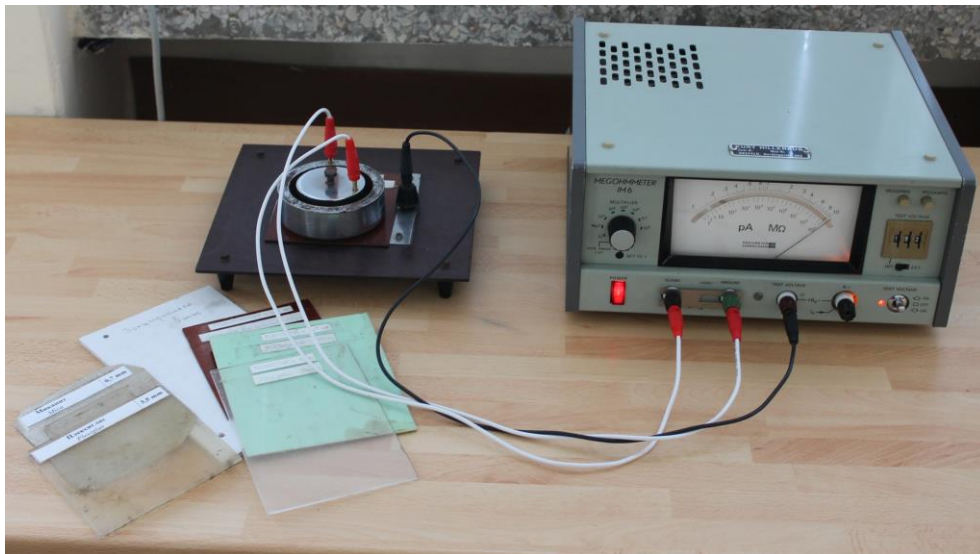


УПРАЖНЕНИЕ № 1

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СПЕЦИФИЧНОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОИЗОЛАЦИОННИ МАТЕРИАЛИ



1.1. Основни понятия и определения

По своето предназначение диелектриците, поставени в неизменящо се във времето електрично поле, не трябва да провеждат електричен ток.

Обаче, както показва опитът, през всички диелектрици под действие на постоянно напрежение U преминава някакъв, обикновено твърде незначителен ток, наречен ток на проводимостта или утечен ток: I_{np} . Електропроводимостта на диелектриците се обуславя от движението по направление на електричното поле на свободни заредени частици.

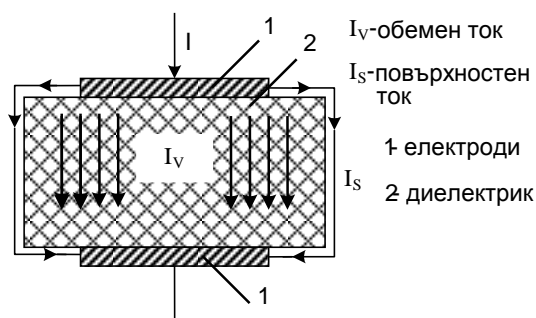
В течните и повечето твърди диелектрици проводимостта е йонна. Йоните могат да бъдат на самия диелектрик и на примесите.

Някои газове и много малък брой твърди диелектрици притежават и електронна проводимост. Електронната проводимост е значителна във всички диелектрици при пробив.

Електричното съпротивление на електроизолационна конструкция $R_{из}$ съгласно закона на Ом е

$$R_{из} = \frac{U}{I_{np}}$$

Под действие на постоянно напрежение, приложено към образец от твърд електроизолационен материал, ток тече през обема (обеман ток I_v) и по повърхността му (повърхностен ток I_s) (фиг. 1.1.). Съответно той притежава *обемно*



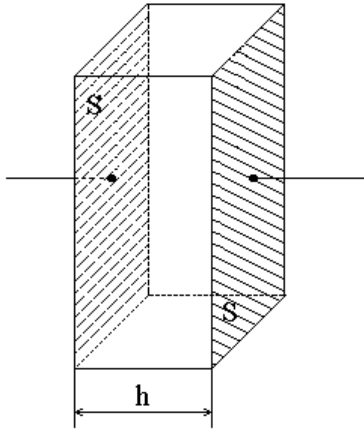
Фиг.1.1

съпротивление R_v и *повърхностно съпротивление* R_s

Обемното и повърхностно съпротивление (R_v и R_s) са характеристики на конкретна електроизолационна конструкция – те зависят от геометрията на изолатора и електродите, посредством които се прилага напрежение, както и от материала и условията на средата – температура, влажност и др.

