

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для самостійної роботи та виконання розрахунково-графічних і
практичних завдань з курсу

«ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ»

Розділ

«ДІЕЛЕКТРИКИ»

*(для студентів 2 курсу денної і заочної форм навчання бакалаврів напряму
підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології і слухачів другої
вищої освіти спеціальності 7.05070103 – Електротехнічні системи
електроспоживання (за видами))*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2016

Методичні вказівки для самостійної роботи та виконання розрахунково-графічних і практичних завдань з курсу «Електротехнічні матеріали». Розділ «ДЕЛЕКТРИКИ» (для студентів 2 курсу денної і заочної форм навчання бакалаврів напряму підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології і слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання (за видами)) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. Є. Д. Дьяков, В. Г. Воропай. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 41 с.

Укладачі: канд. техн. наук Є. Д. Дьяков
В. Г. Воропай

Рецензент: В. М. Охріменко, кандидат технічних наук, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова.

Рекомендовано кафедрою систем електропостачання та електроспоживання міст, протокол № 10 від 14.04.2016 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1. Поляризація діелектриків.....	4
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2. Електропровідність діелектриків.....	14
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3. Діелектричні втрати.....	22
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4. Пробій діелектриків.....	28
СПИСОК ДЖЕРЕЛ.....	39
Додаток А.....	40

ВСТУП

У методичних вказівках представлені розрахунково-практичні заняття з дисципліни «Електротехнічні матеріали». Кожне заняття містить:

- мету заняття;
- пояснення до заняття;
- завдання для самостійної роботи студентів;
- контрольні питання;

У ході виконання практичних завдань студенти повинні вивчити: основні фізичні процеси, що відбуваються в діелектричних матеріалах, основні параметри, які характеризують дані процеси і методику їх розрахунку. Довідкові матеріали, які доцільно використовувати при виконанні контрольних завдань, наведені в додатку А.

Теоретичні положення, що наведені в методичних вказівках, охоплюють той мінімальний обсяг матеріалу, який необхідний для підготовки до практичних занять.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1

Поляризація діелектриків

Мета заняття: закріплення теоретичних знань про механізми поляризації діелектриків в електричному полі та набуття практичних навичок розрахунку параметрів діелектриків, що характеризують процес поляризації.

Основною властивістю діелектриків є здатність до поляризації під дією прикладеної напруги. Процес поляризації являє собою зміну розташування в просторі часток діелектрика, що мають електричні заряди. Елементарні диполі, що представляють зв'язані й невіддільні один від одного молекули діелектрика, позитивні й негативні заряди яких зміщені один відносно другого, характеризуються електричним моментом p :

$$p = q l, \quad (1.1)$$

де q – заряд диполя; l – відстань між зарядами.

Під дію електричного поля диполі починають орієнтуватися в просторі і створюють сумарний момент. Такий момент, віднесений до одиниці об'єму діелектрика, називається поляризованістю діелектрика \mathbf{P}

$$\mathbf{P} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum^n p}{V}, \quad (1.2)$$

де V – об'єм діелектрика

Залежність поляризованості \mathbf{P} від напруженості електричного поля \mathbf{E} в діелектрику для більшості діелектриків має лінійний характер. При малих значеннях напруженості поля для ізотропних діелектриків можна записати

$$P = \chi \varepsilon_0 E = \alpha E, \quad (1.3)$$

де χ – діелектрична сприйнятливість діелектрика, яка зв'язана з відносною діелектричною проникністю діелектрика співвідношенням $\varepsilon_r = 1 + \chi$;

α – абсолютна діелектрична сприйнятливість чи питома поляризованість.

Особливу групу складають сегнетоелектрики, електрети, а також деякі іонні кристали, для яких зв'язок між P і E нелінійний і залежить від попереднього значення E .

Зсув зарядів у діелектрику приводить до утворення внутрішнього поля, спрямованого протилежно зовнішньому, що може бути представлено вектором електричного зсуву D .

$$D = \varepsilon_r \varepsilon_0 E = \varepsilon_0 E(1 + \chi) = \varepsilon_0 E + P, \quad (1.4)$$

де ε_0 – електрична постійна, рівна $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Перший доданок у цьому виразі пропорційний розподіленій щільності заряду, утвореного у вакуумі, а другий залежить від ступеня поляризації діелектрика.

Кожний діелектрик з нанесеними на нього електродами, включений в електричну мережу, можна розглядати як конденсатор певної ємності (рис. 1).

Заряд такого конденсатора Q дорівнює

$$Q = C U, \quad (1.5)$$

де C – ємність конденсатора, U – прикладена напруга.

Коли між пластинами конденсатора знаходиться вакуум, при підключенні постійної напруги, на його обкладках утворюються заряди протилежних знаків $+Q_0$ і $-Q_0$ (рис.1, а).

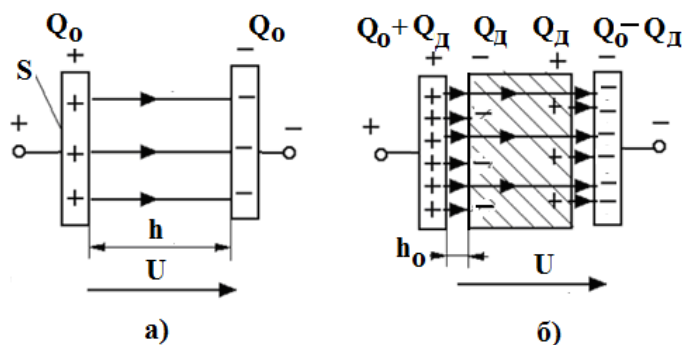


Рисунок 1.1 – Електричне поле у вакуумному конденсаторі (а) і у конденсаторі з діелектриком (б)

Величина цих зарядів пов'язана з ємністю конденсатора співвідношенням:

$$Q_0 = C_0 \cdot U = \frac{\epsilon_0 S}{h} U, \quad (1.6)$$

де C_0 – ємність конденсатора, коли між його пластинами знаходиться вакуум;

S - площа пластин конденсатора, m^2 ;

h - відстань між обкладками конденсатора, m ;

ϵ_0 - електрична постійна, рівна $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м}$.

Величина напруженості електричного поля, яке буде діяти між обкладинками конденсатора, дорівнює $E = U/h$.

Тоді заряд на обкладинках конденсатора можна представити у вигляді

$$Q_0 = \epsilon_0 \cdot S \cdot E \quad (1.7)$$

Поверхнева щільність зарядів буде дорівнювати:

$$\sigma = \frac{Q_0}{S} = \epsilon_0 E \quad (1.8)$$

Якщо між обкладками конденсатора розмістити діелектрик, то пов'язані заряди, що знаходяться в ньому зміщуються в напрямку діючих на них сил елект-

ричного поля (рис. 1,б). При цьому на поверхні, зверненої до позитивного електроду утворюється негативний заряд, а на поверхні, зверненої до негативного електроду - позитивний заряд. Наявність цих зарядів на поверхнях діелектрика призводить до того, що на обкладках конденсатора з'являється додатковий заряд Q_d , рівний заряду на поверхні діелектрика. Заряд конденсатора стає рівним

$$Q = Q_o + Q_d \quad (1.9)$$

Здатність діелектрика утворювати ємність можна оцінити за допомогою параметра відносної діелектричної проникності ϵ_r , що представляє відношення заряду Q , отриманого при деякій напрузі на конденсаторі, що містить даний діелектрик, до заряду Q_o , який можна було б одержати на конденсаторі тих же геометричних розмірів і при тій же напрузі, якби між електродами знаходився вакуум:

$$\epsilon_r = \frac{Q}{Q_o} = \frac{Q_o + Q_d}{Q_o} = 1 + \frac{Q_d}{Q_o} \quad (1.10)$$

З наведеної формули видно, що значення ϵ_r будь-якого діелектрика більше одиниці і тільки в тому випадку, коли між електродами знаходиться вакуум $\epsilon_r = 1$.

Фактично параметр ϵ_r показує, у скільки разів зміниться ємність або заряд конденсатора при заміні вакууму між його пластинами досліджуваним діелектриком.

Таким чином, заряд на обкладинках конденсатора з діелектриком дорівнюватиме:

$$Q = \epsilon_r Q_o = \epsilon_r \epsilon_o S E. \quad (1.11)$$

Поверхнева щільність зарядів на обкладинках конденсатора:

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \epsilon_r \epsilon_o E = \epsilon_r \sigma_o \quad (1.12)$$

Заряд на поверхні діелектрика:

$$Q_d = Q - Q_o = \epsilon_r Q_o - Q_o = (\epsilon_r - 1) Q_o \quad (1.13)$$

Щільність зарядів на поверхні діелектрика:

$$\sigma_{\partial} = (\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 E \quad (1.14)$$

Крім параметра ε_r часто використовують параметр абсолютної діелектричної проникності:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_r \varepsilon_0, \quad (1.15)$$

Відносна діелектрична проникність використовується в багатьох рівняннях, що характеризують фізичні процеси, які протікають у діелектриках.

