахункові моделі крайової зони.

Ефекти сильного поля проявляються також в дії ЧР, що слід би використати для діагностики ТТІ. Для цього необхідні математичні моделі ізоляції з повітряними краплинами, лабораторне устаткування, здатне забезпечити фіксацію коротких імпульсів ЧР (тривалістю менше 0.5 мкс та амплітудою до 100 мкВ), потужна обчислювальна техніка та відповідні спеціалізовані алгоритми обробки даних.

У другому розділі викладена методика розрахунків електростатичних полів в тонкошаровій ізоляції. Вона складається з трьох послідовних перетворень розрахункових моделей, що передують власне розрахунку поля: а) конформне відображення на півплощину (Рис.10); б) дзеркальне відображення відносно її межі; в) обернення, тобто перехід до дуальних задач, коли еквіпотенціали та силові лінії міняються місцями. Перша дія ліквідує точки розриву напруженості поля - кутові частки електродів. Дві інших - приводять до заміни електродів (з невідомим розподілом густини поверхневих зарядів) на лінійні заряди (величина та розташування у просторі яких цілком визначені). В результаті відпадає необхідність в тих вузлах, які раніше слід було б розміщувати на електродах, зменшується порядок системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), до якої, врешті, і зводиться задача.

Якщо форми ліній розмежування різних діелектричних шарів в перетвореній задачі прийняти прямими, то розрахунки в системі типу "лінійні заряди - діелектричні пластини" можна виконати аналітичними методами. Плоским поверхням в перетвореній задачі відповідають криволінійні - в вихідній задачі. Саме для таких моделей вперше були знайдені точні аналітичні вирази для напруженості поля в конденсаторній ізоляції [9,10,12].

Всі моделі для розрахунку полів в ТТІ мають одну особливість: вони включають як області з однорідним полем, так і області з істотно неоднорідним полем. Складність розрахунку таких моделей полягає в тому, що розряд формується в невеликій зоні поблизу вістря електроду, лінійний розмір якої ледве сягає кількох відсотків від товщини діелектрика. Для того, щоб забезпечити високу точність розрахунків саме в цій зоні, там треба розмістити ряд вузлів. Загальна кількість вузлів, якими треба охопити всю крайову зону, виявляється досить великою. Суперечність між необхідною високою точністю розрахунків поля поблизу країв електродів та обмеженою кількістю вузлів вдалося подолати в запропонованій методиці.

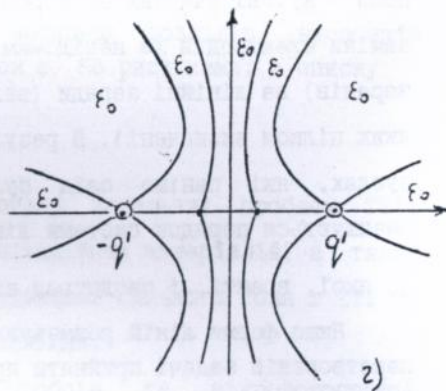
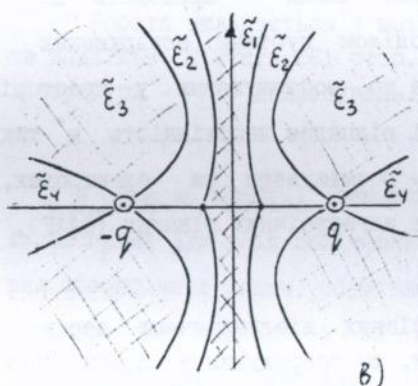
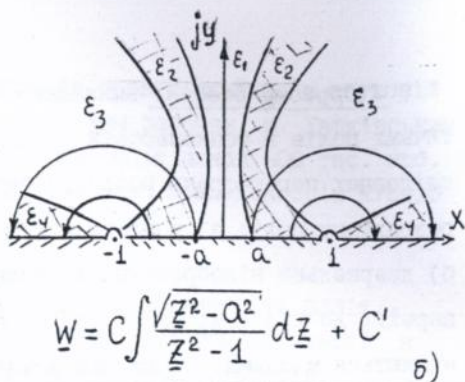
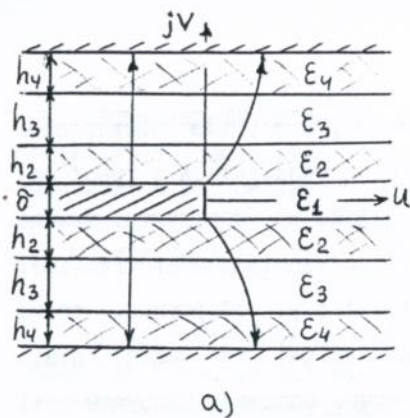


Рис.1. Ряд послідовних перетворень розрахункової моделі (а): конформне відображення на півплощину (б), обернення (перехід до дуальної задачі) (в), перехід до вторинних зарядів у вакуумі (г).

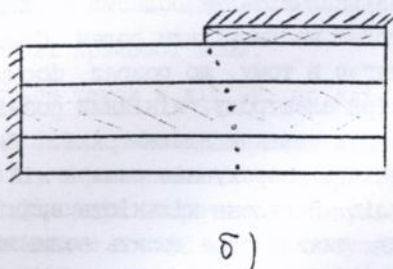
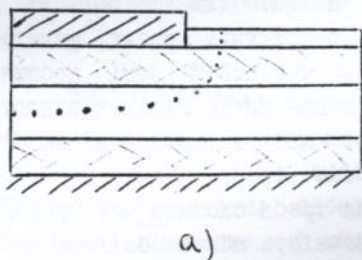


Рис.2. Схема моделювання на електропровідному папері картини екіпотенціалів (а) та силових ліній (б). [Модель край обкладинки].

1) Конформне перетворення розрахункових моделей та перехід до обернених (дуальних) задач.

Картина електростатичного поля в кусочно-однорідному просторі являє собою систему взаємно ортогональних ліній (силових та еквіпотенціальних), заломлення яких відбувається на поверхнях розмежування різних середовищ. Конформне перетворення зберігає кути між будь-якими лініями, що перетинаються. Тому система ліній залишиться ортогональною і після перетворення, тобто буде відповідати певному новому полю.

Перехід до дуальних задач застосовується часто при моделюванні на електропровідному папері. Спочатку наносять картину еквіпотенціалей (Рис.2а). Потім на межі електродів виконують надрізи, а нові електроди розміщують на місці минулих силових ліній. Співвідношення електропровідностей паперових смуг змінюють на протилежне (Рис.2б). Тоді картина еквіпотенціалей оберненої задачі буде відповідати картині силових ліній вихідної моделі (Рис.2а).

Вкажемо методику перетворення на півплощину та основні співвідношення, пов'язані з переходом до дуальних задач.

Функція комплексної змінної  $W(Z)$ , що забезпечить необхідне перетворення, знайдеться за допомогою інтегралу Шварца-Кристоффеля [2]. Перетворення зводиться до знаходження координат вузлів, заданих в площині  $W$ , після переходу до площини  $Z$ . Для цього доводиться розв'язувати ряд нелінійних рівнянь типу:  $W_1 = f(Z_1)$ , наприклад, методом Н'ютона. (При цьому для початкового наближення до чергового кореня беруться координати попереднього вузла).

Перехід до дуальної задачі - не складний. Діелектричні проникливості областей в оберненій задачі  $\tilde{\epsilon}_1$  вибирають обернено пропорційними відповідним значенням  $\epsilon_1$  в вихідній задачі:  $\tilde{\epsilon}_1 = c/\epsilon_1$ , де  $c$  - розмірний коефіцієнт пропорційності.

Зв'язок між компонентами вектора напруженості в вихідній та

оберненій задачах витікає з розгляду умов на межі розподілу середовищ (Рис.3). При переході з одного середовища в інше величини  $D_{\perp}$  та  $E_{\tau}$ , що входять в перше з рівнянь (1), не змінюються; величини  $D_{\tau}$  та  $E_{\perp}$ , які входять в друге рівняння, одночасно змінюються стрибком. Таким чином, співмножник  $\beta$  не змінюється при переході через межу розподілу середовищ. Тоді співвідношення (1) лишаються в силі і для довільних відповідних точок вихідної та оберненої задач (а не лише для тих, які розташовані на межі).

Зв'язок між напругою  $U_j$  та величиною лінійного заряду  $q_j$  показаний на Рис.4. Величина лінійного заряду, що з'являється в оберненій задачі в точці разриву функції  $\underline{W}=f(\underline{Z})$ , пропорційна різниці потенціалів електродів, розмежуваних цією точкою. Лінійний заряд  $q_j$  визначається з точністю до сталого співмножника  $\beta$ , який скорочується після зворотнього переходу до прямої задачі по (1).

Вказані вище дії (знаходження функції комплексної змінної, конформне перетворення, обернення задачі та знаходження густини лінійних зарядів) повністю визначають обернену задачу.