За характеризиране на веществото по отношение на неговата електропроводимост се въвеждат величините *специфично обемно съпротивление* ρ_v и *специфично повърхностно съпротивление* ρ_s .

Обемното съпротивление на образец от диелектрик с форма на плоскопаралелна пластина, намираща се между 2 успоредни електрода, всеки с площ S и разстояние между тях h (фиг. 1.2), е



Фиг. 1.2

$$R_v = \rho_v \frac{h}{S}, \quad (1.1)$$

откъдето следва

$$\rho_v = \frac{R_v S}{h}. \quad (1.2)$$

Дименсията за специфично обемно съпротивление е $\Omega \cdot \text{m}$.

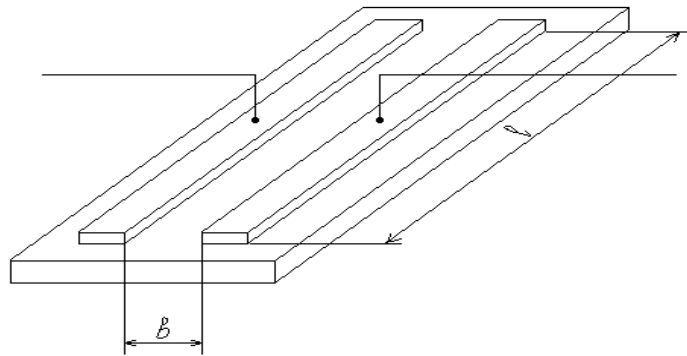
За диелектриците $\rho_v > 10^7 \Omega$.

Съпротивлението на част от повърхността на твърд електроизолационен материал R_s намиращ се между 2 успоредни електрода, всеки с дължина l и разстояние между тях b (фиг. 1.3), е

$$R_s = \rho_s \frac{b}{l}. \quad (1.3)$$

От уравнение (1.3) следва

$$\rho_s = R_s \frac{l}{b}. \quad (1.4)$$



Фиг. 1.3

Дименсията за специфично повърхностно съпротивление е Ω .

Реципрочните стойности на ρ_v и ρ_s се наричат съответно специфична обемна електрична проводимост (γ_v) и специфична повърхностна електрична проводимост (γ_s):

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v}; \quad \gamma_s = \frac{1}{\rho_s}.$$

Дименсиите им са: за $\gamma_v - S/m$; за $\gamma_s - S$. (S - Сименс).

ρ_v и ρ_s , респективно γ_v и γ_s не зависят от геометрията на образеца и електродите, а само от веществото и условията, при които то се намира.

С величините R_s , ρ_s , γ_s се характеризират само твърдите диелектрици.

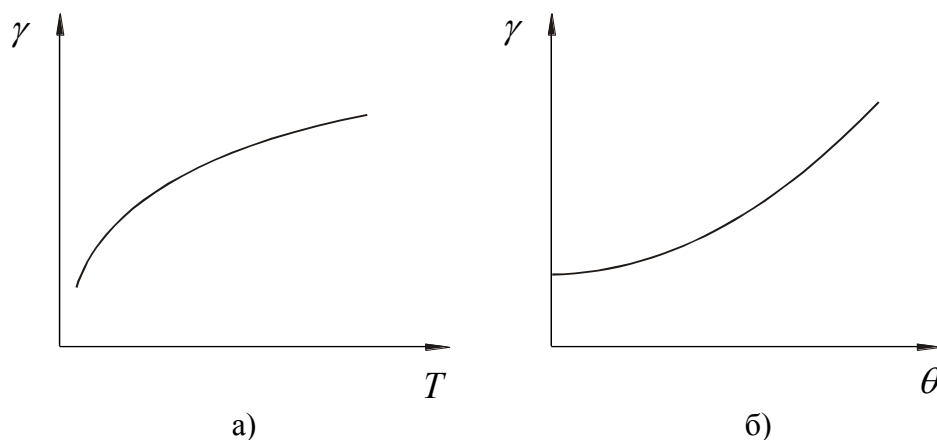
С повишаване на температурата специфичната обемна проводимост на твърдите диелектрици γ_v и специфичната проводимост на течните диелектрици нарастват по експоненциален закон. В практиката са наблюдавани два вида зависимости:

$$\gamma_v = Ae^{-\frac{b}{T}} ; \quad (1.5)$$

$$\gamma_v = \gamma_o e^{\alpha\theta} , \quad (1.6)$$

където А, b и α са постоянни коефициенти за даден диелектрик; T- абсолютна температура; θ - температура в $^{\circ}C$; γ_o - специфична проводимост при $^{\circ}C$.