Значення діелектричної проникності важливо знати і для розрахунку напруженості електричного поля в багатошарових діелектриках. Наприклад, для випадку двошарового конденсатора (рис.1.2) напруженість електричного поля в шарах дорівнює

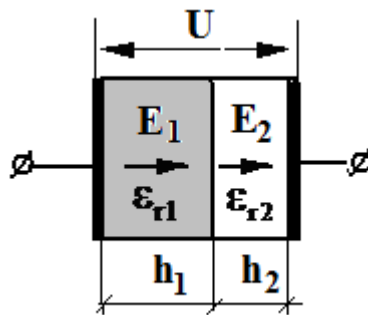


Рисунок 1.2 – Двошаровий конденсатор

$$E_1 = \varepsilon_{r2} \frac{U}{h_1 \varepsilon_{r2} + h_2 \varepsilon_{r1}}, \quad E_2 = \varepsilon_{r1} \frac{U}{h_1 \varepsilon_{r2} + h_2 \varepsilon_{r1}} \quad (1.16)$$

Напруга на шарах

$$U_1 = \frac{\varepsilon_{r2} h_1 U}{h_1 \varepsilon_{r2} + h_2 \varepsilon_{r1}}, \quad U_2 = \frac{\varepsilon_{r1} h_2 U}{h_1 \varepsilon_{r2} + h_2 \varepsilon_{r1}} \quad (1.17)$$

З наведених формул виходить, що при меншій діелектричній проникності шару напруга на ньому збільшується. В особливо не вигідному положенні виявляються повітряні прошарки всередині ізоляції. У зв'язку з малим значенням ε_r і низкою електричною міцністю в таких прошарках легко виникають часткові розряди.

У тому випадку, коли діелектрик представляє суміш хімічно невзаємодіючих один з одним компонентів з різними діелектричними проникностями, загальну діелектричну проникність можна визначити приблизно на підставі рівняння Ліхтенеккера

$$\varepsilon^X = \theta_1 \varepsilon_1^X + \theta_2 \varepsilon_2^X, \quad (1.18)$$

де $\varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ – відповідно відносні діелектричні проникності суміші й окремих компонентів; θ_1, θ_2 – об'ємні концентрації компонентів, $\theta_1 + \theta_2 = 1$; x – величина, що характеризує розподіл компонентів і приймає значення від +1 до -1.

При паралельному включенні компонентів $x = +1$ і вираз (1.18) має вигляд

$$\varepsilon = \theta_1 \varepsilon_1 + \theta_2 \varepsilon_2. \quad (1.19)$$

При послідовному включенні компонентів, коли $x = -1$,

$$1/\varepsilon = \theta_1/\varepsilon_1 + \theta_2/\varepsilon_2. \quad (1.20)$$

Якщо компоненти розподілені хаотично, то

$$\ln \varepsilon = \theta_1 \ln \varepsilon_1 + \theta_2 \ln \varepsilon_2. \quad (1.21)$$

Електрична ємність конденсатора, крім геометричних розмірів і конфігурації конденсатора, залежить також від відносної діелектричної проникності діелектрика, що в ньому використовується.

Ємність плоского конденсатора визначається за формулою

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r S / h, \quad (1.22)$$

де S – площа поперечного перерізу електрода, м²; h – відстань між електродами, м.

Для циліндричного конденсатора (рис. 1.3) формула має вигляд

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon 2\pi L / \ln(d_2/d_1) \quad (1.23)$$

де L – осьова довжина, м; d_1 – діаметр внутрішнього електрода, м; d_2 – діаметр зовнішнього електрода, м.

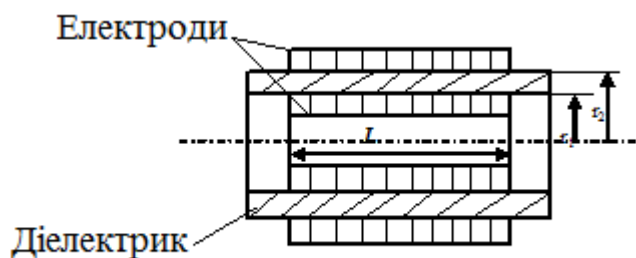


Рисунок 1.3 – Циліндричний конденсатор

При $d_2 - d_1 \ll d_1$ дану формулу можна представити у вигляді

$$C = \epsilon_0 \epsilon \pi L (d_2 + d_1) / (d_2 - d_1) \quad (1.24)$$

При паралельному включенні n конденсаторів їх результуюча ємність C_p дорівнює сумі ємностей кожного окремого конденсатора, а при послідовному їх з'єднанні результуюча ємність C_s визначиться як

$$\frac{1}{C_s} = \sum \frac{1}{C_{Si}} \quad (1.25)$$

Величина відносної діелектричної проникності для різних діелектриків змінюється в широких межах. Значення ϵ_r газів близьке до одиниці. Так, для повітря $\epsilon_r = 1,00058$. Більшість практично застосовуваних рідких і твердих діелектриків мають значення ϵ_r порядку декількох одиниць, менше зустрічаються діелектрики, в яких ϵ_r складає кілька десятків і дуже рідко, коли ця величина перевищує значення сто одиниць. У сегнетоелектриках вона може досягати значення кілька десятків тисяч.

У процесі зберігання, транспортування і експлуатації діелектричні матеріали піддаються впливу різних зовнішніх факторів. До таких факторів слід віднести: частоту прикладання напруги, температуру, вологість і гідростатичний тиск навколишнього середовища, механічні напруги і т.д. Під впливом цих факторів величина ϵ_r може істотно змінитися.

Значний вплив на величину відносної діелектричної проникності, особливо в полярних діелектриках, оказує температура. Температурна залежність діелектричної проникності від температури може бути представлена виразом

$$TK\varepsilon_r = \frac{1}{\varepsilon_r} \cdot \frac{d\varepsilon_r}{dT}, \quad (1.26)$$

де $TK\varepsilon_r$ – температурний коефіцієнт відносної діелектричної проникності. Даний коефіцієнт дозволяє визначити відносну зміну діелектричної проникності при зміні температури на 1°C або 1°K .

Значення $TK\varepsilon_r$ можна визначити і графічно (рис. 1.4). Для цього при визначеній температурі в точці, яка нас цікавить (наприклад, А) проводять дотичну до кривої і будують на цій дотичній, як на гіпотенузі, прямокутний трикутник довільних розмірів. Відношення його катетів з урахуванням масштабів ε_r і T , поділене на значення ε_r в точці А дорівнює $TK\varepsilon_r$:

$$TK\varepsilon_r = \frac{1}{\varepsilon_r} \cdot \frac{\Delta\varepsilon_r}{\Delta T} \quad (1.27)$$

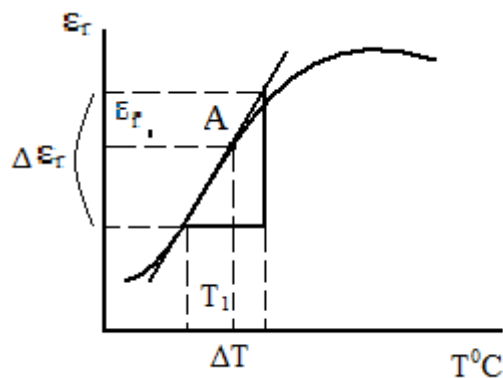


Рисунок 1.4 – Графічне визначення $TK\varepsilon_r$

Таким чином, можна визначити $TK\varepsilon_r$ при будь-якому механізмі поляризації і для залежності $\varepsilon_r = f(T)$ будь-якої форми.

Задачі

1.1. Два конденсатора ємністю C_1 і C_2 підключені до мережі живлення з напругою рівній U . Визначте, на якому конденсаторі величина заряду буде більше і у скільки разів. Варіанти задачі наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Варіанти задачі 1.1

Варіант завдання		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значення параметрів	C ₁	300пФ	100пф	2мкф	1мкф	50пф	20мкф	2мкф	15пф	60пф	10пф
	C ₂	1 мкф	5 мкф	200пф	4мкф	10пф	10мкф	500мкф	55пф	120пф	25пф

1.2. Нормально вектору напруженості однорідного електричного поля E_0 розташована пластина ізотропного діелектрика з діелектричною проникністю ϵ . Визначити: а) напруженість поля E і електричне зміщення (електричну індукцію) D всередині пластини; б) поляризованність діелектрика P і поверхневу щільність зв'язаних зарядів σ . Варіанти завдання наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Варіанти задачі 1.2

Варіант завдання		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значення параметрів	E_0 В/м	150	170	200	220	240	280	330	350	370	400
	ϵ	2	3	5	4	6	8	7	9	2	5

1.3. Побудуйте графік залежності $\epsilon_r = f(T)$ використовуючи дані, наведені в таблиці 1.3. Визначте з даного графіка значення температурного коефіцієнту відносної діелектричної проникності. Результати розрахунку використайте для побудови графіка залежності ТК $\epsilon_r = f(T)$.