2) Розрахунок обернених (дуальних) задач виконується методом вторинних зарядів. Для цього переходять до вакууму (Рис.1г), де розміщені нескінченно тонкі діелектричні поверхні. Густина вторинних зарядів на цих поверхнях підбирають так, щоб на них стали виконуватись задані граничні умови: відповідне заломлення силових ліній або потрібний потенціал поверхні. Для поверхні, яка замінила межу розподілу середовищ  $\tilde{\epsilon}_1, \tilde{\epsilon}_2$ , вторинний заряд задовольняє інтегральному рівнянню Фредгольма другого роду:

$$\frac{\tilde{\sigma}(Q)}{2\epsilon_0} - \frac{\tilde{\epsilon}_2 - \tilde{\epsilon}_1}{\tilde{\epsilon}_2 + \tilde{\epsilon}_1} \cdot \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int \frac{\tilde{\sigma}(M) \cdot \cos(\vec{r}_{QM}, \hat{n}_Q)}{r_{QM}} \cdot d\tau_M = \frac{\tilde{\epsilon}_2 - \tilde{\epsilon}_1}{\tilde{\epsilon}_2 + \tilde{\epsilon}_1} \cdot \tilde{E}_{\perp}(Q), \quad (3)$$

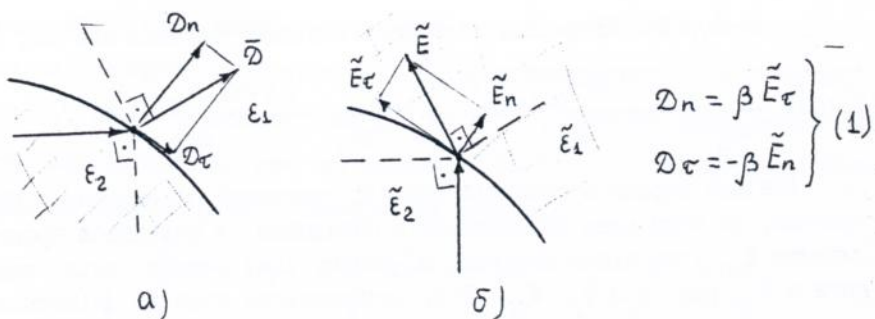


Рис.3. Зв'язок між характеристиками поля в вихідній (а) та дуальній (б) задачах. ( $\beta$  - розмірний коефіцієнт,  $\Phi/\text{м}$ ).

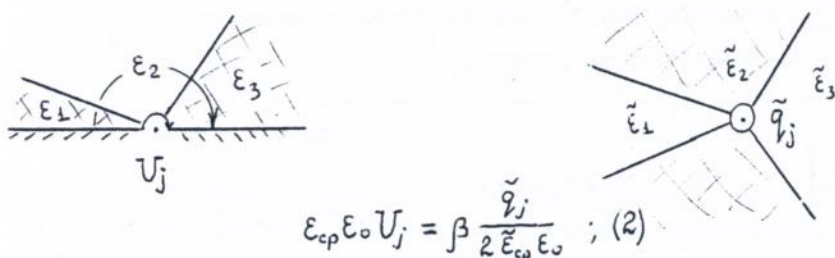


Рис.4. Зв'язок між різницею потенціалів ( $U_j$ ) в вихідній задачі та лінійним зарядом ( $\tilde{q}_j$ ) - в оберненій задачі.

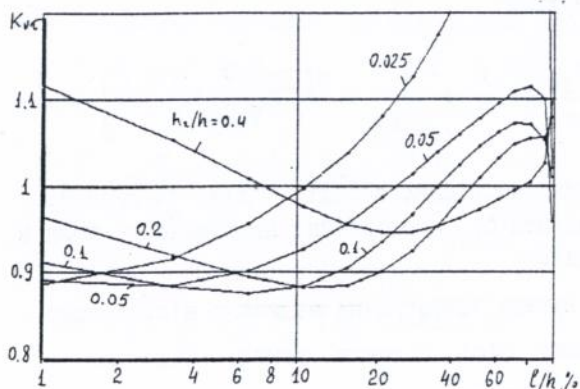


Рис.5. До знаходження оптимального вмісту компонентів комбінованого діелектрика.

де  $\tilde{E}_n(Q)$ , наприклад, для двох лінійних зарядів має вид :

$$\tilde{E}_n(Q) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1' \cos(\tilde{r}_{Qq1}, \hat{n}_Q)}{r_{Qq1}} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_2' \cos(\tilde{r}_{Qq2}, \hat{n}_Q)}{r_{Qq2}}$$

( Лінійні заряди в останній формулі приведені до вакууму. Це означає, що коли вони знаходилися в середовищі з середньою проникливістю  $\tilde{\epsilon}_{\text{ср}}$ , то після переходу до вакууму їхні заряди слід зменшити в  $\tilde{\epsilon}_{\text{ср}}$  раз:  $q_j' = \tilde{q}_j / \tilde{\epsilon}_{\text{ср}}$ . Тоді напруженість поля не зміниться ).

При числовому розв'язку рівняння (3) зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) :

$$\bar{B} \cdot \bar{\sigma} = \bar{D} \quad , \quad (4)$$

де  $\bar{B}$  - квадратна матриця коефіцієнтів, елементи якої  $b_{ij}$  знаходяться за формулами :

$$b_{ij} = \begin{cases} 1/(2\epsilon_0) & - \text{при } i = j ; \\ - \frac{AE}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\cos(\tilde{r}_{ij}, \hat{n}_i)}{r_{ij}} & - \text{при } i \neq j ; \end{cases}$$

$AE = (\tilde{\epsilon}_2 - \tilde{\epsilon}_1) / (\tilde{\epsilon}_2 + \tilde{\epsilon}_1)$  ;  $i$  - вузол, в якому шукається поле ;  
 $j$  - вузол, в якому знаходиться заряд ;

$\bar{D}$  - матриця-стовпчик правих частин СЛАР , елементи якої  $d_i$  знаходяться за формулами :

$$d_i = AE \left[ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1' \cos(\tilde{r}_{ix1}, \hat{n}_i)}{r_{ix1}} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_2' \cos(\tilde{r}_{ix2}, \hat{n}_i)}{r_{ix2}} \right] ;$$

$x_1, x_2$  - абциси координат лінійних зарядів ( $x_1 = -1, x_2 = 1$ ).

Зауважимо, що коефіцієнти  $b_{ij}$  пропорційні напруженості поля в  $i$ -му вузлі від  $j$ -го заряду.

Обернена задача завжди симетрична відносно вісі абсцис, а найчастіше - і відносно вісі ординат також. Якщо це врахувати, то вузли досить буде розмістити тільки у першому

квадранті. Тоді вплив симетричних зарядів з IV квадранту врахується за допомогою коефіцієнтів  $b^{1v}$ , антисиметричних (із квадрантів II та III) - коефіцієнтами  $b^{11}$  та  $b^{111}$ , причому нові коефіцієнти знаходяться по тим же формулам, що і  $b_{ij}$ , тільки з врахуванням зв'язку координат симетричних вузлів:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_i^{11} = -x_i \\ y_i^{11} = y_i \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} x_i^{111} = -x_i \\ y_i^{111} = -y_i \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} x_i^{1v} = x_i \\ y_i^{1v} = -y_i \end{array} \right. .$$

З урахуванням обох видів симетрії коефіцієнти матриці  $\bar{B}$  знайдуться за формулами:

$$b_{ij} = \left\{ \begin{array}{ll} 1/(2\epsilon_0) - b_{ij}^{11} - b_{ij}^{111} + b_{ij}^{1v} & \text{при } i = j; \\ -\frac{AE}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\cos(\vec{r}_{ij}, \hat{p}_{ij}, \vec{n}_i)}{r_{ij}} - b_{ij}^{11} - b_{ij}^{111} + b_{ij}^{1v} & \text{при } i \neq j. \end{array} \right.$$

3) Аналітичні розрахунки в тих випадках, коли поверхні розмежування прийняті плоскими, виконуються шляхом зведення інтегрального рівняння до алгебраїчного. Для цього застосовується перетворення Фур'є (перехід до Фур'є-образу  $\tilde{\sigma}(u)$  невідомої функції). Далі, після розв'язання рівняння відносно  $\tilde{\sigma}(u)$  застосовують зворотне перетворення Фур'є. Подамо, для прикладу, кінцеві формули для плоскої діелектричної пластини товщиною  $2a$  між двома різноіменними лінійними зарядами. Це відповідає Рис.1а при  $h_3 \rightarrow 0$ :

$$\begin{aligned} \tilde{E}_x = & \frac{q'}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{x-1}{(x-1)^2+y^2} - \frac{x+1}{(x+1)^2+y^2} \right] + \\ & + \frac{q'}{2\pi\epsilon_0} \alpha \sum_{k=0}^{\infty} \alpha^k \left[ \frac{x-a}{|x-a|} \left( \frac{L_R + |x-a|}{(L_R + |x-a|)^2+y^2} + \frac{L_{R+1} + |x-a|}{(L_{R+1} + |x-a|)^2+y^2} \right) - \right. \\ & \left. \frac{x+a}{|x+a|} \left( \frac{L_R + |x+a|}{(L_R + |x+a|)^2+y^2} + \frac{L_{R+1} + |x+a|}{(L_{R+1} + |x+a|)^2+y^2} \right) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{E}_y = & \frac{q'}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{y}{(x-1)^2+y^2} - \frac{y}{(x+1)^2+y^2} \right] + \\ & + \frac{q'}{2\pi\epsilon_0} \alpha \sum_{k=0}^{\infty} \alpha^k \left[ \left( \frac{y}{(L_k + |x-a|)^2+y^2} + \frac{y}{(L_{k+1} + |x-a|)^2+y^2} \right) - \right. \\ & \left. \left( \frac{y}{(L_k + |x+a|)^2+y^2} + \frac{y}{(L_{k+1} + |x+a|)^2+y^2} \right) \right]; \end{aligned}$$

де  $L_k = 1 - a + k2a$ ;  $L_{k+1} = 1 + a + k2a$ ;  $\alpha = (\tilde{\epsilon}_2 - \tilde{\epsilon}_1) / (\tilde{\epsilon}_2 + \tilde{\epsilon}_1)$ .