Графично уравнение (1.5) и (1.6) се представят с криви, изобразени на фиг.1.4.а, б.



Фиг. 1.4

Влиянието на температурата върху твърдите диелектрици се определя от увеличаването на броя на токоносителите (йоните). При течните диелектрици нарастването на γ се дължи на изменение на подвижността* на йоните.

От уравнения (1.5) и (1.6) следват:

$$\rho_v = Be^{\frac{b}{T}} ; \quad (1.7)$$

*Подвижност - отношение на средната скорост, която придобива заредена частица под действие на електрично поле, към интензитета на това поле.

$$\rho_v = \rho_o e^{-\alpha\theta} , \quad (1.8)$$

където:

$$B = \frac{1}{A}; \quad \rho_o = \frac{1}{\gamma_o} ,$$

След експериментално снемане на зависимостите $\rho_v = \rho_v(T)$ или $\rho_v = \rho_v(\theta)$ могат да се определят коефициентите B, b, ρ_o, α въз основа на две измервания при температури T_1 и T_2 (респективно (θ_1, θ_2) , при които са определени специфични съпротивление съответно ρ_{v_1} и ρ_{v_2} :

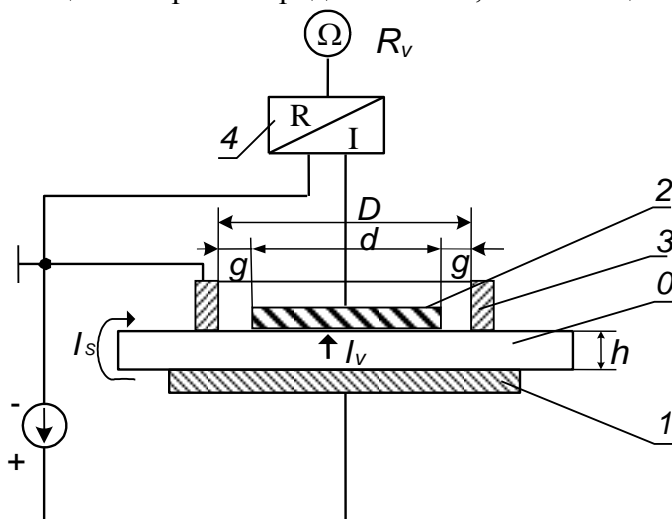
$$b = \frac{\ln \rho_{v_1} - \ln \rho_{v_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}; \quad B = \frac{\rho_{v_1}}{e^{\frac{b}{T_1}}} = \frac{\rho_{v_2}}{e^{\frac{b}{T_2}}} \quad (1.9)$$

Уравнения (1.9) се прилагат, когато графично представената зависимост $\gamma(T)$ е близка до показаната на фиг.1.4 .а.

$$\alpha = \frac{\ln \rho_{v_1} - \ln \rho_{v_2}}{\theta_2 - \theta_1}; \quad \rho_o = \rho_{v_1} e^{\alpha\theta_1} = \rho_{v_2} e^{\alpha\theta_2} \quad (1.10)$$

Уравнения (1.10) са приложими, когато графиката на функцията $\gamma(\theta)$ е близка до показаната на фиг.1.4.б.

При измерване на R_v и R_s на твърди диелектрици двете компоненти на тока (обемн и повърхностен) трябва да се разделят. Това се осъществява с помощта на специална триелектродна система, включваща електродите: 1 - високоволтов