Таблиця 1.3 – Варіанти задачі 1.3

Варіант завдання	Значення параметрів									
	1	T °C	-60	-40	-20	0	20	40	60	80
ϵ_r		2,35	2,30	2,25	2,20	2,15	2,0	1,95	1,90	
2	T °C	-20	0	20	40	60	80	100		
	ϵ_r	3,0	3,0	3,0	3,5	5,0	7,0	10,0		
3	T °C	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	
	ϵ_r	2,6	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	
4	T °C	10	20	30	40	50	60	70	80	
	ϵ_r	4,0	6,0	11,0	19,0	10,0	7,0	5,0	4,0	

Продовження таблиці 1.3

5	T °C	0	10	20	30	40	50	60	70
	ϵ_r	5,0	5,0	6,0	8,0	10,0	10,5	9,5	9,0
6	T °C	10	20	30	40	50	60	70	80
	ϵ_r	2,5	2,21,9	2,7	1,6	1,6	1,7	2,0	2,4
7	T °C	-40	-20	0	20	40	60	80	
	ϵ_r	5,0	5,2	5,8	6,6	8,1	10,6	14,1	
8	T °C	0	10	20	30	40	50	60	
	ϵ_r	7,0	7,2	7,8	8,6	9,6	12,6	16,1	
9	T °C	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30
	ϵ_r	2,4	2,5	2,6	2,8	3,1	3,9	4,9	4,5
10	T °C	5	15	25	35	45	55	65	75
	ϵ_r	2,5	2,5	2,7	2,9	3,3	4,0	5,0	6,7

1.4. Двошаровий конденсатор включений у електричний ланцюг, величина напруги на першому шарі U_1 на другому - U_2 . Товщина кожного шару дорівнює відповідно h_1 і h_2 . Визначте відносну діелектричну проникність двох шарів, а також відносну діелектричну проникність другого шару, якщо діелектрична проникність першого шару $\epsilon = 3$. Варіанти задачі наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Варіанти задачі 1.4

Варіант завдання	Параметри			
	U_1 , В	U_2 , В	h_1 , мм	h_2 , мм
1	200	400	5,0	1,0
2	550	1000	2,5	6,0
3	100	550	4,0	0,5
4	600	250	2,3	1,5
5	500	200	3,5	6,3
6	800	1100	2,8	4,5
7	400	750	1,7	3,8
8	660	800	3,5	7,0
9	1000	750	7,3	5,3
10	350	900	1,2	3,3

1.5. Визначте, як зміниться ємність плоского конденсатора, який містить діелектрик товщиною h з напиляними електродами площею $S = \mathbf{a} \times \mathbf{b}$, якщо йому надати форму циліндру. Варіанти задачі наведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Варіанти задачі 1.5

Варіант завдання		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значення параметрів	h, мм	2	4	3	6	5	7	3	2	4	5
	S, см ²	2x4	3x5	1x5	4x4	6x7	8x10	7x8	4x9	2x6	5x7

Контрольні запитання

1. Перелічіть основні механізми поляризації.
 2. Перелічіть зовнішніх факторів, які впливають на діелектричну проникність.
 3. Викладіть метод визначення температурного коефіцієнта діелектричної проникності.
 4. Наведіть класифікацію діелектриків за видами поляризації.
 5. Поясніть розходження між полярними і неполярними діелектриками.
 6. Перерахуйте параметри, які характеризують процес поляризації.
 7. Викладіть метод визначення ємності циліндричного конденсатору.
- Література: [1, с.30 – 46] , [2, с. 11-28]

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

Електропровідність діелектриків

Мета заняття: вивчення особливостей процесу електропровідності діелектриків та набуття практичних навичок розрахунку параметрів, що характеризують цей процес.

За своїм призначенням електроізоляційні матеріали не повинні пропускати електричний струм. Однак поляризаційні процеси зсуву зв'язаних зарядів у речовині обумовлюють появу поляризаційних струмів, чи струмів зсуву в діелектрику. Вони протікають до моменту встановлення рівноважного стану. При електронній і іонній поляризаціях ці струми протікають практично миттєво і приладами, як правило, не фіксуються.

Струми зсуву, обумовлені різними видами релаксаційних поляризацій, називають абсорбційними струмами.

При постійній напрузі абсорбційні струми спостерігаються тільки в період включення і вимикання напруги. Під впливом змінної напруги ці струми протікають весь час до моменту відключення напруги.

З огляду на те, що в технічних діелектриках є вільні заряди, здатні переміщуватися під дією електричного поля крім абсорбційних струмів протікає також струм наскрізної електропровідності. Загальний струм у діелектрику можна представити у вигляді суми наскрізного й абсорбційного струмів. Залежність струму витоку через діелектрик від часу показана на рисунку 2.1.

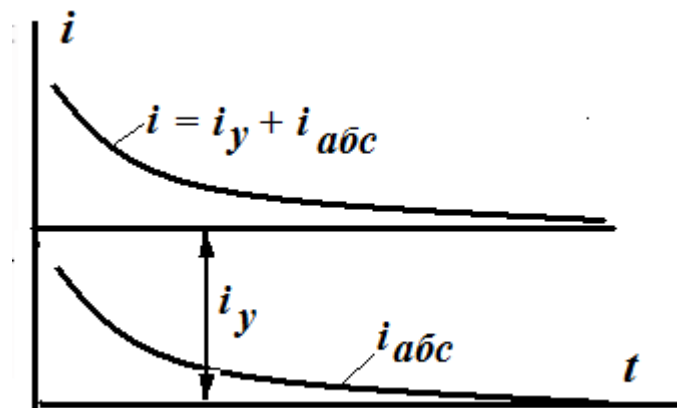


Рисунок 2.1 – Залежність струму через діелектрик від часу

Провідність діелектрика можна визначити за формулою

$$G_{из} = (I_{yt} + I_{abc}) / U, \quad (2.1)$$

де I_{yt} – струм витоку;

I_{abc} – сума струмів, викликаних уповільненими механізмами поляризації,

U - прикладена постійна напруга.

Струм абсорбції змінюється з перебігом часу t за законом загасаючої ек-

поненти:

$$I_{abc} = I_{abc\max} \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (2.2)$$

де T – постійна часу заряду ізоляції; $I_{abc\max}$ – максимальне значення току абсорбції при $t=0$.

З огляду на дану обставину, вимірювання опору діелектрика слід проводити після деякої витримки зразка під напругою, коли закінчаться перехідні процеси і струм абсорбції спаде до нуля. Прийнято вважати, що дані процеси завершаються протягом 60 секунд. В зв'язку з цим, за струм витоку приймають

струм, який вимірюється через одну хвилину після прикладання напруги. Щоб оцінити величину струму абсорбції, вимірюють струм витoku або опір ізоляції через 15 секунд після прикладення напруги.

Відношення шестидесятисекундного опору ізоляції R_{60} до п'ятнадцатисекундного значення R_{15} називають коефіцієнтом абсорбції k_{abc} .

$$k_{abc} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{I_{15}}{I_{60}} \quad (2.3)$$

Для незволоженої ізоляції при температурі навколишнього середовища 15-20 °C k_{abc} повинен бути не менше 1,3. Для зволоженої ізоляції цей коефіцієнт близький до одиниці.

Для твердих діелектриків розрізняють об'ємну провідність ізоляції G_v , чисельно визначальну провідність через товщину матеріалу, і поверхневу провідність G_s , що характеризує наявність шару підвищеної електропровідності на поверхні розділу твердої ізоляції з навколишнім газоподібним чи рідким середовищем. Цей шар утворюється внаслідок неминучих забруднень, зволоження і т.д. Відповідно вводяться поняття об'ємного струму витoku I_v і поверхневого струму витoku I_s .

Для порівняльної оцінки об'ємної і поверхневої провідності різних матеріалів користаються значеннями питомого об'ємного опору ρ_v і питомого поверхневого опору ρ_s .

У системі СІ питомий об'ємний опір чисельно дорівнює опору куба з ребром в один метр, вирізаного з досліджуваного матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні грані цього куба. Розмірність цього опору Ом*м.

Для плоского зразка з постійним поперечним перерізом, який знаходиться у однорідному полі, питомий об'ємний опір визначається за формулою

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h} \quad (2.4)$$

де R – об'ємний опір, Ом; S – площа електрода, м²; h – товщина зразка, м.

Значення ρ_v для порівняно низькоякісних діелектриків (деревина, папір, азбестоцемент і т.д.) знаходиться в межах 10⁶-10⁸ Ом*м. Для таких матеріалів

як полістирол, поліетилен і т.д. значення ρ_v складає $10^{14} - 10^{16}$ Ом•м, у неіонізованих газів значення ρ_v ще вище.

Питомий поверхневий опір ρ_s чисельно дорівнює опору квадрата (будь-яких розмірів), виділеного на поверхні матеріалу, якщо струм проходить через дві його протилежні сторони:

$$\rho_s = R_S \frac{d}{l}, \quad (2.5)$$

де R_S – поверхневий опір зразка матеріалу між паралельно розташованими електродами, Ом; d – ширина електрода, м; l – відстань між електродами, м.

Розмірність питомого поверхневого опору – Ом.

Використовуючи значення питомого об'ємного і поверхневого опорів, можна визначити питому об'ємну провідність $\gamma_v = 1/\rho_v$ і відповідно питому поверхневу провідність $\gamma_s = 1/\rho_s$.

Повна провідність твердого зразка діелектрика дорівнює сумі об'ємної і поверхневої провідностей.

При розрахунках слід також враховувати форму діелектрика і розташування електродів. Наприклад, для діелектрика у формі куба, на протилежні грані якого нанесені металеві електроди, еквівалентна схема має вигляд (рис. 2.2).

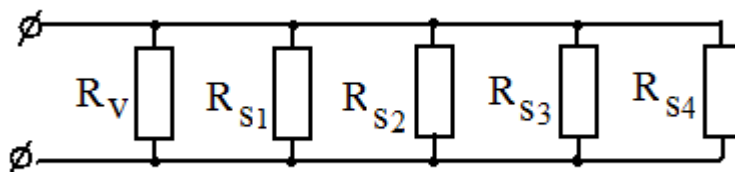


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема діелектрика, який має форму куба

Припускаючи, що величина опору всіх граней куба однакова, тоді сумарний опір діелектрику буде дорівнювати

$$R_{i3} = R_V R_{S1} / (R_{S1} + 4R_V). \quad (2.6)$$

Опір діелектриків змінюється у процесі експлуатації оскільки залежить від величини прикладеного до зразка напруги, температури навколишнього середовища і вологості. Як правило, при збільшенні прикладеної напруги, температури і вологості опір ізоляції $R_{\text{из}}$ зменшується.