Подібні формули на відміну від числових методів забезпечують точні результати при будь-яких значеннях своїх параметрів [9, 12].

4) *Перехід до параметрів прямої задачі* виконують по (2). Далі, враховуючи коефіцієнт розтягування області в даній точці при конформному перетворенні, переходять до напруженості поля в вихідній задачі:

$$E_w = E_z \left/ \frac{dw}{dz} \right| \quad (5)$$

Таким чином, шлях від постановки задачі до кінцевого результату виявляється досить складним. На практиці його вдається дещо скоротити, враховуючи, що найчастіше цікавить напруженість поля не в довільних точках, а саме на поверхнях розмежування середовищ. Тангенціальна складова напруженості поля  $E_\tau$  пропорційна на густині вторинного заряду в оберненій задачі. Цього факту виявляється часто достатньо для порівнювального аналізу різних видів ТТІ. Так, на Рис.5 представлені результати розрахунків поля в комбінованому тришаровому діелектрику (Рис.1). При зменшенні відносного вмісту компоненти  $h_2$  від 0.4 до 0.1 спостерігається суттєве зменшення напруженості поля поблизу краю обкладинки. При подальшому ж зменшенні вмісту цього шару область підвищеної напруженості дедалі ближче підтягується до краю обкладинки. Як бачимо, існує оптимальний вміст вказаної компоненти, при якому її вплив на пом'якшення структури поля поблизу краю обкладинки буде найсильнішим [15].

Числова реалізація запропонованої методики разом з програмами на Турбо-Паскалі детально освітлені в [2] (розділ 3.2).

У третьому розділі викладена методика діагностики ТТІ по характеристикам часткових розрядів. В залежності від можливостей експериментальної апаратури та допустимих витрат часу можна вибрати один з п'яти наступних видів діагностики ( у порядку зростання складності та інформативності).

① Порівнювальний аналіз конструкцій по одній з інтегральних характеристик ЧР - кількості імпульсів ЧР за 1 с -  $n_{\text{чр}}$ . Для забезпечення кращої відтворюваності результатів та більш достовірних висновків доводиться вибирати досить великі партії ( по 10-30 шт.) та оптимальні умови спостережень (напруга - в межах від 1.1 до 2 крат від напруги початку ЧР  $U_{\text{пчр}}$ , тривалість випробувань - 10 - 30 с, протягом яких треба встигнути зробити 10-15 вимірів  $n_{\text{чр}}$ ). При цьому досягається загальний огляд багатьох партій та умов їхнього виготовлення (див. Рис.6, подробиці про який - нижче).

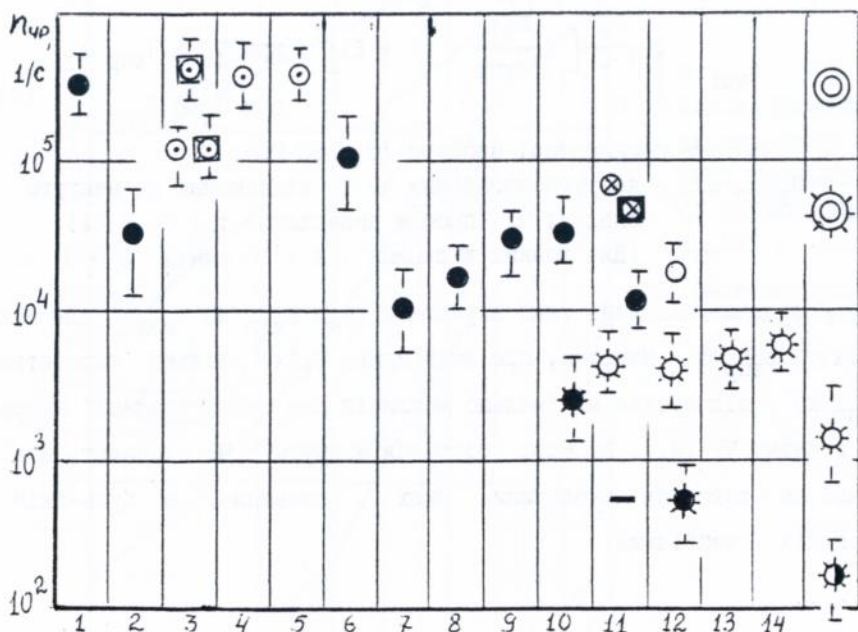


Рис.6. Вплив деяких технологічних та конструктивних факторів на частоту імпульсів ЧР  $n_{\text{чр}}$  в секціях ТТІ.

② Оцінка інтегральних параметрів повітряних краплин в ТТІ - середньої товщини ( $\bar{x}$ ), площі ( $\bar{S}_x$ ) та загальної кількості ( $N_B$ ). Для цього треба знімати залежності  $n_{\text{ЧР}}(U)$  та порівнювати їх з очікуваними. Для одержання останніх необхідне деяке математичне забезпечення - модель краплини, диференційні функції розподілу краплин по товщині [  $\varphi(x)$  ] та площі [  $\varphi(S_x)$  ].

Модель краплини базується на деяких загальних припущеннях щодо умов виникнення ЧР та їхньої інтенсивності .

1. Напряга  $U_x$  на краплині знаходиться через послідовну емнісну схему заміщення:  $U_x = U \varepsilon \cdot x / (h + (\varepsilon - 1)x)$  . Чим товща краплина, тим більша частка загальної напруги прикладена саме до неї. При  $x = h$  вся напруга  $U$  на об'єкті прикладена на краплину:  $U_x = U$  . [На Рис.7 показано ряд залежностей  $U_x(x)$  для ТТІ товщиною 60 мкм (криві 1,2,3) ].

2. Пробивна напруга краплин  $U_{\text{хпр}}(x)$  - відома (кр.4 Рис.7).

3. Частота ЧР в самотній краплині  $n_{\text{чр1}}$  зростає пропорційно прикладеній напрузі  $U_x$  :

$$n_{\text{чр1}} = \begin{cases} \frac{2f}{1-\xi} \left[ 2 \frac{U_x}{U_{\text{хпр}}} - (1 + \xi) \right] & \text{при } U_x \geq U_{\text{хпр}} ; \\ 0 & \text{при } U_x < U_{\text{хпр}} . \end{cases} \quad (6)$$

де  $f$  - частота прикладеної напруги ( $f = 50$  Гц);

$\xi = U_{\text{хпог}} / U_{\text{хпр}}$  - напруга погасання ЧР по відношенню до напруги спалаху ЧР (пробой краплини) ; ( $0 < \xi < 1$ ).

[Для тонких краплин ( $x < 10$  мкм )  $\xi \rightarrow 0$  ].

Розрядами охоплені такі краплини (від  $x_{\text{мін}}$  до  $x_{\text{мак}}$ ), для яких  $U_x(x) \geq U_{\text{хпр}}(x)$  . Напруга, при якій крива  $U_x(x)$  тільки торкається  $U_{\text{хпр}}(x)$  , відповідає мінімально можливій для даної ізоляції напрузі початку ЧР ( $U_0$ ) . По мірі зростання напруги ЧР охоплюють все менші за товщиною краплини, яких , очевидно, в будь-якій ізоляції - найбільше.

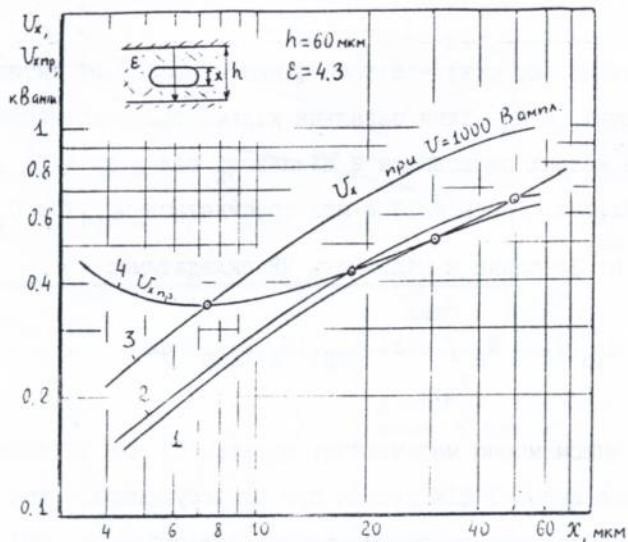


Рис.7. До визначення розмірів краплин, охоплених розрядами.