фиг.1.5

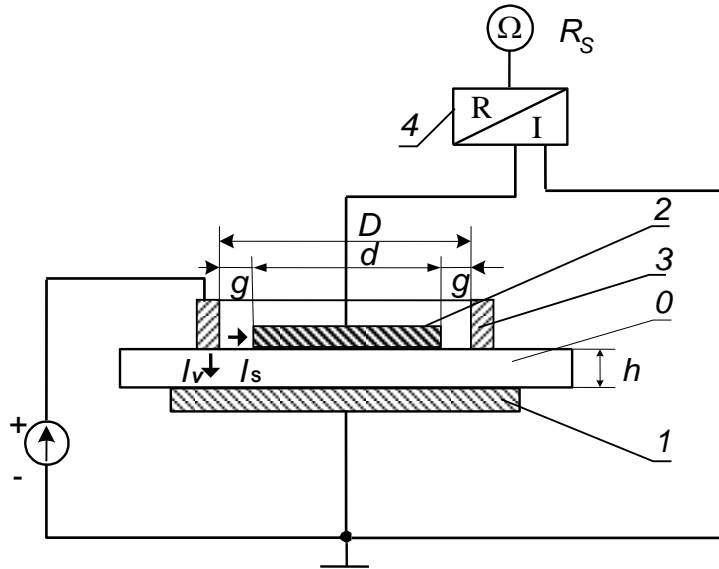
електрод, 2 - измервателен електрод, 3 - защитен електрод. Свързването при измерване съответно на R_v и R_s е посочено на фиг.1.5 и 1.6.

Източникът на постоянно напрежение U трябва да създава в изпитвания образец 0 поле с интензитет от 0,1 до 1 MV/m (kV/mm); 4 е преобразувател ток/съпротивление с индикатор.

За плоскопаралелен образец съгласно означенията на фиг. 1.5 и 1.6 уравнения (1.2) и (1.4) добиват вида

$$\rho_v = \pi \frac{(d+g)^2}{4h} R_v; \rho_s = \pi \frac{(d+g)}{g} R_s, \quad (1.11)$$

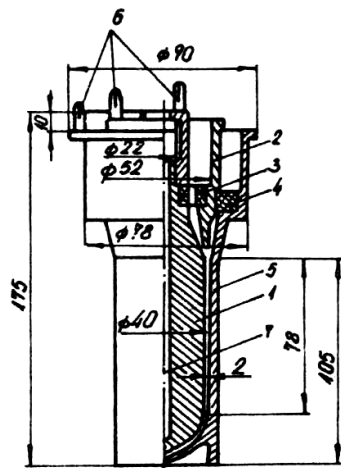
където $g = 0.5 (D-d)$.



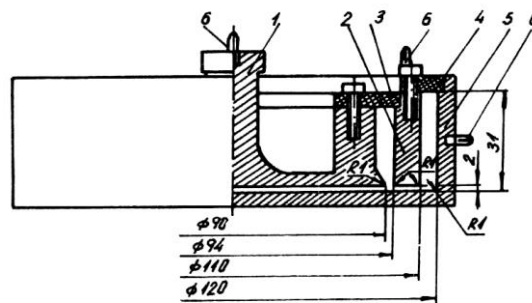
фиг.1.6

За измерване на съпротивлението R на течни диелектрици се използват три или двуелектродни системи.

На фиг. 1.7 и 1.8 са представени две модификации на триелектродни системи. Въведени са следните означения: 1- измервателен електрод; 2 - защитен електрод; 3 и 4 - дистанциониращи изолационни елементи; 5 - високоволтов електрод; 6 - цифрове за присъединяване на електродите към измервателната апаратура; 7 - отвор за термометър или термодвойка.

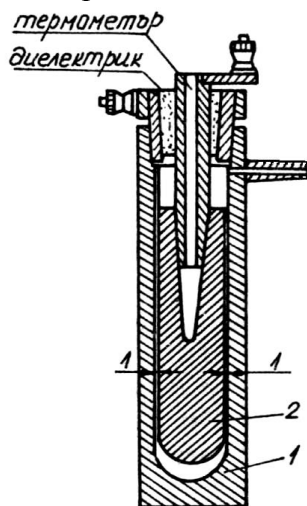


фиг. 1.7

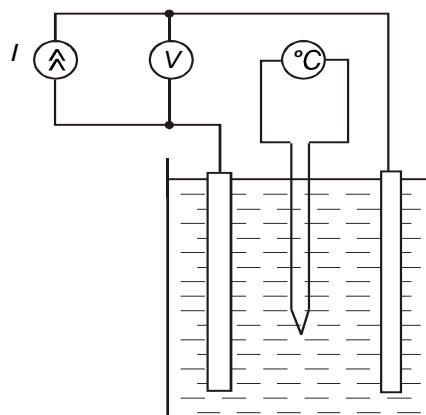


фиг. 1.8

На фиг.1.9 е показана двуелектродна система - 1 е високоволтов електрод; 2 - измервателен електрод.