Одним з показників якості ізоляції є постійна часу її саморозряду. Еквівалентна схема електричної ізоляції представлена на рисунку 2.3,а.

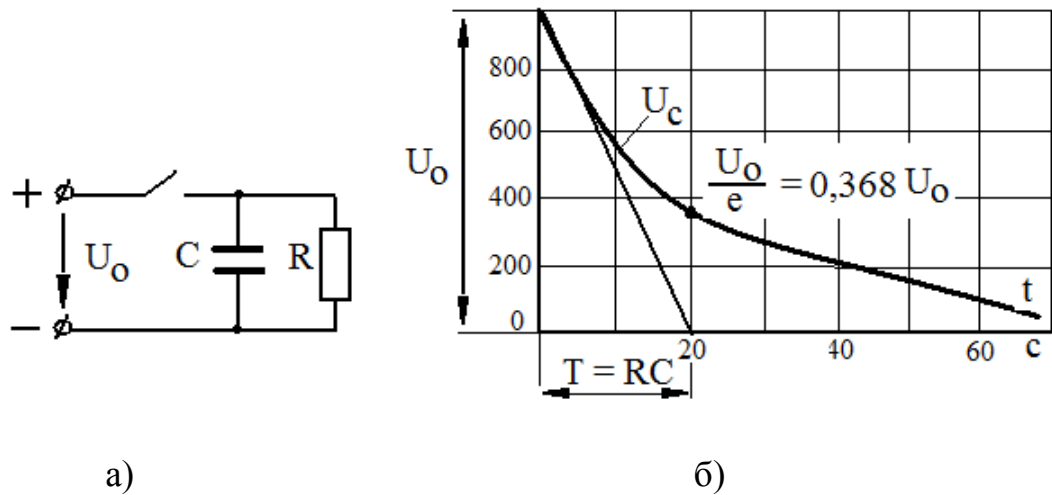


Рисунок 2.3 – Еквівалентна схема електричної ізоляції (а) та залежність напруги на конденсаторі від часу (б)

Величина напруги на конденсаторі, який був заряджений до напруги U_0 після відключення від джерела живлення почне поступово зменшуватися (рис. 2.3,б).

$$u = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.7)$$

Проміжок часу, протягом якого напруга на конденсаторі зменшиться в $e = 2.718$ рази і складе $0,368 U_0$, називається постійною часу саморозряду конденсатора. Цей параметр чисельно дорівнює добутку $T = RC$. Чим більше постійна часу, тим повільніше йде процес саморозряду.

Для плоского зразка з постійним поперечним перерізом, через який протікає тільки об'ємний струм постійна часу саморозряду дорівнює

$$T = RC = \rho \cdot \frac{h}{S} \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{h} = \epsilon_0 \epsilon_r \rho \quad (2.8)$$

З цієї формули можна зробити висновок, що постійна часу саморозряду ізоляції визначається тільки її властивостями і не залежить від геометричних розмірів ізоляції. Значення постійної часу саморозряду ізоляції електротехнічного обладнання змінюється в широких межах. Чим вище значення T , тим вище якість ізоляції.

Задачі

2.1. На дві протилежні грані кубика з ребром $a = 50 \cdot 10^{-3}$ м нанесені шари металевих електродів, які мають розміри $A \times C$. Визначте сталий струм через кубик при постійній напрузі $U = 1000$ В, якщо відомі питомий об'ємний опір ρ_v і питомий поверхневий опір ρ_s . Варіанти задачі наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1– Варіанти задачі 2.1

Номер варіанту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Розмір електроду $A \times C$, мм	50x5	50x15	50x25	50x30	50x10	25x25	30x25	35x10	40x20	40x30
ρ_v , Ом*м	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}
ρ_s , Ом	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}	10^{14}

2.2. Діелектрик має форму циліндра діаметром D і довжиною L . На торцях циліндра розташовані металеві електроди. Визначте опір даного діелектрика. Варіанти задачі наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Варіанти задачі 2.2

Номер варіанту	Питомий опір		Розміри діелектрика	
	ρ_v , Ом*м	ρ_s , Ом	Діаметр D , мм	Довжина L , мм
1	10^6	10^5	5	20
2	10^7	10^6	10	25
3	10^8	10^7	15	30
4	10^9	10^8	20	35
5	10^{10}	10^9	25	40
6	10^{11}	10^{10}	30	45
7	10^{12}	10^{11}	35	50
8	10^{13}	10^{12}	40	55
9	10^{14}	10^{13}	45	60
10	10^{15}	10^{14}	50	65

2.3. На дві протилежні сторони діелектрика наведеного на рисунку 2.4 нанесені шари металевих електродів, які мають розміри, що вказані у таблиці 2.3. Визначте опір діелектрика, якщо відомі питомий об'ємний опір ρ_v і питомий поверхневий опір ρ_s . Варіанти задачі наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3– Варіанти задачі 2.3

Номер варіанту	Номер рисунку	Розміри діелектрика. мм					Питомий опір	
		a	b	c	D	L	$\rho_v, \text{ Ом}^*\text{м}$	$\rho_s, \text{ Ом}$
1	2-1	5	5	10			10^6	10^5
2	2-2	10	15				10^7	10^6
3	2-3	10	20	15			10^8	10^7
4	2-4	15		5			10^9	10^8
5	2-5	20	25				10^{10}	10^9
6	2-6	20		5			10^{11}	10^{10}
7	2-7	30		5			10^{12}	10^{11}
8	2-8	40		10			10^{13}	10^{12}
9	2-9	40		5			10^{14}	10^{13}
10	2-10				50	30	10^{15}	10^{14}

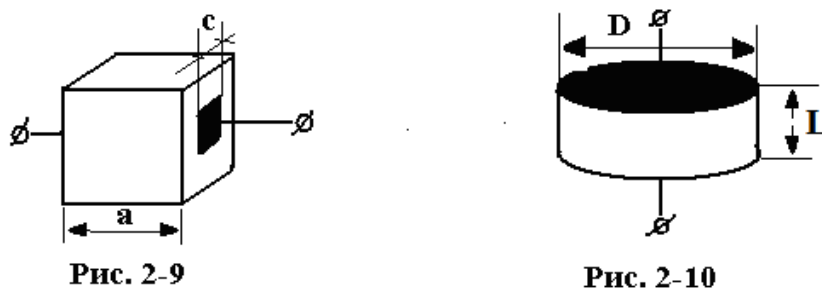
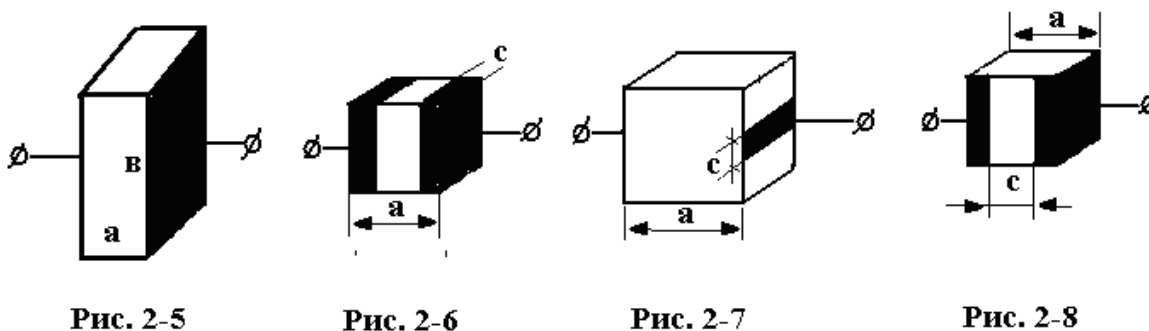
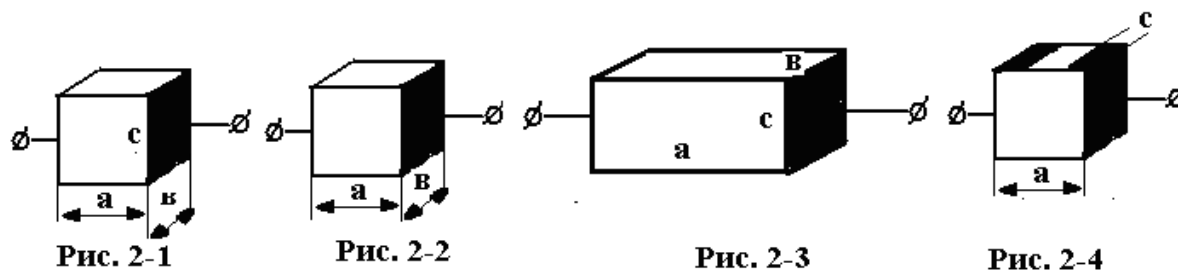


Рисунок 2.4 – Зразки діелектриків до задачі 2.3

2.4. Конденсатор з плівкового діелектрика з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 3$ втрачає при саморозряд за час $t = 25$ хвилин половину свого заряду. Визначить питомий опір діелектрику, вважаючи, що струм витоку відбувається тільки через плівку. Варіанти задачі наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4– Варіанти задачі 2.4

Номер варіанту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϵ_r	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
t	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65

2.5. Визначте параметри еквівалентної схеми заміщення діелектрика, яка приведена на рис. 2.4 і сталий наскрізний струм витоку I_y при підключенні до електродів постійної напруги U . Побудуйте залежність струму i та опіру R від часу t після підключення постійної напруги до електродів. У сталому режимі визначити значення напруг на кожному шарі.