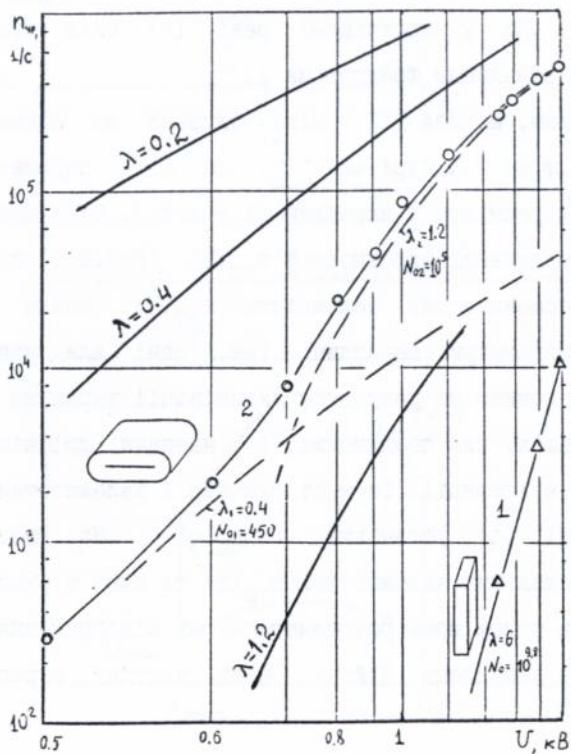


Рис.8. Знаходження середньої товщини краплин  $\bar{x} = \frac{1}{\lambda}$  по залежностям  $n_{чр}(U)$ .  
[Модельні залежності побудовані при  $N_B = 10^6$ ]

Припустімо, що  $\varphi(x)$  - відома функція розподілу активних краплин по товщині, а  $N_B$  - їхня загальна кількість. Тоді число краплин  $dN$ , товщина котрих знаходиться в діапазоні від  $x$  до  $x+dx$ , дорівнює  $dN = N_B \cdot \varphi(x) \cdot dx$ . В кожній з них трапляється  $n_{чр1}(U_x, U_{хпр})$  розрядів за 1 с. Загальна ж кількість ЧР складатиме:

$$n_{чр}(U) = N_B \cdot \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi(x) \cdot n_{чр1}(U_x, U_{хпр}) \cdot dx \quad (7)$$

Таким чином маємо математичну модель (7) для загального числа ЧР в ТТІ, яке якраз і фіксується при випробуваннях. Якщо ж в лівій частині (7) буде саме експериментальна залежність  $n_{чр}(U)$ , а  $\varphi(x)$  розглядатиметься, як невідома функція, то (7) буде являти собою так зване *інтегральне рівняння Вольтерра*. (Зауважимо, що  $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$  - залежать від  $U$ ; у протилежному разі (7) слід було б вважати інтегральним рівнянням Фредгольма).

У розділі показано, що для ТТІ  $\varphi(x)$  близька до експоненціального закону:  $\varphi(x) \approx \lambda \cdot \exp(-\lambda x)$ , де  $\lambda$  - параметр, пов'язаний з середнім розміром  $\bar{x}$  краплин ( $\lambda = 1/\bar{x}$ ). Тоді неважко знайти сімейство модельних залежностей  $n_{чр}(U)$  (Рис.8), порівнюючи з яким експериментальну залежність  $n_{чр}(U)$ , можна буде оцінити узагальнені параметри краплин. Так, дані для навитих секцій часто можна пояснити як результат активізації краплин двох видів (Рис.8) - більших, але поодиноких, і, навпаки, дрібніших, але досить поширених в ізоляції. Те ж стосується і залежностей  $n_{чр}$  від порогу чутливості ( $q$ ) установки -  $n_{чр}(q)$ . На Рис.9 показане сімейство модельних залежностей  $n_{чр}(q)$  та одна з експериментальних кривих, яка також може розглядатися, як відображення активності двох видів крапель. Дійсно, коли частину краплин

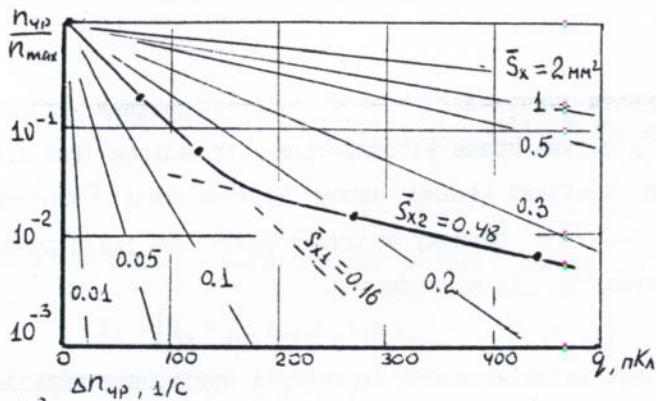


Рис.9. Знаходження середньої площі краплин  $S_x$  по залежностям  $n_{чр}(q)$ .

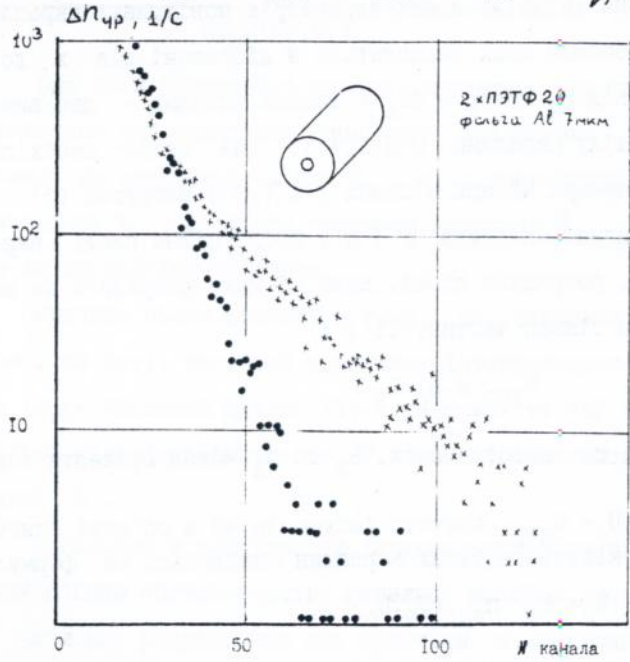


Рис.10. Амплітудні спектри ЧР до (x) і після (•) запічки при температурі 130°C

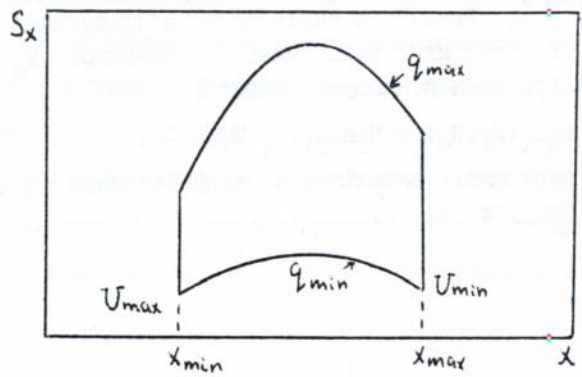


Рис.11. Вікно параметрів краплин, які можна встановити по результатам обстежень часткових розрядів

вдається ліквідувати (наприклад, шляхом термоскорочення плівки), то залежність  $n_{\text{чр}}(q)$  вже краще узгоджується з модельною (Рис.10).

Цікаво, що знайдені таким чином узагальнені показники вкраплин не суперечать по порядку величини фактичним їхнім розмірам, які вдається розглядити під мікроскопом.

③ Знаходження індивідуальних параметрів повітряних вкраплин - числа  $N_x$  таких, товщина яких знаходиться в діапазоні від  $x$  до  $x+dx$ , а площа - від  $S_x$  до  $S_x + dS_x$  [іншими словами - двохвимірної функції розподілу вкраплин  $\varphi(x, S_x)$ ]. Для цього необхідно мати *амплітудні спектри* ЧР при кількох (5 ÷ 8) напругах [5]. Приймається, що уявна амплітуда ЧР ( $q$ ) пропорційна площі вкраплини  $S_x$  (точніше, розрядній площі, адже ЧР може розрядити не всю площу вкраплини, а тільки частину її):

$$q = \frac{U_{\text{хпр}} \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S_x}{h - x} \quad (8)$$

Здавалося б, що знаходження  $x$ ,  $S_x$  та  $N_x$  можна провести таким чином.

1) Хай при  $U = U_0 = U_{\text{нчр}}$  частота імпульсів ЧР в об'єкті сягала  $F_0$ . Тоді загальна кількість таких вкраплин знайдеться за формулою:

$$N_0 = F_0 / n_{\text{чр1}}(U_0, U_0)$$

2) Після підвищення напруги до  $U_1$  ЧР-и охоплюють нові вкраплини товщиною  $x > x_1$  (Рис.7), а окрім того збільшується також частота ЧР і в "старих" вкраплинах (товщиною  $x_0$ ). Загальне число ЧР-ів при даній напрузі стане:

$$F_1 = N_0 n_{\text{чр1}}(U_1, U_0) + N_1 n_{\text{чр1}}(U_1, U_1)$$

де  $N_1$  - число нових вкраплин, активізація яких сталася при черговому підвищенні напруги до  $U_1$ .