фиг. 1.9



фиг 1.10

Специфичното съпротивление се определя от уравнението

$$\rho = \frac{RC_o}{\epsilon_o} \quad (1.12)$$

където R е измерено съпротивление в Ω ; C_o - капацитет на електродната система без диелектрик – вакуум (въздух) в pF ; ϵ_o - електрична константа: $8,85 pF/m$.

При измерване се избира такова изпитвателно напрежение, че интензитетът на електричното поле да е $0,25 kV/mm$.

Особено лесно се получава зависимостта $R(\theta)$ или $R(T)$, респективно $G(\theta)$ или $G(T)$ ($G= 1/R$) за диелектрик с невисоко електрично съпротивление, например вода. Макар, че не е електроизолационен материал, като диелектрик тя се подчинява на разгледаните закономерности. Използва се опитна постановка, схематично представена на фиг.1.10.

Съпротивлението R и проводимостта G се определят по закона на Ом:

$$R = \frac{U}{I}; G = \frac{I}{U} \quad (1.13)$$

G и R се подчиняват на уравнения аналогични на (1.5) или (1.6), (1.7) или (1.8):

$$G = A'e^{-\frac{b}{T}} \quad (1.14)$$

$$G = G_o e^{\alpha\theta}; \quad (1.15)$$

$$R = B'e^{\frac{b}{T}}; \quad (1.16)$$

$$R = R_o e^{-\alpha\theta}; \quad (1.17)$$

Според вида на зависимостите $G(T)$ и/или $G(\theta)$, представени графично и сравнени с фиг.1.4.а,б, се определят b и B' или α и R_0 по уравнения, подобни на 1.9 и 1.10

$$b = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}; B' = \frac{R_1}{e^{\frac{1}{T_1}}} = \frac{R_2}{e^{\frac{1}{T_2}}}; \quad (1.18)$$

$$\alpha = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\theta_2 - \theta_1}; R_0 = R_1 e^{\alpha \theta_1} = R_2 e^{\alpha \theta_2}; \quad (1.19)$$

1.2. Задача за изпълнение

1. Определяне на специфичното обемно и специфичното повърхностно съпротивление на твърди електроизолационни материали.
2. Определяне на специфичното съпротивление на течни електроизолационни материали.
3. Изследване влиянието на температурата върху специфичното съпротивление на твърди електроизолационни материали.
4. Определяне на специфичното съпротивление на течни електроизолационни материали при различни температури.
5. Изследване влиянието на температурата върху съпротивлението (проводимостта) на течен диелектрик.

1.3. Методични указания за провеждане на изпитванията

По точки 1 и 2 от заданието

Триелектродната система се свързва по схемите от фиг.1.5, 1.6 с тераомметър ИС1. Той съдържа източник на напрежение и преобразувател ток/съпротивление с индикатор. Уредът е готов за работа 20 минути след включване.

Измерват се R_V и R_S на предоставените твърди електроизолационни материали. Отчитането се осъществява 1 минута след подаване на изпитвателното напрежение. Изчисляват се ρ_V и ρ_S по уравнения (1.11).

Определят се медианите Me_{ρ_V} и Me_{ρ_S} на ρ_S и ρ_V въз основа на данните, получени от измерването на различни образци от един и същ електроизолационен материал.

Медиана на дадена случайна величина се нарича точката, която дели интервала на изменение на величината на две части така, че вероятността за попадане на отделните стойности в тях да бъде една и съща, равна на 0,5.

Медианата се определя по следния начин:

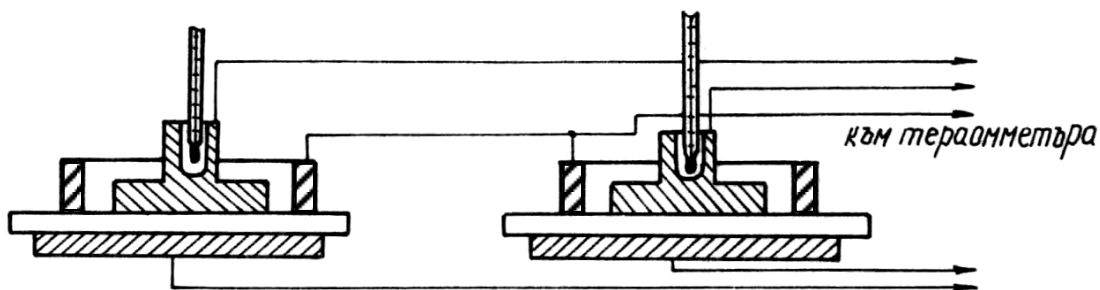
Стойностите на ρ_V (респективно на ρ_S) на отделните образци се подреждат във възходящ ред (вариационен ред) и се номерират от 1 до n . При нечетен брой образци медианата е равна на специфичното съпротивление на образца с номер $\frac{n+1}{2}$. При