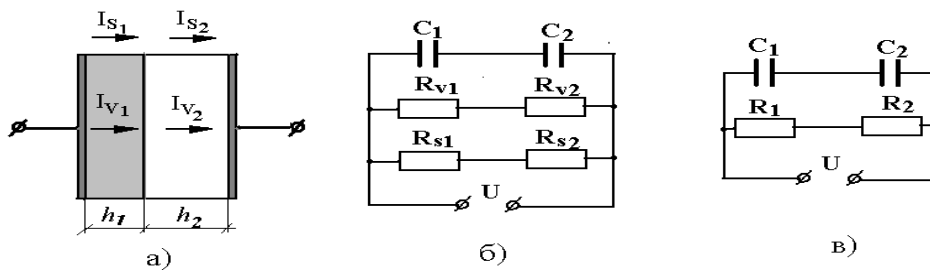


Рисунок 2.4 – Двошаровий діелектрик

Таблиця 2.3– Варіанти задачі 2.5

Номер варіанту	Напруга кВ	Розміри діелектрика. мм				Питомий опір	
		a	b	h₁	h₂	$\rho_v, \text{ Ом*м}$	$\rho_s, \text{ Ом}$
1	0,5	5	5	1,5	2,5	10^6	10^5
2	1.0	10	15	2,0	3,0	10^7	10^6
3	1,2	10	20	2,5	3,5	10^8	10^7
4	1,4	15	25	3,0	4,0	10^9	10^8
5	1,6	20	30	3,5	4,5	10^{10}	10^9
6	1,8	20	20	4,0	5,0	10^{11}	10^{10}
7	2.0	30	25	5,0	4,5	10^{12}	10^{11}
8	2,2	40	35	4,0	4,0	10^{13}	10^{12}
9	2,4	40	40	3,5	3,0	10^{14}	10^{13}
10	2,6			3,0	5.0	10^{15}	10^{14}

Контрольні запитання

1. Опишіть фізичну сутність процесу електропровідності в діелектриках.
2. Назвіть фактори, що впливають на поверхневу й об'ємну електропровідність.
3. Наведіть визначення питомих об'ємного і поверхневого опорів.
4. Вкажіть методи зменшення поверхневої електропровідності діелектриків.
5. Наведіть приклади залежності електропровідності твердих діелектриків від зовнішніх факторів і поясніть їх.
6. Наведіть еквівалентну схему заміщення твердого діелектрика.
7. Дайте визначення постійної часу саморозряду конденсатора, який містить твердий діелектрик.

Література: [1, с.47 – 60]

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №3

Діелектричні втрати

Мета заняття: вивчення механізмів виникнення діелектричних втрат і набуття практичних навичок розрахунку основних параметрів, що характеризують дані процеси.

Діелектричними втратами називають електричну потужність, що розсіюється в діелектрику в одиницю часу при впливі на нього електричного поля і викликає нагрівання діелектрика.

Втрати енергії в діелектрику спостерігаються як при змінній, так і при постійній напрузі. При постійній напрузі діелектричні втрати обумовлені електропровідністю. При впливі змінної напруги в діелектриках, крім наскрізної електропровідності можуть проявлятися й інші механізми перетворення електричної енергії в теплову.

Для оцінки здатності діелектрика розсіювати енергію в електричному полі використовують кут діелектричних втрат чи тангенс цього кута.

Кутом діелектричних втрат δ називається кут, що доповнює до 90^0 кут фазового зсуву між струмом і напругою в ємнісному ланцюзі.

Чим більше потужність, що розсіюється, тим менше кут фазового зсуву і тим більше кут діелектричних утрат δ . У разі ідеального діелектрика вектор струму випереджає вектор напруги на 90° , тому кут діелектричних втрат буде дорівнювати нулю.

При постійній напрузі діелектричні втрати обумовлені практично тільки струмом наскрізної провідності, тому що втрати на однократну поляризацію незначні, а втрати, що виникають у результаті протікання поверхневого струму, розсіюються в навколишньому середовищі. Таким чином, діелектричні втрати, що розсіюються в об'ємі діелектрика і викликані струмом об'ємної наскрізної провідності при постійній напрузі, можна визначити за формулою

$$P_a = UI_{скв} = U^2 \gamma_v \frac{S}{h}. \quad (3.1)$$

Для вивчення поведінки діелектрика з діелектричними втратами при змінній напрузі, доцільно подати його у вигляді еквівалентних схем, що містять ємність і активний опір, які включені між собою послідовно чи паралельно. Дані схеми представлені на рисунку 3.1.

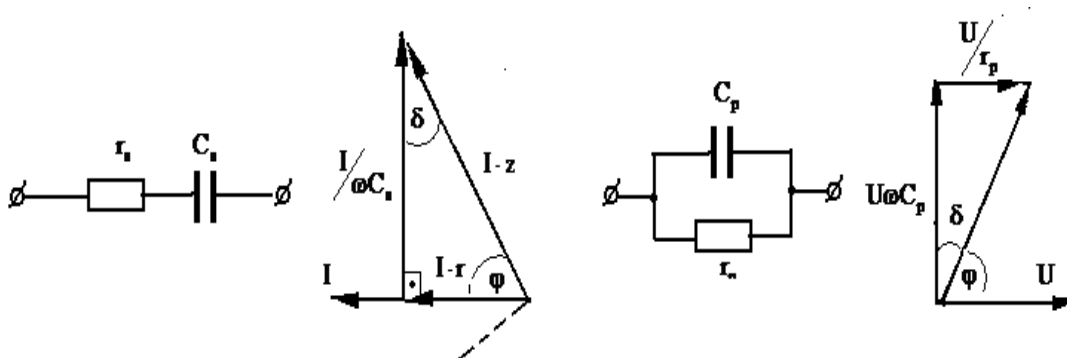


Рисунок 3.1 – Векторні діаграми й еквівалентні схеми заміщення діелектрика

Ці схеми еквівалентні одна одній, якщо при рівності повних опорів $Z_1 = Z_2 = Z$ рівні, відповідно, їх активні й реактивні складові. Ця умова виконується, коли кути зсуву струму щодо напруги рівні і значення активної потужності однакові.

Для послідовної схеми запишемо

$$P_a = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (3.2)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s r_s \quad (3.3)$$

Для паралельної схеми

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (3.4)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p r_p} \quad (3.5)$$

Співвідношення між C_p і C_s , а також між r_p і r_s можна визначити, прирівнюючи один до одного рівняння (3.2), (3.4) і (3.3), (3.5):

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (3.6)$$

$$r_p = r_s \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right) \quad (3.7)$$

Для високоякісних діелектриків значенням $\operatorname{tg}^2 \delta$ можна зневажити і вважати $C_p \approx C_s \approx C$. Потужність, що розсіюється в діелектрику, у цьому випадку буде однаковою для обох схем: $P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$.

Вираз для питомих діелектричних втрат, тобто потужності, що розсіюється в одиниці об'єму діелектрика, має вигляд:

$$p = \frac{P}{V} = \frac{U^2 \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta}{V} \quad (3.8)$$

Для плоского зразка діелектрика товщиною h , на бокові поверхні якого нанесені електроди площею S питомі діелектричні втрати мають вигляд:

$$p = \frac{U^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta}{h \cdot S \cdot h} = \frac{U^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta}{h^2} = E^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (3.9)$$

Добуток відносної діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат ($\varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta$) називається коефіцієнтом діелектричних втрат матеріалу.

Задачі

3.1 При температурі 20°C тангенс кута діелектричних втрат діелектрика дорівнює $\text{tg}\delta_1$. При зростанні температури до 100°C він збільшується в два рази. Визначте чому буде дорівнювати $\text{tg}\delta_m$ цього матеріалу при температурі T_T , а також у скільки разів збільшиться активна потужність, що виділяється у цьому діелектрику при зміні температури від 20°C до T_T . Зміною діелектричної проникності діелектрика можна знехтувати. Варіанти задачі наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Варіанти задачі 3.1

Варіант задачі	$\text{tg}\delta_o$	$T_T, ^{\circ}\text{C}$
1	$5 \cdot 10^{-4}$	200
2	$3 \cdot 10^{-4}$	220
3	$7 \cdot 10^{-4}$	240
4	$9 \cdot 10^{-4}$	260
5	$11 \cdot 10^{-5}$	280
6	$13 \cdot 10^{-5}$	300
7	$15 \cdot 10^{-5}$	290
8	$17 \cdot 10^{-5}$	270
9	$19 \cdot 10^{-5}$	290
10	$21 \cdot 10^{-5}$	310

3.2 На дві протилежні грані куба з ребром $a = 25 \times 10^{-3}$ м нанесені металеві електроди. Знайдіть сталий струм через куб і діелектричні втрати при постійній напрузі $U = 1000$ В, якщо відомі питомий об'ємний опір ρ_v і питомий поверхневий опір ρ_s . Варіанти задачі наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Варіанти задачі 3.2

Варіант задачі	$\rho_v, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$\rho_s, \text{Ом}$
1	$\cdot 10^7$	$\cdot 10^5$
2	$\cdot 10^6$	$\cdot 10^6$
3	$\cdot 10^5$	$\cdot 10^5$
4	$\cdot 10^8$	$\cdot 10^6$
5	$\cdot 10^9$	$\cdot 10^7$
6	$\cdot 10^{10}$	$\cdot 10^5$

Варіант задачі	$\rho_v, \text{ Ом*м}$	$\rho_s, \text{ Ом}$
7	$\cdot 10^{11}$	$\cdot 10^6$
8	$\cdot 10^{12}$	$\cdot 10^7$
9	$\cdot 10^{11}$	$\cdot 10^9$
10	$\cdot 10^{10}$	$\cdot 10^8$

3.3 Плоский конденсатор містить твердий діелектрик, площа кожної бокової поверхні якого S , а товщина діелектрика h . Підрахуйте сталий струм в конденсаторі й діелектричні втрати при змінній напрузі, частота якого 400 Гц. Варіанти задачі наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Варіанти задачі 3.3

Варіант задачі	Діелектрик	Параметри		
		$U, \text{ кВ}$	$h, \text{ мм}$	$S, \text{ см}^2$
1	2	3	4	5
1	Поліетилен	4	0,2	15
2	Сіталл	5	0,8	20
3	Полістирол	2	0,5	25
4	Поліамід	1	0,3	10
5	Вінілпласт	10	2,0	15
6	Поліетилен	6	1,5	20
7	Фторлон-3	8	1,0	25
8	Полікарбонат	3	0,4	10
9	Фторлон-4	2	0,8	15
10	Ескапон	5	1,8	20

3.4. На бокові поверхні плоского діелектрика нанесені прямокутні електроди, до яких прикладається змінна напруга U . Вихідні дані електродів і діелектрика наведені в таблиці 3.4. Визначити діелектричні втрати та питомі діелектричні втрати при температурі 20°C та 100°C. При розрахунках вважати, що ϵ_r не залежить від температури.