3) На 1-му ступені випробувальної напруги матимемо:

$$F_1 = N_0 n_{\text{чр1}}(U_1, U_0) + N_1 n_{\text{чр1}}(U_1, U_1) + \dots + N_1 n_{\text{чр1}}(U_1, U_1), \quad (9)$$

звідки знаходиться загальна рекурентна формула для  $N_1$

$$N_1 = \frac{F_1 - [N_0 n_{\text{чр1}}(U_1, U_0) + N_1 n_{\text{чр1}}(U_1, U_1) + \dots]}{n_{\text{чр1}}(U_1, U_1)}$$

При всій прозорості такого алгоритму насправді він виявляється недієздатним: випадкове збільшення величини  $F_1$  призведе до завищеної оцінки  $N_1$ ; це в свою чергу зумовить занижену оцінку  $N_2$ , що дасть завищену величину  $N_3$  і т.д. Похибка може лавиноподібно зростати.

Причина цього полягає в тому, що вказаний алгоритм являє собою, по суті, числовий розв'язок інтегрального рівняння (7), адже (9) - числовий аналог (7) і визначає ту ж саму величину - загальну кількість імпульсів ЧР, які спостерігаються при заданій напрузі  $U$ .

Загальною ж властивістю інтегральних рівнянь першого роду є їхня погана обумовленість: невеликі похибки, що виникають під час числових розрахунків або криються в вихідних даних, мають схильність швидко зростати, внаслідок чого рішення втрачає всякий сенс. Це результат інтегруючих властивостей оператора (7): якщо замість істинної функції (яка, звичайно, мусить бути досить плавною) в (7) підставити сильно осцилюючу функцію, то величина інтегралу може майже не змінитися. Інакше: рівняння, подібні (7), "не відчують" можливих відхилень від "справжньої" функції, які можуть виникати під час числового розв'язання задачі.

Розв'язанню некоректних задач відновлення образу джерела сигналу по полю спостережень присвячено ряд фундаментальних досліджень академіків Лаврентьєва М.М., Тихонова А.Н. та ін. Відомі числові методи для геофізики, астрофізики, медичинської томографії, тощо. Що ж стосується вказаної задачі, то тут краще скористатися спеціалізованим алгоритмом, який витікає з аналітичного розв'язання (7) відносно невідомої функції [21]. Для цього запишемо (7) в дещо модифікованому виді - через функцію розподілу вкраплин по величинам напруг виникнення ЧР  $\psi(U)$  :

$$n_{\text{чр}}(U) = N_B \cdot \int_{U_0}^U \psi(U) \cdot n_{\text{чр1}}(U_x, U_{\text{хпр}}) \cdot dx \quad , \quad (10)$$

де зв'язок між двома функціями визначається рівнянням

$$\varphi(x) \cdot dx = \psi(U) \cdot dU \quad ;$$

(  $U$  - напруга, при якій активізуються вкраплини товщиною  $x$  ).

Підставляючи (6) в (8), після подвійного диференціювання приходимо до задачі Коші :

$$(1-\xi) \cdot \frac{d\psi}{dU} + \frac{2}{U} \psi = A \cdot \frac{d^2 F(U)}{dU^2} \quad , \quad (11)$$

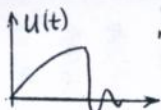
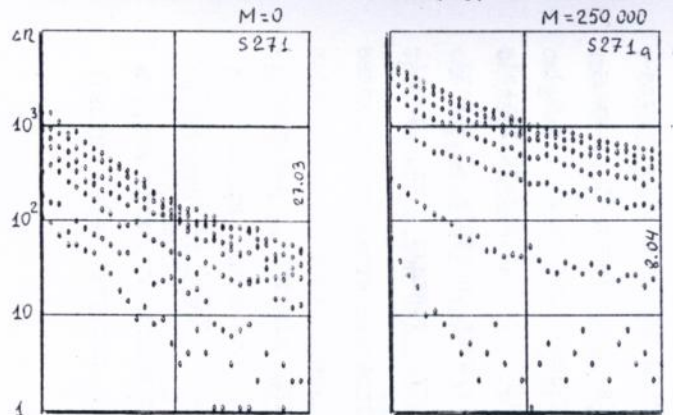
де  $A = (1-\xi)/(2fN_B)$  ;  $F(U) = n_{\text{чр}}(U)$  .

Розв'язання її відносно функції  $\psi(U)$  має вигляд [19,20]:

$$\begin{aligned} 2fN_B \psi(U) = & \left[ \frac{dF(U)}{dU} - \frac{dF(U_0)}{dU} \left( \frac{U_0}{U} \right)^{2/(1-\xi)} \right] - \\ & - \left[ \frac{2F(U)}{(1-\xi)U} - \frac{2F(U_0)}{(1-\xi)U_0} \left( \frac{U_0}{U} \right)^{2/(1-\xi)} \right] + \\ & + \frac{2(1+\xi)}{(1-\xi)^2 U^{2/(1-\xi)}} \int U_k^{2\xi/(1-\xi)} \cdot F(U_k) \cdot dU_k \quad . \quad (12) \end{aligned}$$

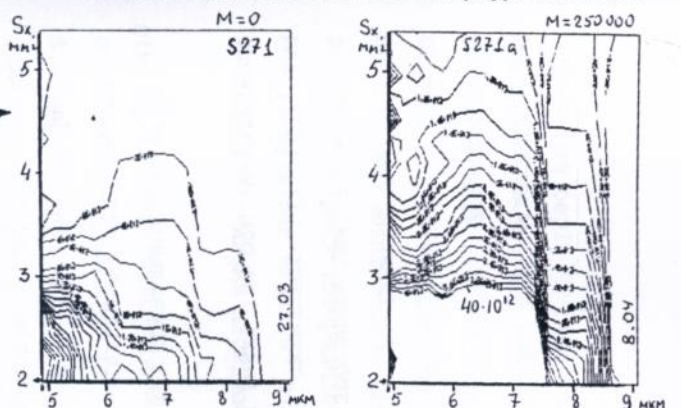
Тут перша складова визначає загальний приріст частоти ЧР при збільшенні напруги на 1 В, обумовлений як "старими" вкраплинами, що були охоплені розрядами раніше, так і "новими" вкраплинами, розряди в яких почалися при черговому зростанні напруги на  $dU = 1$  В. Дві інші складові визначають приріст  $F(U)$ , обумовлений тільки "старими" вкраплинами. Тоді різниця між першою складовою та двома останніми визначає саме вклад "нових" вкраплин. Частота ЧР в кожній з них дорівнює  $2f$ , що і враховується в лівій частині (12).

Изменение характеристик ЧР в ходе ресурсных испытаний

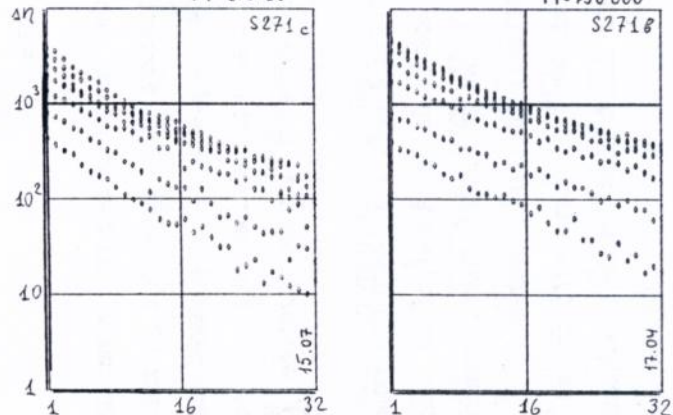


$U = 2.8 \text{ кВ}$   
 $F = 40 \text{ кГц}$   
 $f = 5 \text{ Гц}$   
 $\Delta = 2.6$

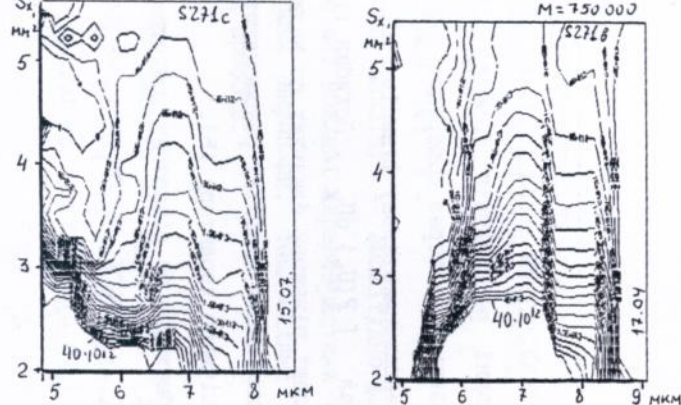
Изменение параметров включений в ходе ресурсных испытаний



$M = 1.5 \cdot 10^6$



$M = 4.5 \cdot 10^6$



а)

б)

Рис.12. Амплитудные спектры импульсов ЧР (а) та результаты їхньої інтерпретації (б) по (12).

