

Omaa, ohjelmoitavaa laskinta saa käyttää.

Hyväksytyyn tulokseen vaaditaan vähintään 2 pistettä vähintään neljästä eri tehtävästä sekä yhteensä vähintään 12 pistettä.

1. Anodille tulevan virran on Townsend-tyyppisessä purkauksessa todettu noudattavan yhtälöä

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1)$$

ja kertoimelle  $\alpha$  pätee  $\alpha = Ap \cdot e^{-Bpd/U}$  (2)

a) Kerro pääpiirteissään, mistä lähtöoletuksista saat johdettua yhtälön läpilyöntijännitteelle Townsend-tyyppisessä läpilyönnissä? (ei tarvitse johtaa) (2 p.)

b) Eräässä koejärjestelyssä tutkittiin Townsend-mekanismilla tapahtuvaa läpilyöntiä. Säädetävän testielektrodivälin sisältävässä kaasusäiliössä oli ilmaa 10 kPa paineessa. Elektrodien välin ollessa 1 cm tapahtui elektrodivälissä läpilyönti 5 kV:n jännitteellä. Laske, mikä olisi läpilyöntijännite samalla paineella samassa elektrodivälissä, kun elektrodien etäisyydeksi säädetään 2 cm. Ilmalle kertoimet  $A$  ja  $B$  ovat  $A=11,3 \text{ Pa}^{-1}\text{m}^{-1}$  ja  $B=275 \text{ V} \cdot \text{Pa}^{-1}\text{m}^{-1}$ . (4 p.)

(Huom! Pisteet tulevat laskutoimituksesta, ei pelkästä tuloksesta, vaikka se olisi oikeinkin.)

2. a) Selosta lyhyesti fysikaaliset ilmiöt, joiden voimakkuutta edellä olevassa yhtälössä (1) esiintyvät kertoimet  $\alpha$  ja  $\gamma$  kuvaavat. (2 p.)

b) Selosta, missä olosuhteissa ilmaeristysvälin läpilyönti voi tapahtua puhtaalla Townsend-mekanismilla? Milloin läpilyöntimekanismi eroaa Townsend-läpilyönnistä ja miksi? (3 p.)

c) Miten elektrodien napaisuus vaikuttaa ilmaelektrodivälin läpilyöntijännitteen suuruuteen puhtaassa Townsend-tyyppisessä läpilyönnissä? (1 p.)

3. Tarkastellaan normaalipaineiseen SF<sub>6</sub>-kaasuun suljettua, kahdesta eri materiaalista (sisäkkäin) valmistettua lieriöeristysrakennetta, jossa sisäelektrodin säde  $r_s$  on 10 mm ja ulkosäde  $r_u$  on 32 mm. Eristekerrosten paksuudet on valittu siten, että koko eristysvälin yli vaikuttava jännite jakautuu näiden kahden eri kerroksen yli suunnilleen tasan. Eristysmateriaalien suhteelliset permittiviteetit ovat 4 ja 2,25. Eristysrakenteen valmistusvaiheessa eristekerrosten rajalle on johonkin kohtaan jäänyt pieni litteä SF<sub>6</sub>-kaasun täyttämä rako. Oletetaan kaasuraon paksuudeksi n. 0,2 mm ja raon sisältävän SF<sub>6</sub>-kaasua normaalipaineessa.

a) Millä säteen arvolla eristysmateriaali vaihtuu toiseen? (3 p.)

b) Arvioi, millä koko eristysrakenteen yli olevan vaihtojännitteen tehollisarvolla alkavat jännitettä nostettaessa osittaispurkaukset tässä kaasuraossa? Laita näkyviin laskutoimitukset, joilla päädyit arvioosi. (3 p.)

4. a) Selosta, miten permittiviteetti kuvaa eristeen ominaisuuksia ja käyttäytymistä sähkökentässä. Mihin eristerakenteissa tapahtuviin ilmiöihin permittiviteetti liittyy ja miten? (3 p.)

b) Selosta millaisilla laitteistoilla voidaan mitata  $\tan\delta$ , mitä  $\tan\delta$  arvo ilmaisee ja mihin ko. mittausta voidaan käyttää? (3 p.)