Таблиця 3.4 – Варіанти задачі 3.4

Параметри електродів та діелектриків	Номер варіанту									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ширина електроду, $a, \text{ мм}$	200	110	115	120	125	130	135	140	145	150
Довжина електроду, $b, \text{ мм}$	100	110	130	150	170	190	210	230	250	270
Товщина діелектрику, $h, \text{ мм}$	2,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Змінна напруга $U, \text{ кВ}$	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Частота напруги, Гц	100	50	55	60	65	70	75	80	85	90

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Відносна діелектрична проникливість, ϵ_r	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3
Температурний коефіцієнт, $K^{-1} \alpha \times 10^{-3}$	18	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Тангенс кута діелектричних втрат при температурі 20°C, $tg\delta_1 \times 10^{-4}$	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12

3.5. На бокові поверхні плоского двошарового діелектрика нанесені прямокутні електроди, до яких прикладається постійна напруга U . Визначте напруженість електричного поля в обох діелектриках в моменти часу $t = 0$ і $t \rightarrow \infty$. Знайти напруженість електричного поля в цих діелектриках при $t \rightarrow \infty$, якщо до електродів прикладена змінна напруга. Вихідні дані електродів і діелектриків наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5– Варіанти задачі 3.5

Параметри електродів та діелектриків	Номер варіанту										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Ширина електроду, a , мм	10	12	14	16	18	20	18	16	14	12	
Довжина електроду, b , мм	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
Постійна напруга U , кВ	5	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	
Товщина діелектриків, мм	h_1	10	12	14	16	18	20	18	16	14	12
	h_2	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Відносна діелектрична проникливість	ϵ_{r1}	2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
	ϵ_{r2}	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
Питомий об'ємний опір, Ом·м	ρ_{v1}	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^8	10^7	10^6	10^5	10^4
	ρ_{v2}	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{12}	10^{11}	10^{10}	10^9	10^8	10^7
Змінна напруга, В	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	
Частота, МГц	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	

Контрольні запитання:

1. Вкажіть причини, що викликають діелектричні втрати в діелектриках.
2. Перелічіть параметри, за допомогою яких можливо дати оцінку діелектричних втрат в матеріалах.

3. Наведіть схеми заміщення діелектрика з втратами і вкажіть умови їхньої еквівалентності.

4. Перелічіть види діелектричних втрат, дайте їм коротку характеристику.

5. Вкажіть фактори, що впливають на величину діелектричних втрат.

6. Дайте характеристику діелектричних втрат у газах.

7. Дайте характеристику діелектричних втрат у рідких діелектриках.

8. Дайте характеристику діелектричних втрат у твердих діелектриках.

Література: [1, с.62-70]

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №4

Пробій діелектриків

Мета заняття: закріплення теоретичних знань про механізми пробіів діелектриків в електричному полі, набуття практичних навичок розрахунку параметрів, які визначають використання даних матеріалів в електротехнічних пристроях

При перевищенні прикладеної до діелектрика напруги вище деякого критичного значення ізоляційні властивості порушуються і відбувається утворення провідного каналу. При цьому струм витіку через діелектрик різко зростає, а опір відповідно зменшується.

Явище утворення в діелектрику провідного каналу під дією електричного поля називається пробоем. Залежність струму через діелектрик від прикладеної напруги показана на рисунку 4.1.

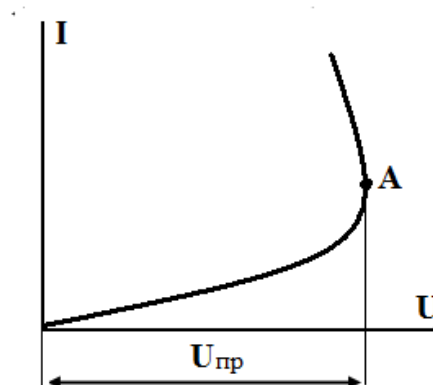


Рисунок 4.1 – Залежність струму через діелектрик від прикладеної напруги

Точка А, для якої $dI/dU = \infty$, відповідає пробою. Значення напруги, при якому відбувається пробій, називається пробивною напругою U_{np} , а відповідне значення напруженості електричного поля – електричною міцністю E_{np} .

Для найпростішого випадку однорідного електричного поля в діелектрику

$$E_{np} = U_{np} / h, \quad (4.1)$$

де U_{np} – пробивна напруга; h – товщина діелектрика.

У більшості випадків при збільшенні h значення E_{np} зменшується нелінійно.

Для надійної роботи будь-якого електротехнічного пристрою робоча напруга його ізоляції повинна бути значно менше пробивної напруги.

Фізична сутність розвитку пробою різна. Розрізняють наступні види пробою: чисто електричний, електротепловий, електромеханічний, електрохімічний, іонізаційний.

Чисто електричний пробій являє собою безпосереднє руйнування структури діелектрика силами електричного поля, що впливають на електрично заряджені частки в діелектрику. Цей вид пробою розвивається практично миттєво.

Електротепловий пробій пов'язаний з нагріванням діелектрика в електричному полі в результаті діелектричних втрат. Процес нагрівання діелектрика протікає, постійно підсилюючись. Це приводить до істотної зміни структури діелектрика (розплавлювання, обвуглювання, розтріскування) і зменшенню його електричної міцності. При цьому достатньо, щоб розігрілося яке-небудь місце діелектрика, в якому тепловіддача гірше або підвищені питомі втрати, а середня температура всього діелектрика може практично не відрізнятися від первісної.

Електромеханічний пробій виникає в результаті механічного руйнування діелектрика (утворення макроскопічних тріщин) силами електричного поля. У ряді випадків механічні руйнування в діелектриках виникають у результаті тиску електродів.

Електрохімічний пробій – це вид пробою, який повільно розвивається і пов'язаний з хімічною зміною матеріалу в електричному полі. Цей вид пробою

спостерігається як при постійній, так і при змінній напрузі внаслідок розвитку в матеріалах електролітичних процесів.

Іонізаційний пробій пояснюється дією на діелектрик хімічно агресивних речовин, що утворюються в газових порах діелектрика при часткових розрядах, а також ерозією діелектрика на межі пор іонами газу.

Найпоширенішим ізоляційним середовищем, що використовується в різних електротехнічних системах є повітря. Пробій повітря та інших газів слід розглядати як наслідок розвитку процесів ударної іонізації і фотоіонізації. Під впливом електричного поля позитивні й негативні іони й електрони, що містяться в газі та знаходяться в безладному тепловому русі, починають переміщуватися в напрямку поля. При цьому вони одержують додаткову енергію

$W = q U^{\lambda}$, де q – заряд, U^{λ} - різниця потенціалів на довжині вільного пробігу.

Ця енергія віддається атомам чи молекулам газу в момент зіткнення. Якщо ця енергія досить велика, то при зіткненні відбувається збудження атомів або молекул і навіть іонізація молекул.

Енергію іонізації звичайно характеризують іонізаційним потенціалом $U_{и} = W_{и} / q$. Іонізаційний потенціал різних газів знаходиться в межах від 4 до 25В, що відповідає енергії іонізації від 4 до 25eВ.

У ряді випадків електрон, розігнаний електричним полем, не іонізує молекулу, а переводить її в збуджений стан. При переході в урівноважений стан ця молекула віддає свою надлишкову енергію у вигляді випромінювання – випускає фотон. Якщо цей фотон буде поглинутий якою-небудь молекулою, то це може привести до її іонізації. Швидкість руху фотона більша, ніж швидкість руху електронної лавини, внаслідок цього, фотони обганяють електронну лавину й іонізують частки газу попереду основної лавини. Звільнені при цьому електрони породжують нові лавини далеко перед першою. У наступних стадіях окремі лавини, наганяючи одна одну, утворюють суцільний канал іонізованого газу з підвищеною провідністю, який називається стрімером. Одночасно з ростом стрімера, спрямованого від катода до анода, починається утворення зустрічного лавинного потоку позитивно заряджених часток, спрямованого до катода.

Утворюється розрядний канал у вигляді плазми з надлишковим позитивним зарядом. У результаті зазначених процесів і виникає пробій газу. Чим більше прикладена напруга до газового проміжку, тим швидше відбувається пробій.

Час розвитку пробою в однорідному полі складає $10^{-7} - 10^{-8}$ с, причому величина напруги пробою залежить від температури і тиску наповнюючого газу. При нормальному тиску (0,1Мпа) і температурі 20°C електрична міцність повітря при відстані між електродами в 1 см складає близько 3,2 МВ/м. Зі зменшенням відстані між електродами електрична міцність збільшується, що пояснюється труднощами формування розряду.