Аналітичний вираз (12) для  $\phi(U)$  не має тих недоліків, які притаманні рекурентній формулі (9). Поточна величина  $\phi(U)$  визначається не через попередні значення цієї функції, а тільки через експериментальну функцію  $F(U)$ , її похідну  $dF(U)/dU$  та інтеграл  $\int F(U_k) dU_k$ . Похибки (12) зростають при  $\xi \rightarrow 1$  і обумовлені різницею близьких по величині складових (12) [20]. Для подолання цього недоліку рекомендуються деякі засоби методичного та технічного характеру [5].

Обмеження по діапазону допустимих випробувальних напруг ( $U_{\min}$  -  $U_{\max}$ ), порогу чутливості експериментального устаткування ( $q_{\min}$ ) та динамічному діапазону аналізатора ( $n_{\max}$ ,  $q_{\max}$ ) призводять до того, що область параметрів краплин, які знаходяться по характеристикам ЧР, має вигляд вікна (Рис.11). Ліва та права рамки вікна визначаються напругами  $U_{\max}$  та  $U_{\min}$ , а нижня та верхня - відповідно  $q_{\min}$  та  $q_{\max}$ . На основі (12) розроблено алгоритм аналізу характеристик ЧР і програма SPDV. На вхід програми подаються: таблиця амплітудних спектрів ЧР та умови її отримання. На виході буде відтворена емпірична функція розподілу  $\phi(x, S_x)$ . На Рис.12 приведені початкові (вихідні) дані та результати їхньої розшифровки, з яких видно, що зміни амплітудних спектрів ЧР в ході ресурсних випробувань є наслідком росту товщини та площі повітряних краплин, які були в секції ТТІ.

④ Фазовий аналіз дозволяє оцінити кінетику релаксації зарядів, що утворюються під час ЧР. Ознаками прискореної швидкості релаксації поверхневих зарядів являються: виникнення початкових ЧР в моменти часу, близькі до моментів переходу напруги через максимум (на 5-й мс після переходу напруги через нуль);

завершення серії ЧР протягом одного полуперіоду після 5-ї мс (рахуючи від моменту переходу напруги через нуль). Фазовий аналіз дозволяє також зробити деякі висновки щодо параметра  $\xi$  (останнє важливе для коректного застосування (6) ) .

Якісно новий рівень фазового аналізу - амплітудно-фазовий. Він дає вичерпну інформацію про всі можливі характеристики ЧР, які можуть бути пов'язані з розмірами краплин, тенденціями їхньої еволюції, вісниками передчасних пробів.

⑤ Довготривалі спостереження частоти ЧР  $n_{\text{чр}}$  з подальшим спектральним аналізом часових рядів (Рис.13). Виділяють дві компоненти таких рядів: білошумову ( $Wt$ ) та флікер-компоненту ( $Fl$ ) (Рис.14). В системі координат ( $Wt, Fl$ ) кожному часовому ряду відповідає одна крапка, розташування якої пов'язане з якістю зразка. Флікер-компонента обумовлена кумулятивними явищами в ізоляції ( накопиченням об'ємних зарядів, збільшенням тиску газів у краплинах, змінами поверхневої електропровідності, старінням ізоляції). Вона є прикметою зміни властивостей об'єкта під впливом сильного поля, що в випадку ТТІ розцінюється, як негативне явище. Флікер-компонента є причиною того, що існує оптимальна тривалість спостережень ЧР (Рис.15), коротше якої коефіцієнт варіації зростає внаслідок недостатньої кількості даних, а довше якої - внаслідок процесів взаємодії ЧР і поверхні краплини. Оптимальною слід вважати таку тривалість спостережень, при якій внески білошумової та флікер-компонент майже рівноцінні :  $\tau_H \cong T / K_O$  .

[Експрес-аналіз стану ТТІ по  $n_{\text{чр}}$ , згаданий вище, виконувався, як бачимо при умовах, досить наближених до оптимальних ] .

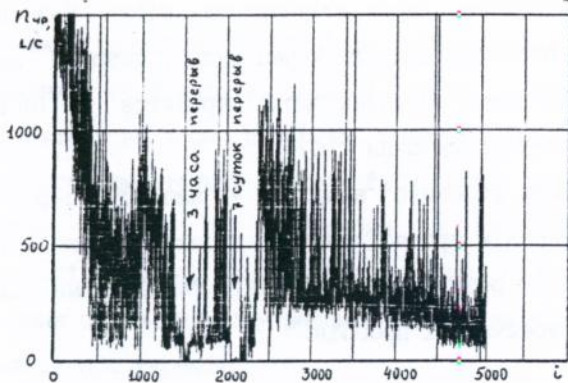


Рис.13. Типові результати тривалих спостережень ЧР (часовий ряд).

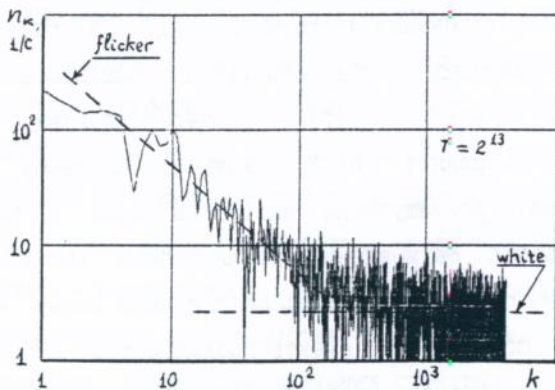


Рис.14. Амплітудний спектр часового ряду спостережень ЧР по Рис.13.

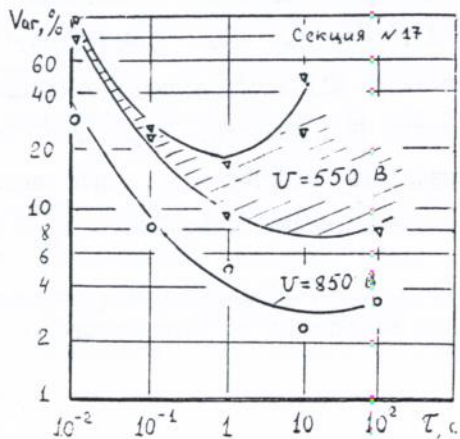


Рис.15. Вплив тривалості спостережень ЧР на відносну похибку середнього  $\bar{n}_{чр}$

В четвертому розділі розглянуті основні фізичні процеси технології виготовлення ТТІ : теоретичне та експериментальне обґрунтування режимів просякнення, полімеризації, дослідження причин дефектоутворення. Діагностика секцій по характеристикам ЧР (Рис.6) показала високу чутливість до будь-яких варіацій параметрів технологічного процесу. Причинами дефектів в ТТІ можуть бути: недопросякнення секцій (див.1 і 2), проникнення стиснутого повітря в середину секцій (під час видалення надлишків компаунду з просякнучого котла) - див.☉:☐ N 3, зволоження вакуумного масла і зменшення внаслідок цього якості сушіння секцій (див. 6 і 7), будь-яка деформація просякнутих секцій (чи під час перенесення їх в струбіцини, чи внаслідок пресування) - див.☀ та ☀ з N 12. Ефективними засобами запобігання утворенню краплин являються: просякнення секцій в струбіцинах (див.☀ та ☀ з N 12), полімеризація в середовищі інертної рідини (див.● та ☀ з N 10 або ○ та ☀ з N 12), в автоклаві ( див. ⊗ та ⊠ з N 11) зменшення товщини навитих секцій (див.☀ та ☀ з N 15) або застосування плоскошхтованої конструкції ( — з N 11). Високий рівень ЧР в циліндричних секціях ( ⊗ з N 11 та ⊙ з N 15 ) пов'язаний зі слабким допустимим натягом сльодопаперових стрічок, внаслідок чого щільність секцій виявляється недостатньо високою.

Причини дефектів іншої природи помітили випадково по кольоровим смугам в центрі недопросякнених секцій (Рис.16). Світло-жовта смуга на фронті просякнення асоціювалася з одним із компонентів компаунду - лінетолом. Здавалося, що маємо класичне явище *хроматографічного розшарування* компаунду на складові. Спеціальні дослідження [22,23] підтвердили це припущення, яке досі не висвітлювалося в літературі по просякненню ізоляції. Стало зрозуміло, чому  $t_{gb}$  просякнutoї ТТІ виявляється в 2-4 рази вищий, ніж

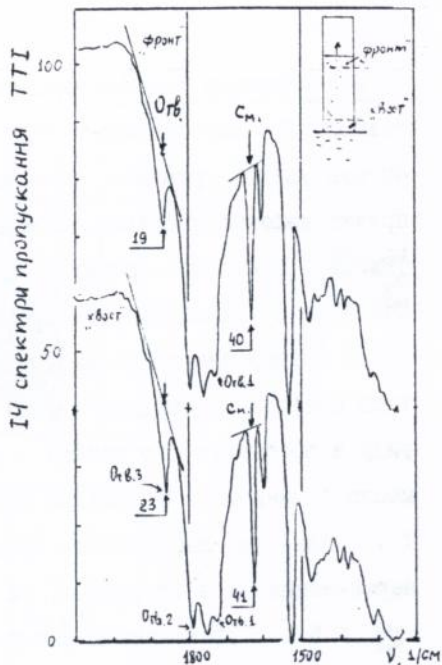
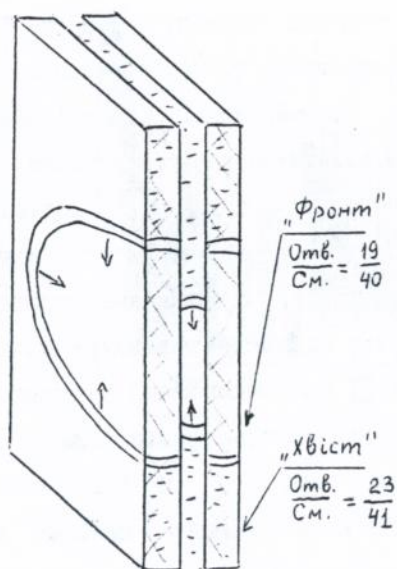


Рис.16. Схема просякнення ТТІ та якісне зображення прифронтової смуги після форсування процесу шляхом підвищення тиску в котлі.