5. Purjeveneen reitillä on alitettava 220 kV:n johto, jonka johtimien lyhin etäisyys purjeveneen mastosta on 3 m. Ylilyöntijännitteen voi olettaa olevan normaalijakautunut ja hajonta on 8%. Tarkasteltavan johdin-masto-elektrodirakenteen muotokerroin  $k=1,6$ . (3 p.)

a) Kuinka suuri on johto-masto-välin 0,1 % läpilyöntitodennäköisyyttä vastaava jännite?

b) Selosta mistä seikoista, miten ja miksi riippuu pitkän ilmavälin (useita metrejä) läpilyöntijännite. (3 p.)

Tehtäväpaperin kääntöpuolella on ja normaalijakauman todennäköisyyspaperi.

Ohessa on myös toinen paperi, jossa on opintojaksoon sisältöön liittyvä yhtälöitä ja Paschen-käyrät ilmalle ja SF<sub>6</sub>-kaasulle.



Normaalijakauman todennäköisyyspaperi.

Opintojaksoon DEE-23060 liittyviä yhtälöitä. Kääntöpuolella on Paschen-käyrät ilmalle ja SF<sub>6</sub>-kaasulle.

$$\Psi = \int_A \bar{D} \cdot \bar{u}_n dA = \int_V \rho dV = Q$$

$$\Phi_E = \int_A \bar{E} \cdot \bar{u}_n dA = \frac{Q}{\epsilon}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\nabla \cdot \bar{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho$$

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E}$$

$$\bar{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon \angle -\delta$$

$$\nabla \times \bar{E} = 0$$

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

$$\alpha = A p e^{-B p / E}$$

$$Q_c = \omega \epsilon_r C_0 U^2$$

$$P_d = \omega \epsilon_r \tan \delta C_0 U^2$$

Normaalijakauman summafunktio:

$$F(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz = \Phi(x) \quad , \text{ missä } x = \frac{U - U_{50\%}}{s} \quad \text{ja } s = U_{50\%} - U_{16\%}$$

Normaalijakautuneella suureella todennäköisyyttä  $p$  vastaava arvo voidaan arvioida keskiarvosta ja hajonnasta  $s$  oheisen taulukon avulla.

$$U_p = U_{50\%} - ks$$

$p/\%$	50	16	10	1	0,1
$k$	0	1	1,3	2,3	3,3

$$U_{50\%,LI} = (380 + 150k)d \text{ kV}$$

$$d_{LI} = \frac{U_{10LI}}{0,961 \cdot (0,74 + 0,26 \cdot k) 530} \quad [d] = m$$

$$U_{50\%,SI} = k \cdot \frac{3400}{1 + \frac{8}{d}} \text{ kV}$$

tai

$$U_{50\%,SI} = k \cdot 500 d^{0,6} \text{ kV,}$$

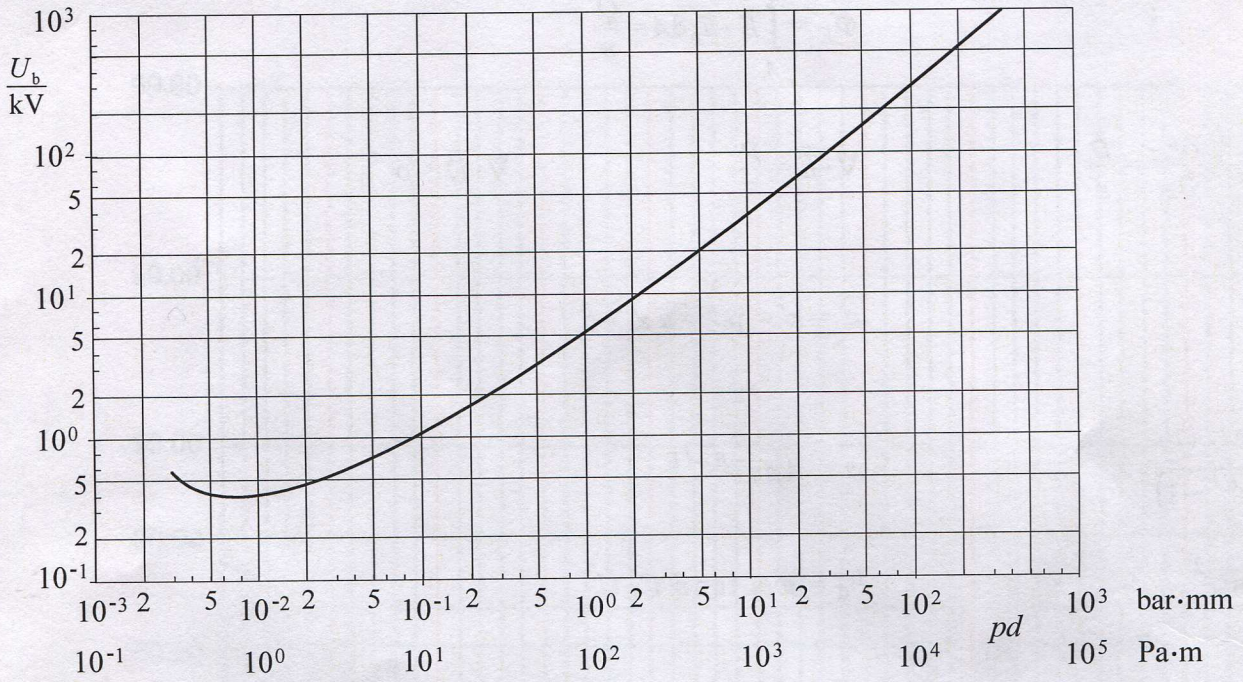
$$d_{SI} = 2,174 \cdot \left[ \exp\left(\frac{1,05 U_{e2}}{0,922 \cdot k \cdot 1080}\right) - 1 \right],$$