Для розрахунку пробивної напруги повітря використовують формулу

$$U_{np} = U_{np0} \cdot \delta, \quad (4.2)$$

де U_{np} - пробивна напруга при даній температурі і тиску; U_{np0} - пробивна напруга при нормальному тиску $P = 0,1$ МПа і нормальній температурі $t = 20$ °C; δ - відносна щільність повітря, розрахована за формулою

$$\delta = \frac{(273+t_o) \cdot p}{(273+t) \cdot p_o} = \frac{(273+20) \cdot p}{(273+t) \cdot 760} = 0,386 \frac{p}{273+t} \quad (4.3)$$

Формулою (4.2) можна користуватися, якщо δ лежить в межах 0,95-1,05. В іншому випадку потрібно за величиною δ знаходити поправку у відповідних таблицях.

Пробій газу в неоднорідному електричному полі підкоряється вже іншим закономірностям. Особливістю даного пробою є виникнення часткового розряду у вигляді корони в місцях, де напруженість електричного поля досягає критичних значень, з наступним переходом корони в іскровий розряд і дугу при зростанні напруги. При цьому в газах спостерігається ефект полярності, який полягає в тому, що величина напруги пробою залежить від полярності підведеної напруги. При рівних умовах для несиметричних електродів голка–площина пробивна напруга при позитивній полярності голки значно нижче, ніж при негативній.

Рідкі діелектрики мають більш високу електричну міцність ніж гази, що обумовлено значно меншою довжиною вільного пробігу електронів.

Електрична міцність технічних рідких діелектриків істотно залежить від наявності забруднень, зменшуючись у міру збільшення полярності рідини і, відповідно, зростання її дісоціюючої здатності. Різке зниження електричної міцності спостерігається при влученні в рідкий діелектрик навіть невеликої кількості води.

Істотно знижується електрична міцність при наявності в рідкий діелектрик волокнистих домішок. Це пов'язано з високою гігроскопічністю волокон, зволоження яких підвищує їхню діелектричну проникність. Під впливом електричного поля волокна прагнуть вишикуватися уздовж силових ліній поля, що полегшує умови пробою.

На пробій рідких діелектриків впливає форма електродів: зі збільшенням ступеня неоднорідності електричного поля пробивна напруга рідкого діелектрика зменшується.

Зміна електричної міцності спостерігається в міру збільшення числа пробів у тому самому об'ємі рідини, що пов'язано із забрудненням діелектрика продуктами розкладання в місці пробою.

При збільшенні температури електрична міцність чистих рідких діелектриків практично не змінюється доти, поки не починається кипіння легких масляних фракцій і утворення при цьому пухирців пару, що приводить до утворення газового містка між електродами. З цього моменту $E_{пр}$ рідкого діелектрика починає зменшуватися.

Для твердих діелектриків характерні такі види пробою: 1) електричний; 2) електротепловий; 3) електрохімічний.

Залежно від різних факторів у тому самому діелектрику можуть виникати зазначені види пробою.

Електричний пробій за своєю природою є електронним процесом, коли з деяких початкових електронів у твердому тілі утворюється електронна лавина. Він обумовлений ударною іонізацією чи розривом зв'язків між частками діеле-

ктрика під дією електричного поля. Цей вид пробою протікає практично миттєво за час 10^{-7} - 10^{-8} с.

Більшість технічних діелектриків відрізняються неоднорідністю структури. Наявність у них включень з підвищеною провідністю і діелектричною проникністю приводить до викривлення електричного поля, утворення всередині діелектрика ділянок з підвищеною провідністю. Це приводить до зменшення електричної міцності неоднорідних діелектриків.

У сильно неоднорідному електричному полі у твердих діелектриках може мати місце ефект полярності, причому менша пробивна напруга відповідає позитивній полярності електрода з малим радіусом кривизни.

Низькою електричною міцністю відрізняються пористі діелектрики, наприклад, непросочений папір, дерево, кераміка і т.д. З метою підвищення електричної міцності проводять їхнє просочення чи покриття спеціальними складами, що обмежують доступ вологи всередину діелектрика.

Тепловий пробій твердих діелектриків виникає в тому випадку, коли кількість теплової енергії, що виділяється в діелектрику внаслідок діелектричних втрат, стійко перевищить кількість енергії, що діелектрик здатний передати в навколишнє середовище. Необмежений ріст температури закінчується тепловим руйнуванням діелектрика. Пробій, як правило, відбувається в тому місці діелектрика, де умови тепловідводу найгірші, тому величина $U_{пр}$ залежить від властивостей того середовища, у якому знаходиться діелектрик. З ростом температури навколишнього середовища пробивна напруга експоненціально зменшується. При пробіі товстих зразків тепловідвід від внутрішніх областей утруднений, тому вони перегріті більше, і в результаті цього в міру збільшення товщини зразків $E_{пр}$ зменшується.

У зв'язку з різноманітним чинників, які впливають на процес пробою, розроблений спрощений метод розрахунку пробивної напруги для плоского зразка діелектрика.[3]. При розрахунку вважається, що діелектричні втрати обумовлені в основному електропровідністю і відносна діелектрична проникливість від температури не залежить. Таким чином, потужність діелектричних втрат P_a , що

виділяється у діелектрику з урахуванням експоненціальної залежності $\text{tg}\delta$ від температури, буде дорівнювати:

$$P_a = U^2 \cdot \omega C \cdot \text{tg}\delta_o \cdot e^{\alpha(t-t_o)} \quad (4.4)$$

де U – прикладена напруга, ω – кутова частота, C – ємність діелектрика, t – робоча температура діелектрика, нагрітого за рахунок діелектричних втрат, t_o – температура навколишнього середовища, $\text{tg}\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат при температурі t_o , α – температурний коефіцієнт тангенса кута діелектричних втрат.

Потужність, що відводиться від діелектрика, виражається формулою Ньютона

$$P_t = 2\sigma \cdot S \cdot (t - t_o) \quad (4.5)$$

де σ – коефіцієнт теплопередачі системи діелектрик–метал електродів,
 S – площа охолодження.

На рисунку 4.2 наведено графік залежності потужностей, що виділяється $P_a(t)$ і розсіюється $P_t(t)$ від температури.

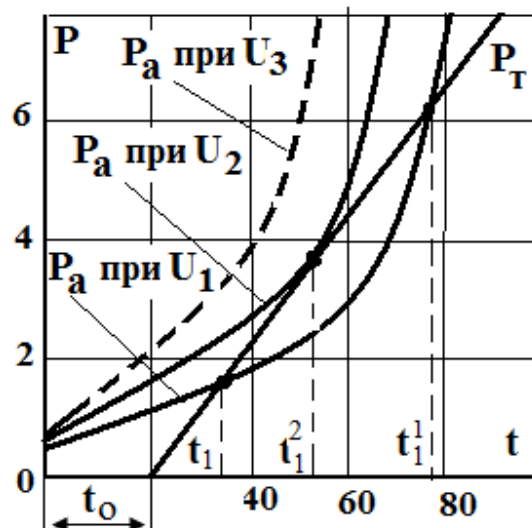


Рисунок 4.2 – Залежності потужностей, що виділяється $P_a(t)$ і розсіюється $P_t(t)$ від температури

З графіка видно, що при деякій температурі настає баланс між потужністю, що виділяється в діелектрику і потужністю, яка відводиться в навколишнє середовище.

Точка перетину $P_a(t)$ і $P_T(t)$ при температурі t_1 для якої $\frac{dP_T}{dt} > \frac{dP_A}{dt}$ називається точкою стійкої рівноваги, а точки перетину при температурах t_1^1 та t_1^2 , для яких $\frac{dP_T}{dt} < \frac{dP_A}{dt}$ - точками нестійкої рівноваги.

Напрягу теплового пробую можна знайти за двома умовами:

$$P_a = P_T \quad (4.6)$$

$$\frac{dP_a}{dt} = \frac{dP_T}{dt} \quad (4.7)$$

Вирішуючи ці два рівняння щодо U_i з урахуванням (4.4) та (4.5) отримуємо

$$U^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \text{tg}\delta \cdot S \cdot e^{\alpha(t-t_0)} / 1,8 \cdot 10^{10} \cdot h = 2\sigma \cdot S(t-t_0) \quad (4.8)$$

$$U^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \text{tg}\delta \cdot S \cdot e^{\alpha(t-t_0)} / 1,8 \cdot 10^{10} \cdot h = 2\sigma \cdot S \quad (4.9)$$

Розділивши вирази (4.8) та (4.9), отримаємо $\frac{1}{\alpha} = t - t_0$. Підставивши його

в (4.9) матимемо

$$U_{i0} = \sqrt{\frac{1,8 \cdot 10^{10} \cdot 2\sigma \cdot h}{f \cdot \varepsilon \cdot \text{tg}\delta \cdot \alpha}} \quad (4.10)$$

З формули (4.10) можливо зробити висновок, що пробивна напруга зменшується зі збільшенням частоти, коефіцієнту діелектричних втрат $\varepsilon \text{tg}\delta$ і α .

У реальних умовах явище теплового пробую протікає більш складно, чим було розглянуто. Більш точні методи розрахунку розроблені академіками М. М. Семеновим, В. А. Фоком і А. Ф. Вальтером.

Електрохімічний пробій спостерігається при постійній і змінній напругах низької частоти, коли електричне поле викликає необоротні зміни електроізоляційного матеріалу. Унаслідок цього електричний опір зменшується доти, поки не наступить пробій. Даний процес називається електрохімічним старінням матеріалу.