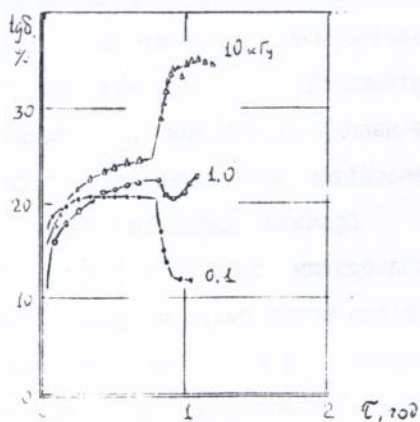
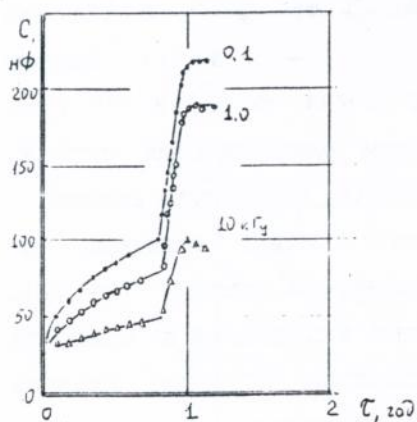


Рис.17. Залежності ємності (С) і тангенсу кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ ) від часу вакуум-тискогнітного просякнення ТТІ .

можно було б очікувати, спираючись на відомі властивості компаунду у вільному просторі та  $tg\delta$  чистого слюдапаперу; в чому полягає причина аномалій в залежностях  $tg\delta(\tau)$ , що спостерігаються під час вакуум-тискогнітного просякнення секцій (Рис.17) [випереджаюче зростання  $tg\delta$  на початку просякнення - результат селективної адсорбції затверджувача; повільне зменшення  $tg\delta$  в середині процесу - наслідок скорочення смуги фронту просякнення; стрибкоподібне незворотне зменшення  $tg\delta$  наприкінці процесу - результат відриву фронтальних зон в щілинах між стрічками слюдапаперу і в товщині останнього]; яким чином можна досягти більш рівномірного розподілу компонентів компаунду по всій довжині смуги просякнення. Пряме підтвердження хроматографічних явищ досягнуто методами ІЧ-спектроскопії. Математичне моделювання цього явища дало можливість обґрунтувати найкращі засоби для його пригнічення: зменшення щільності секцій перед просякненням, збільшення темпу просякнення, завчасна термостабілізація компаунду перед просякненням. Важлива роль в моделюванні належить розгорнутій схемі заміщення слядомісткої ТТІ (Рис.18). Параметри останньої знаходилися за допомогою кінетичних кривих полімеризації просякнутих секцій (Рис.19). Це дало змогу між іншим знайти один з якісних показників слюдапаперу - ступінь перекриття лусок сльуди.

У розділі виконано також аналіз продовжжого та поперечного просякнення багат шарової пористої ізоляції. Відхилення від встановлених закономірностей (Рис.20) вказують на розбіжності температур компаунду та секцій (крива 5), електростатичне ущільнення секцій (крива 4), тощо. Таким чином відомі засоби контролю доповнюються побічними показниками якості просякнення.

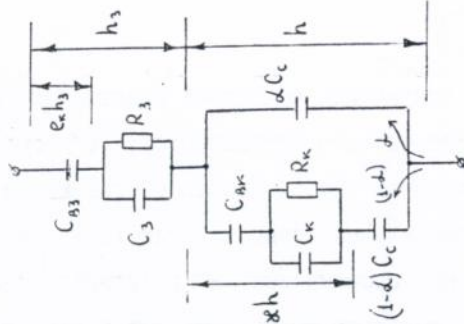


Рис.18. Схема заміщення слюдомісткої ТТІ, просякнutoї компаундом

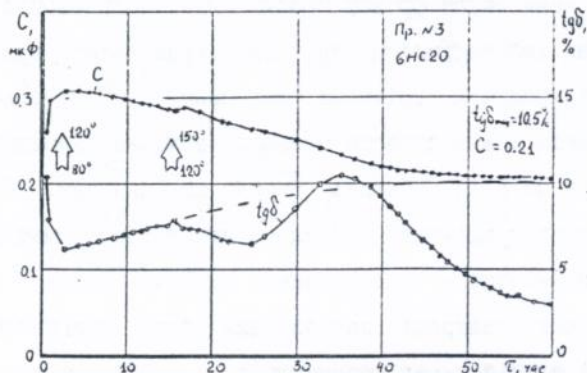


Рис.19. Криві кінетики полімеризації просякнutoї ТТІ

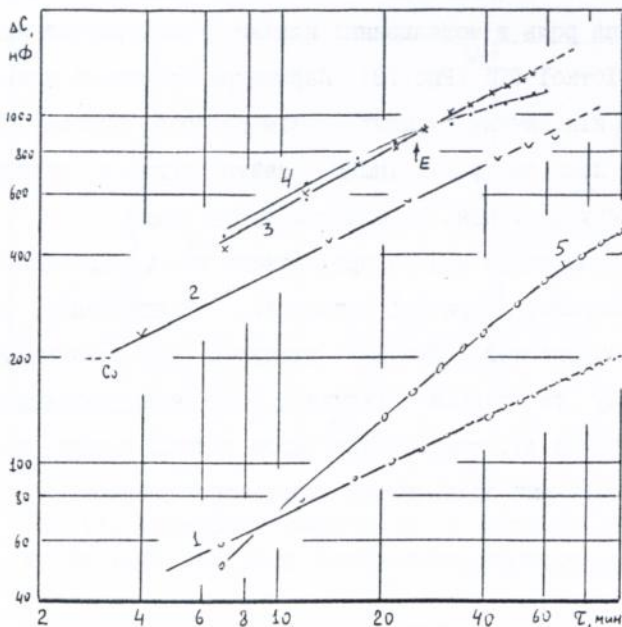


Рис.20. Криві кінетики просякнення ТТІ

- 1- плоскошхтована секція БНС20;
- 2- група (4 шт) секцій типу БНС20;
- 3- група (4 шт) секцій типу ЗНС20;
- 4- те ж, що й 3, тільки з напругою 400 В (момент прикладення напруги позначено Е).

### Основні результати та висновки по роботі.

1. Всі рекомендації та висновки по роботі присвячені, по-суті, вирішенню однієї глобальної проблеми створення високоякісної твердої тонкошарової ізоляції: *забезпечення її однорідності*. Для цього необхідно:

по-перше, забезпечити досягнення найбільш рівномірного розподілу *напруженості поля* ( для чого в більшості випадків досить обмежитись секціонуванням ізоляції на шари товщиною 60-100 мкм , застосовувати комбінований діелектрик з вмістом компонентів, близьким до оптимального, "м'які" обкладинки з закраїною, допоміжні електроди).

по-друге, попередити виникненню *мікронеоднорідностей* - повітряних краплин ( шляхом виконання ряду вимог конструктивного та технологічного характеру, наведених вище);

по-третє, вести цілеспрямоване пригнічення *мікронеоднорідностей* ( що спричиняються хроматографічними явищами при просякненні).

2. Спеціалізована методика розрахунків електростатичних полів поблизу країв електродів дає змогу точного аналізу всіх основних конструктивних чинників, за допомогою яких можна досягти певного ослаблення концентрації поля. Для цього достатньо знайти густину поверхневого заряду  $\tilde{\sigma}$  в оберненій ( дуальній ) моделі для розрахунку поля, яка виявляється прямо пропорційною дотичній складовій напруженості поля  $E_{\tau}$  .

3. Стеження за *мікроефектами* в ТТІ можливе шляхом спостереження явищ сильного поля - часткових розрядів. При цьому:

- а) частота ЧР  $n_{\text{ЧР}}$  - кількісний показчик *порівнювальних* якостей різних вибірок;
- б) залежності  $n_{\text{ЧР}}(U)$  та  $n_{\text{ЧР}}(q)$  містять в собі інформацію про *інтегральні* показники активних краплин (загальне число, середню товщину та розрядну площу);
- в) амплітудні спектри ЧР, одержані при напругах до  $2U_{\text{ПЧР}}$ , дають змогу знайти функції розподілу краплин по характеристикам ЧР  $\phi(U, q)$  та по геометричним параметрам  $\phi(x, S_x)$ ;
- г) фазові спектри ЧР дають змогу оцінити кінетику релаксації

поверхневих зарядів та напругу погасання ЧР.