четен брой образци медианата е равна на средногеометричната стойност на резултатите с номера $\frac{n}{2}$ и $\frac{n}{2} + 1$.

За определяне на специфичното съпротивление на течни електроизолационни материали триелектродни системи с течни диелектрици (фиг.1.7, 1.8) се свързват към тераометър по схема, аналогична на показаната на фиг.1.5. Измерва се R и се изчислява ρ по уравнение (1.12)*

По точка 3 от заданието

Схемата на опитната постановка е посочена на фиг.1.11.



фиг. 1.11

Двете триелектродни системи с изпитваните образци се поместват в термостат. Защитните електроди се свързват директно със заземителната клемма на тераометъра. За всяка една температура последователно се включват към клемми R_x на тераометъра високоволтовият и измервателният електрод на триелектродните системи.

Измерват се обемните съпротивления на двата образеца във функция от температурата $R_v = R_v(\theta)$.

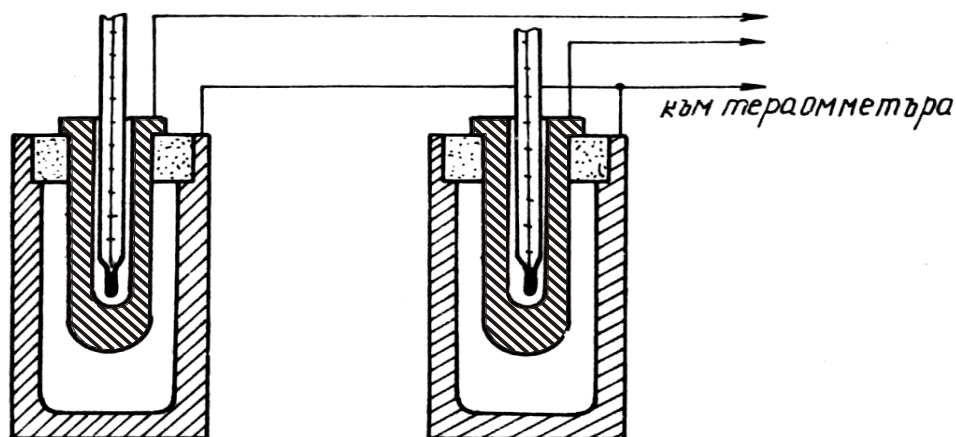
Изчисляват се ρ_v [по първото от уравнения (1.11)] и $\gamma_v = 1/\rho_v$ представя се графично зависимостта $\gamma_v = \gamma_v(\theta)$ и се сравнява с чертежите на фиг.1.4.а,б. В зависимост от вида ѝ се определят коефициентите b и B по уравнения (1.9) или α и ρ_o по уравнения (1.10). Получените числени стойности за b и B или α и ρ_o се заместват в уравнения 1.7 или 1.8 и чрез тях се изчисляват стойностите на $\hat{\rho}_v$ за температурите, при които са извършени измерванията. За всяка температура се определя относителната разлика между ρ_v и $\hat{\rho}_v$ по уравнението

$$\delta = \frac{|\rho_v - \hat{\rho}_v|}{\rho_v} \cdot 100\% .$$

* R и ρ са обемно съпротивление и специфично обемно съпротивление, но индексът v е пропуснат, тъй като течните диелектрици не се характеризират с повърхностно съпротивление. По същата причина в по-нататъшното изложени проводимостта и специфичната проводимост на течни диелектрици (G и γ) се означават без индекс.

По точка 4 от заданието:

Схемата на опитната постановка е посочена на фиг.1.12.