$$\exp(x) = e^x$$

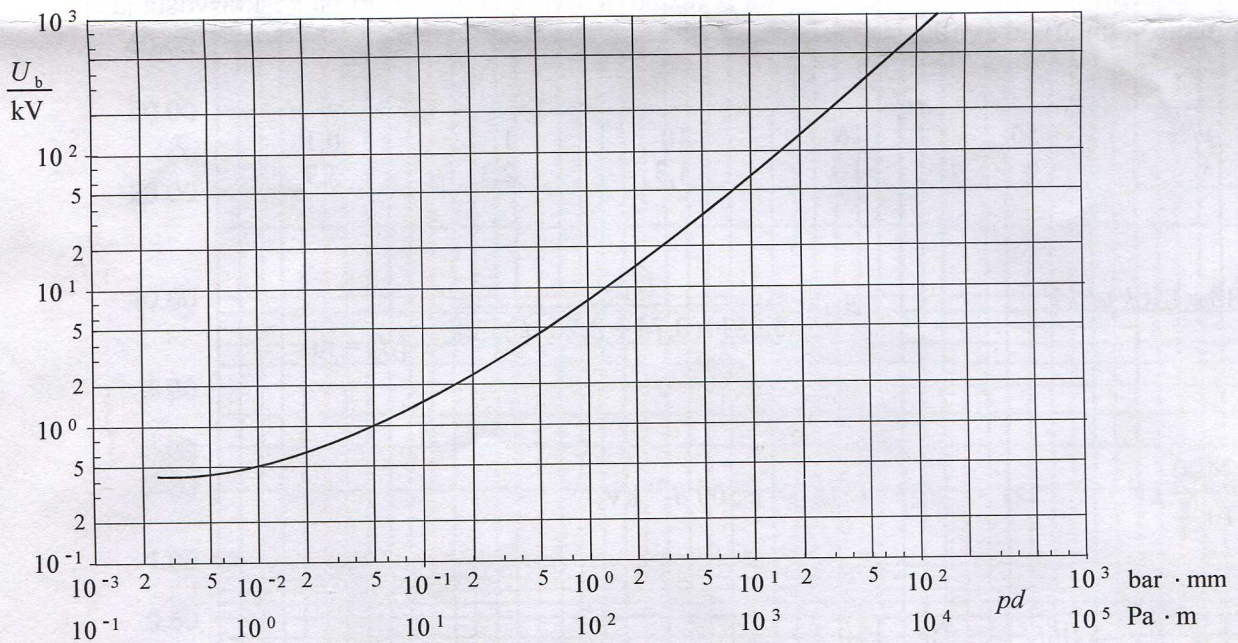
missä  $U_{e2}$  on tilastollinen 2% todennäköisyydellä esiintyvä ylijännite

$$\hat{U}_{50\%,AC} = 1,1 \cdot U_{50\%,SI}$$

$$d_{AC} = 1,64 \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_m}{750 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,91 \cdot k(1,35 - 0,35k)}\right) - 1 \right]^{0,83}$$



*Paschen käyrä ilmalle.*



*Paschen käyrä SF<sub>6</sub>-kaasulle.*