4. Стеження за утворенням *микродефектів* в ТТІ можливе по побічним прикметам - характерним змінам  $tg\delta$  під час вакуум-тискогнітного просякнення ізоляції. В ідеальному випадку повинен бути *монотонний* характер залежності  $tg\delta(\tau)$  [при частоті 0.1 кГц ].

5. Специфічними (тільки для тонкошарової ізоляції) являються теоретичні розробки по краєвим ефектам. Математичні засади діагностики є досить загальними і можуть бути перенесені на інші види ізоляції, не розглянуті в роботі: електричних машин, кабелів, ввідів, трансформаторів. [Особливості цих об'єктів полягають в значно складніших засобах виявлення сигналів ЧР на фоні шумів].

Не мають також принципових обмежень результати досліджень кінетики просякнення та полімеризації, хоча вони й одержані на тонкошаровій ізоляції з фольговими обкладинками (які були бар'єром на шляху руху компаунду в глибину секцій ). Спеціальні досліді показали, що розшарування компаунду на компоненти відбувається і в разі поперечного просякнення. Звідси зроблено висновок про можливість подібних явищ і в інших системах ізоляції.

#### Список головних публікацій.

1. Набока Б.Г. Твердая тонкослойная изоляция: контроль технологии изготовления и диагностика качества.-Х.: Основа, 1996.-180 с.
2. Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике.-К.: ИСИО, 1995, 120 с.
3. Справочник по расчету режимов работы электрических конденсаторов./Мезенин О.Н., Гураевский М.Н., Конотоп В.В., Набока Б.Г. - К.: Техніка, 1987, 168 с.
4. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Методика изменений дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов./ Электричество, N11, 1990, с.71-73.
5. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Диагностика высоковольтной изоляции с помощью многоканальных анализаторов./ Электричество, N5, 1991, с.5-9.

6. Набока Б.Г., Исачкова В.Я. Контроль запечки пленочных конденсаторов по характеристикам ЧР.- В сб. "Новые разработки в области электрической изоляции", Л., Энергоатомиздат, 1991, с32-33.
7. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Измерение акустических шумов и тепловыделений при испытаниях высоковольтной изоляции.- там же, с.33-35.
8. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Методика диагностики терморезистивной изоляции по характеристикам импульсов ЧР.- В сб. Вестн.ХПИ "Электроэнерг.и авт. энергоустановок", 1987 вып.14, N 243.
9. Набока Б.Г. Электрическое поле на краю обкладки конденсатора при нелинейной конфигурации границы раздела сред./ Электричество, N 2, 1978, с.72-74.
10. Набока Б.Г. Электрическое поле на краю обкладки в изоляции конденсаторного типа.- В сб. Вестн.ХПИ "Электроэнерг. и автоматизация энергоустановок", вып.6, N 143, 1978, с.81-86.
11. Набока Б.Г. Асимптотики плоских электростатических полей диэлектрических клиньев с общей вершиной./ Изв.вузов, Электромеханика, N 11, 1980, с.1125-1128.
12. Набока Б.Г., Михайлусь Ю.В., Гладченко В.Я. Частичные разряды по поверхности твердого конденсаторного диэлектрика.-В сб. Вестн. ХПИ "Электроэнерг. и автомат. энергоустановок", вып.6, N 143, 1978, с.78-81.
13. Бондарук П.А., Самойленко Б.Ф., Набока Б.Г. и др. Определение размеров электростатического экрана индуктосина. /АН Латв.ССР, Сер. физ. и техн. наук, N 3, 1989, с.92-96.
14. АС СССР N 1577524, G 01R 31/14, з.31.05.88. Способ неразрушающего контроля высоковольтных конденсаторов с твердым диэлектриком./Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я.
15. АС СССР N 900329, H 01g 4/20, оп. 23.01.82. Конденсаторная секция с комбинированным диэлектриком./ Михайлусь Ю.В.,Набока Б.Г.
16. АС СССР N 1355023, H 01g 1/13, з.13.03.86 N4036718. Способ изготовления высоковольтного конденсатора с твердым диэлектриком./ Гладченко В.Я., Набока Б.Г., Михайлусь Ю.В. и др.
17. АС СССР N 1400449, з. 6.08.85. N3941674. Высоковольтный электродинамический излучатель./ Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я., Гурин А.Г., Набока Б.Г.
18. Набока Б.Г., Бирке И. Математическое моделирование системы

- диагностики конденсаторов по характеристикам частичных разрядов.- Деп. в УкрНИИТИ, 869Ук., 1985, 47 с.
19. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Математические модели характеристик импульсов частичных разрядов в твердом диэлектрике.- Деп. в УкрНИИТИ, часть I, N 369 Ук, 1986, 40 с.
20. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Математические модели характеристик импульсов частичных разрядов в твердом диэлектрике.- Деп. в УкрНИИТИ, часть II, N 1039 Ук, 1986, 45 с.
21. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В. Восстановление функции распределения воздушных включений в твердой изоляции по характеристикам импульсов частичных разрядов.- Деп. в Укр.НИИТИ, N 233 Ук., 1985, 35 с.
22. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Аль Бишти Абдель Насир. Анализ структуры слюдосодержащей изоляции по  $C-tg\delta$  диаграмме процесса полимеризации.- В сб. Тез.докл. Российской н.-т. конф. по физике диэлектриков с междунар. участием. "Диэлектрики-93", С.-П., 1993, ч.1, с. 168-169.
23. Набока Б.Г., Аль Бишти Абдель Насир. Математическое моделирование процессов хроматографического разделения компаунда в ходе пропитки слоистой изоляции.- В сб. Тез.докл. междунар. н.-т. конф. "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье", Харьков-Мишкольц, 1993, с.131-132.
24. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Чан Ки Фук. Измерение и интерпретация амплитудно-фазовых спектров импульсов ЧР. В сб. "Создание компл. электротехн. оборуд-я".Тез.докл.Всес.н.-т.конф.М.1989 г.
25. Набока Б.Г. Математичні засади аналізу стану ізоляції за імпульсами часткових розрядів.- Тизи 1-ї Міжнар. н.-т. конф. "Математичне моделювання в електротехніці й енергетиці", Львів, 1995, с.65-66.

Особистий внесок автора в наведених публікаціях:

[1,9-11,25,2]- цілком авторські праці; [3] - спектральний метод розрахунку потужності теплотворення; [13]- аналіз краєвих ефектів; [4-8,12] - мета досліджень, теоретичний аналіз, участь в еспериментальній роботі; [13] - розрахунок поля; [14-17] - ідея винаходу, участь в її перевірці; [18-21] - теоретична робота, участь в розробках алгоритмів; [22-24] - схема заміщення, програми для ПЕОМ.

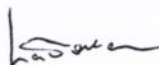
Naboka B.G. High Voltage Solid Thin-Layer Insulation : the theoretical bases of projection, manufacture technology and diagnoses. The thesis (manuscript) for a doctor's degree of technical sciences, speciality 05.09.13 - strong electrical and magnetic field technic. Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1997.

It is defended the 40 scientific works ( among them 6 items are self-made, 5 author's copyrights) in with the problems of creation of solid thin-layer insulation (STI) are presented, deals with her homogenous (decreasing micro- and macro- voids, reducing field concentration). The causes of void appearances during STI manufacture are found and non-direct methods to control them are presented : by impregnation and polymerisation rate, partial discharges (PD) pulse analyses. PD pulse analyses include: PD frequency , their dependence on voltage, magnitude- and phase-analyses, runtime PD trand.

Набока Б.Г. Высоковольтная твердая тонкослойная изоляция: теоретические основы разработки, технологии изготовления и диагностики. Диссертация (рукопись) на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.13 - техника сильных электрических и магнитных полей. Харьковский государственный политехнический университет. Харьков, 1997 .

Защищается 40 научных работ (в том числе 6 лично авторских , среди которых - монография, учебник; 5 авторских свидетельств), в которых изложены проблемы создания *твердой тонкослойной изоляции* (ТТИ), связанные с обеспечением ее *однородности* (уменьшением размеров микро- и макро- дефектов, ослаблением концентрации поля). Установлены *причины образования дефектов* в ходе изготовления ТТИ, предложены *косвенные методы их контроля*: по кинетике пропитки и полимеризации, по характеристикам импульсов частичных разрядов (ЧР). *Диагностика по ЧР* детализирована по уровням: частота ЧР, зависимости ее от напряженности, амплитудные и фазовые спектры ЧР, медленные флуктуации ЧР.

Ключові слова: *тверда тонкошарова ізоляція, причини дефектоутворень, побічні методи контролю, діагностика по імпульсам часткових розрядів.*





Підписано до друку 30.01.97.  
Замовлення 1091 . Тираж 120 прим.

---

Надруковано на ротاپринті Харківського тракторного заводу  
ім. С.Орджонікідзе. 310007, Харків, пр.Московський, 225, ХТЗ,  
Ротاپрінт.

AB 37.011