фиг. 1.12

Две двуелектродни системи за изпитване на течни електроизолационни материали с изследваните диелектрици се поместват в термостат. Високоволтовите им електроди се свързват с клемата „+” на тераомметър, а измервателните електроди в хода на измерването за всяка температура последователно се включват към клемата „-”.

Измерват се изолационните съпротивления на изпитваните течни електроизолационни материали.

Определят се стойностите на ρ по уравнение (1.12) и $\gamma = \frac{1}{\rho}$. Представя се графично зависимостта $\gamma = \gamma(\theta)$ и според вида ѝ по-нататъшната обработка на данните се извършва както в точка 3 от заданието.

По точка 5 от заданието

Изследва се съпротивлението R , респективно проводимостта G на вода във функция от температурата чрез опитна постановка, чиято схема е показана на фиг.1.10. Построява се графично функцията $G(\theta)$ и в зависимост от вида ѝ се определят величините b и B' по уравнения (1.18) или α и R_0 по уравнения (1.19). Получените стойности се заместват в уравнение (1.16) или (1.17) и по него се изчислява \hat{R} за температурите, при които са извършени измерванията. Определя се относителната разлика между R и \hat{R} по уравнението

$$\delta = \frac{|R - \hat{R}|}{R} \cdot 100\% .$$

1.4. Тест за самопроверка

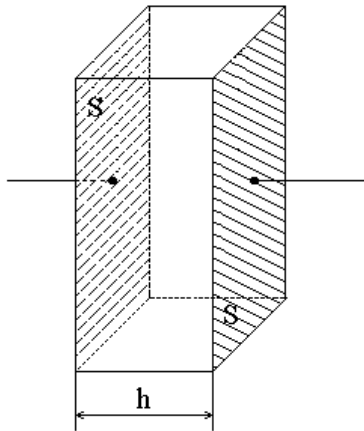
1. Зависят ли обемното съпротивление R_v , повърхностното съпротивление R_s , специфичното обемно съпротивление ρ_v и специфичното повърхностно съпротивление ρ_s от геометрията на образците и електродите за измерване?

- а) R_v и R_s зависят, ρ_v и ρ_s не зависят
- б) R_v и ρ_v зависят, R_s и ρ_s не зависят
- в) Да, зависят.
- г) Не зависят

2. Кои материали се характеризират с повърхностно съпротивление?

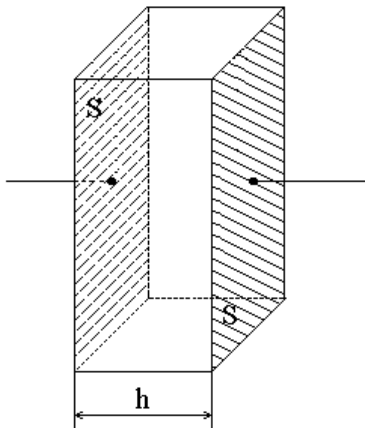
- а) Само твърдите диелектрици.
- б) Твърдите и течни диелектрици
- в) Твърдите диелектрици и твърдите проводници

3. Посочете правилното уравнение за обемно съпротивление R_v на диелектрик. (S - площ на електродите, посредством които се прилага напрежение; h - разстояние между електродите; ρ_v - специфично обемно съпротивление).



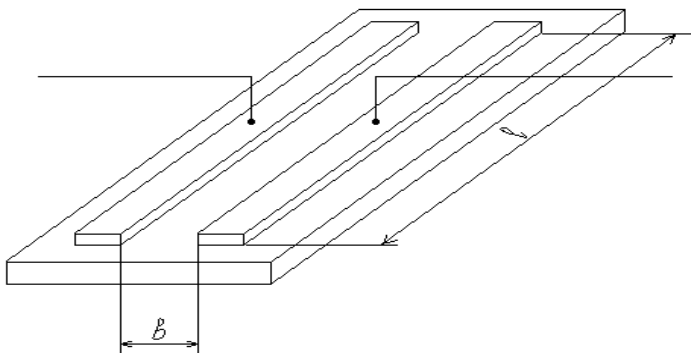
- а) $R_v = \frac{1}{\rho_v} \frac{h}{S}$
- б) $R_v = \rho_v \frac{S}{h}$
- в) $R_v = \rho_v \frac{h}{S}$
- г) $R_v = \frac{1}{\rho_v} \frac{S}{h}$

4. Кое е правилното уравнение за специфично обемно електрично съпротивление ρ_v на диелектрик? (S - площ на електродите, посредством които се прилага напрежение, h - разстояние между електродите, R_v - обемно електрично съпротивление)?