Для розвитку електрохімічного пробую потрібен тривалий час, тому що він зв'язаний з процесом електропровідності. Він може мати місце при високих частотах, якщо в закритих порах матеріалу відбувається іонізація газу наприклад у кераміці.

Задачі

4.1. Визначити пробивну напругу в постійному електричному полі й у змінному електричному полі плоского діелектрика, що складається з двох шарів, геометричні та електричні параметри яких задані. Варіанти задачі наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти задачі 4.1

Параметри електродів та діелектриків		Номер варіанту									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Товщина діелектрику, мм	h_1 ,	250	240	235	230	225	220	215	265	260	265
	h_2 ,	45	40	35	30	25	20	15	50	60	70
Питомі опори, Ом·м	ρ_1	10^{14}	10^{14}	10^{13}	10^{12}	10^{12}	10^{11}	10^{11}	10^{10}	10^{10}	10^9
	ρ_2	10^{11}	10^{10}	10^{10}	10^9	10^8	10^8	10^7	10^7	10^6	10^6
Відносна діелектрична проникливість	ϵ_{r1}	8,0	8,3	8,5	8,7	9,0	9,3	9,5	9,7	8,7	8,5
	ϵ_{r2}	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	3,8	3,6
Електрична міцність, МВ/м	$E_{пр1}$	75	73	71	69	67	65	63	61	59	57
	$E_{пр2}$	50	48	46	44	42	40	38	36	34	32

4.2. Визначте, як зміниться в порівнянні з нормальними умовами напруга пробою між двома кулями, розташованими на відстані h одна від одної при зміні температури навколишнього середовища і атмосферного тиску. Варіанти задачі наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Варіанти задачі 4.2

Параметри електродів та діелектриків		Номер варіанту									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Діаметр кулі, см	D	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0
Відстань між кулями, см	h	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Напруга пробою, при нормальних умовах, кВ	$U_{пр}$	31,7	31,5	31,3	31,1	31,0	32,1	32,3	32,4	32,5	32,7
Температура навколишнього середовища	$T^{\circ}C$	27	26	25	24	23	22	21	20	29	30
Атмосферний тиск, мм рт. ст.	P	739	743	745	747	750	748	746	744	742	741

4.3. Конденсатор з плоскими електродами, відстань між якими h_1 , містить діелектрик з відносною діелектричною проникністю ϵ_{r1} і електричною міцністю $E_{пр1}$. Визначте величину граничної напруги, яку можна прикласти до електродів цього конденсатора, а також як зміниться величина цієї напруги якщо між

електродами виникне газовий прошарок товщиною h_2 з відносної діелектричної проникністю ϵ_{r2} і електричною міцністю $E_{пр2}$. Варіанти задачі наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Варіанти задачі 4.3

Параметри діелектриків	Номер варіанту									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Товщина діелектрика, h_1 , мм	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
Відносна діелектрична проникливість ϵ_{r1}	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8
Електрична міцність $E_{пр1}$, кВ/мм	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Товщина прошарку, h_2 , мм	0,2	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
Відносна діелектрична проникливість прошарку ϵ_{r2}	1,0	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45
Електрична міцність прошарку $E_{пр2}$, кВ/мм	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9

4.4. Плоскій конденсатор ємністю C містить діелектрик з відносною діелектричною проникністю ϵ_r і електричною міцністю $E_{пр}$. Визначте товщина діелектрика h і площу електродів S для роботи цього конденсатора при заданій напрузі U з чотириразовим запасом по електричній міцності. Варіанти задачі наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Варіанти задачі 4.4

Параметри діелектриків	Номер варіанту									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ємність конденсатора, пф	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Відносна діелектрична проникливість ϵ_r	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8
Електрична міцність $E_{пр1}$, МВ/м	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
Задана напруга, кВ	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28

4.5. Побудуйте графік залежності напруги пробою від товщини діелектрика, якщо відомо, що даний діелектрик маючи товщину h , пробивається при напрузі U . Варіанти задачі наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Варіанти задачі 4.5

Параметри діелектриків	Номер варіанту									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Товщина діелектрика, мм	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
Напруга пробою, кВ	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28

Контрольні запитання:

1. Перелічіть основні види пробою діелектриків, дайте їм коротку характеристику.
2. Вкажіть параметри, за допомогою яких можливо порівняти пробій діелектриків.
3. Поясніть, як впливає полярність електродів у неоднорідному електричному полі на величину пробивної напруги.
4. Поясніть, як електрична міцність повітря залежить від відстані між електродами.
5. Наведіть приклади зміни величини напруги пробою від тиску газу, що наповняє, і відстані між електродами.
6. Опишіть процес пробою технічних рідких діелектриків, укажіть фактори, що роблять вплив на їхню електричну міцність.
7. Перелічіть основні механізми пробою твердих діелектриків.

Література: [1, с.74-112]

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Колесов С. Н. Электротехнические и конструкционные материалы: учебник / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – Киев : Транспорт Украины, 2002. – 384 с.
2. Серебряков А. С. Материаловедение. Электроизоляционные материалы: учеб. пособие / А. С. Серебряков. – Москва : МИИТ, 2009. – 159с.
3. Агеева Н. Д., Винаковская Н.Г, Лифанов В. Н. Электротехническое материаловедение: учеб. пособие / Н. Д. Агеева, Н. Г. Винаковская, В. Н. Лифанов. – Владивосток : ДВГТУ, 2006. – 76 с.

Додаток А

Основні електричні параметри деяких електроізоляційних матеріалів

Матеріал	ϵ_r	ρ_v	ρ_s	$\text{tg}\delta$	$E_{пр}$	Нагріво- стійкість
	при 50Гц	Ом м	Ом	при 50Гц	МВ/м	
Гетінакс	5 - 6	$10^9 - 10^{10}$	10^{11}	$4 \cdot 10 \cdot 10^{-2}$	20 - 25	150
Текстоліт	6 - 8	10^{10}	10^{10}	$7 \cdot 10^{-2}$	6 - 8	135
Стеклотекстоліт	6 - 12	10^{10}	-	$6 \cdot 10^{-2}$	120	200
Ебоніт	2,8 – 4,5	$10^{13} - 10^{14}$	$10^{12} - 10^{13}$	$6 - 13 \cdot 10^{-3}$	17 - 25	50 – 100
Кремнійорганічна смола	3 - 5	$10^{12} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^{14}$	$1 - 3 \cdot 10^{-2}$	15 - 20	180
Ескапон	2,7 – 3,0	10^{15}	10^{16}	$5 \cdot 10^{-4}$	35	80 – 100
Слюда - мусковіт	6,8 – 7,2	$10^{11} - 10^{13}$	$10^{11} - 10^{12}$	$4 - 8 \cdot 10^{-3}$	-	-
Слюда-флогопіт	6,2 - 6,8	10^{12}	$10^{10} - 10^{11}$	$6 - 15 \cdot 10^{-3}$	-	-
Ситал	5 - 7	$10^{10} - 10^{11}$	10^{13}	$1 \cdot 10^{-3}$	20 - 80	-
Мікалекс	6 – 8,5	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{10} - 10^{12}$	$3 - 10 \cdot 10^{-3}$	10 - 20	300–500
Полівінілхлорид (вініпласт)	3,2 – 4,0	$10^{12} - 10^{13}$	10^{14}	$1 - 5 \cdot 10^{-2}$	15 - 35	65
Поліметілметакри- лат (орган. скло)	3.5 – 4,5	$10^{11} - 10^{12}$	$10^{11} - 10^{12}$	$2 - 8 \cdot 10^{-2}$	20 - 30	70 – 90
Полівінілхлорид	3 - 5	$10^{13} - 10^{14}$	$10^{13} - 10^{14}$	$3 - 8 \cdot 10^{-2}$	15 - 20	60 – 70
Поліетилен	2,3 – 2,4	$10^{14} - 10^{15}$	10^{14}	$1 - 5 \cdot 10^{-4}$	15 - 20	90–120
Полікарбонат	3,2	$10^{14} - 10^{15}$	$10^{14} - 10^{15}$	$4 - 8 \cdot 10^{-3}$	30	150-165
Полістирол	2,4 – 2,6	$10^{14} - 10^{15}$	10^{15}	$1 - 3 \cdot 10^{-4}$	20 - 35	70 – 90
Поліамідні смоли	3 - 4	$10^{11} - 10^{12}$	10^{12}	$1 - 4 \cdot 10^{-2}$	15 - 20	100–120
Фторопласт – 4	1,9– 2,2	$10^{15} - 10^{16}$	10^{17}	$1 - 2 \cdot 10^{-4}$	20 - 30	250-300

Навчальне видання

Методичні вказівки до самостійної роботи та виконання розрахунково-
графічних і практичних завдань з курсу
«ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ»

Розділ

«ДІЕЛЕКТРИКИ»

*(для студентів 2 курсу денної і заочної форм навчання бакалаврів напрямку
підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології і слухачів другої
вищої освіти спеціальності 7.05070103 – Електротехнічні системи
електроспоживання (за видами))*

Укладачі: **Дьяков Євген Дмитрович**

Воропай Валентина Григорівна

Відповідальний за випуск *В.М. Охріменко*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *Є. Д. Дьяков*

План 2016, поз. 217 М

Підп. до друку 10. 05. 2016 р.
Друк на ризографі
Тираж 50 пр.

Формат 60×84/16
Ум. друк. арк. 1,4
Зам. №

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4705 від 28.03.2014 р.