- а) $\rho_v = \frac{1}{R_v} \frac{S}{h}$
- б) $\rho_v = R_v \frac{S}{h}$
- в) $\rho_v = R_v \frac{h}{S}$
- г) $\rho_v = \frac{1}{R_v} \frac{h}{S}$

5. Посочете правилното уравнение за повърхностно електрично съпротивление R_s на диелектрик (l - дължина на електродите, посредством които се прилага напрежение b - разстояние между тях; ρ_s - специфично повърхностно съпротивление).



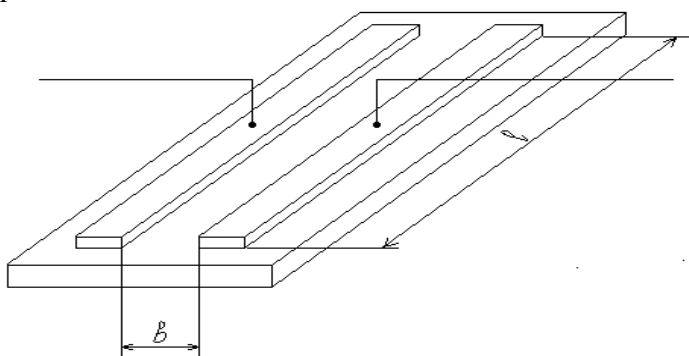
а) $R_s = \frac{1}{\rho_s} \frac{l}{b}$

б) $R_s = \rho_s \frac{b}{l}$

в) $R_s = \rho_s \frac{l}{b}$

г) $R_s = \frac{1}{\rho_s} \frac{b}{l}$

6. Кое е правилното уравнение за специфичното повърхностно електрично съпротивление ρ_s на диелектрик? (l - дължина на електродите, посредством които се прилага напрежение; b - разстояние между тях; R_s - повърхностно електрично съпротивление).



а) $\rho_s = R_s \frac{b}{l}$

б) $\rho_s = R_s \frac{l}{b}$

в) $\rho_s = \frac{1}{R_s} \frac{b}{l}$

г) $\rho_s = \frac{1}{R_s} \frac{l}{b}$

7. Коя е дименсията за специфично повърхностно електрично съпротивление ρ_s ?

а) Ω ; б) $\Omega \cdot m$; в) $\frac{\Omega}{m^2}$; г) $\Omega \cdot m^2$.

8. Коя е дименсията за специфично обемно електрично съпротивление ρ_v ?

а) Ω ; б) $\Omega \cdot m$; в) $\frac{\Omega}{m}$.

Какво означава с g ?

- а) Разстояние между цилиндричния пръстеновидния електрод.
- б) Дебелина на образца.
- в) Диаметър на цилиндричния електрод.
- г) Вътрешен диаметър на пръстеновидния електрод.

13. Получени са следните стойности на специфичното обемно съпротивление ρ_v за пет образца от електроизолационен материал:

$$\rho_v = 5,1 \cdot 10^9 \Omega \cdot m ; 4,9 \cdot 10^{10} \Omega \cdot m ; 3,1 \cdot 10^9 \Omega \cdot m$$

$$4,2 \cdot 10^9 \Omega \cdot m = \Omega \cdot m ; 9 \cdot 10^9 \Omega \cdot m .$$

Посочете медианата на ρ_v .

а) $Me\rho_v = 5,1 \cdot 10^9 \Omega \cdot m$

б) $Me\rho_v = 9 \cdot 10^9 \Omega \cdot m$

в) $Me\rho_v = 4,9 \cdot 10^{10} \Omega \cdot m$

г) $Me\rho_v = 3,1 \cdot 10^9 \Omega \cdot m$

14. Посочете уравнението, изразяващо зависимостта на специфичната електрична проводимост γ на течни диелектрици от температурата T (или θ). (γ_0 - специфична електрична проводимост при температура 0°C ; A , a , α - постоянни коефициенти, характерни за дадена течност).

а) $\gamma = \gamma_0 e^{-\alpha\theta}$;

б) $\gamma = \gamma_0 e^{\frac{\alpha}{\theta}}$;

в) $\gamma = Ae^{-\frac{a}{T}}$;

г) $\gamma = Ae^{\frac{a}{T}}$.