

SAVUN JA KOSTEUDEN VAIKUTUS ELEKTRONIIKKAPIIREIHIN

Johan Mangs & Olavi Keski-Rahkonen
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
PL 1803, 02044 VTT

TIIVISTELMÄ

Savun, kosteuden sekä näiden yhteistä äkillistä vaikutusta elektroniikkapiireihin on tutkittu FINNUS-ohjelman paloturvallisuustutkimusprojektissa (FISRE) vuosina 1999 - 2002. Todellinen piirikortti sekä mallipiirejä, johdeliuskojen muodostamia kampakuvioita sekä yhdensuuntainen reikälevyperi, altistettiin joko pelkästään savulle tai kosteudelle tai molemmille yhtä aikaa. Pelkkä kosteus aiheutti samansuuruista eristysvastuksen vähentymistä kuin pelkkä savu. Kosteus ja savu yhdessä aiheuttivat selvästi suuremman eristysvastuksen häviön. Sekä kosteus yksinään että yhdessä savun kanssa aiheuttivat läpilyönnin kampakuvioissa ja oikosulun. Savuhiukkasten laskeutumista sekä savun ja kosteuden vaikutusta kampakuvioiden eristysvastukseen kuvaavia malleja on työssä myös ehdotettu.

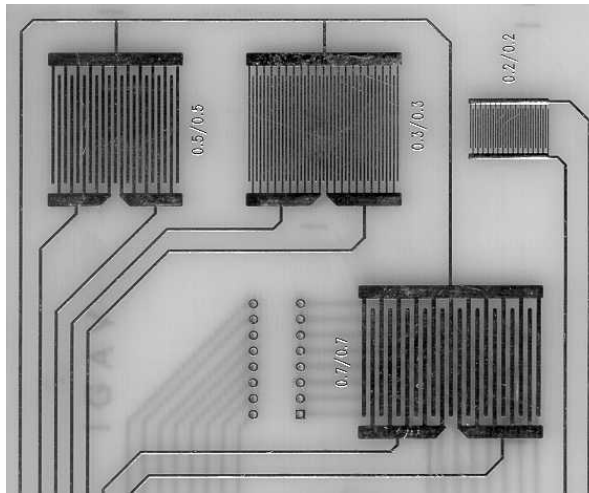
JOHDANTO

Savu on kaasumaisten palamistuotteiden ja pienten neste- tai jähmeiden hiukkasten seos, aerosoli, jonka kemiallinen koostumus ja hiukkaskokojakauma riippuu palaneesta materiaalista ja ympäristöolosuhteista. Pääosa hiukkasista (noesta) on hiiltä. Savu (noki) keräytyy laskeutumalla tai muilla prosesseilla pinnoille ja muodostaa sähköisesti johtavan kalvon, joka saattaa häiritä herkkiä elektronisia piirejä.

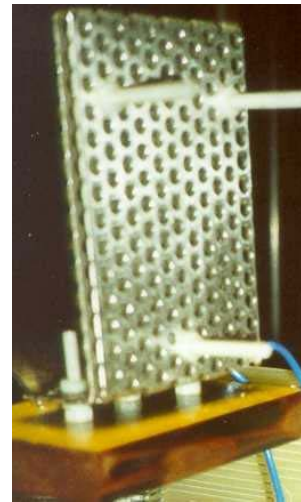
Tulipaloympäristössä suuri kosteus voi syntyä seuraavista syistä tai niiden yhdistelmästä: kosteus tulipalon palamistuotteena, savutuuletukseen käytetyn ilman suuri kosteus ja palontorjunnassa käytetyn sammutusveden tuoma kosteus. Kosteus huonontaa sähköisten virtapiirien toimintaa, sillä pintojen likaantuminen kosteassa ilmassa heikentää huomattavasti vierekkäisten johtimien eristysvastusta. Kosteus kasvattaa suuresti savun aiheuttamaa vahinkoa elektroniikkapiireihin [1]. Kosteassa ilmassa vesi yhdistyy suoloihin (esim. $ZnCl_2$), jotka muodostuvat, kun savun happamat kaasut ja elektroniikan mekaanisessa rakenteessa tai juotoksissa olevat metallit, kuten lyijy ja sinkki, reagoivat keskenään. Näiden suolaliuosten sähkönjohtavuus saattaa olla korkeampi kuin pelkän suolan kuivassa ympäristössä tai kostean ympäristön ilman savua [1]. Savu vahvistaa siten kosteuden vaikutusta vuotovirtoja kasvattaen.

KOKEITA

Kokeet suoritettiin muunnetussa standardisavukaapissa [2, 3]. Mallipiirejä, johdeliuskojen muodostamia kampakuvioita sekä yhdensuuntainen reikälevyperi (kuva 1), altistettiin joko pelkästään savulle tai kosteudelle tai molemmille yhtä aikaa. Savua tehtiin kartiosäteilijällä lämmitetystä kytevästä PVC-muovinäytteestä savukaapissa ja kosteuskokeissa vesihöyryä johdettiin savukaappiin sähkövastuksella lämmitetystä astiasta. Kampakuviot olivat kokeissa tarkoituksella paljaat ilman suoja-pinnoitetta. Yksi koe suoritettiin kaupallisen ohjausjärjestelmän piirikortilla.



a)



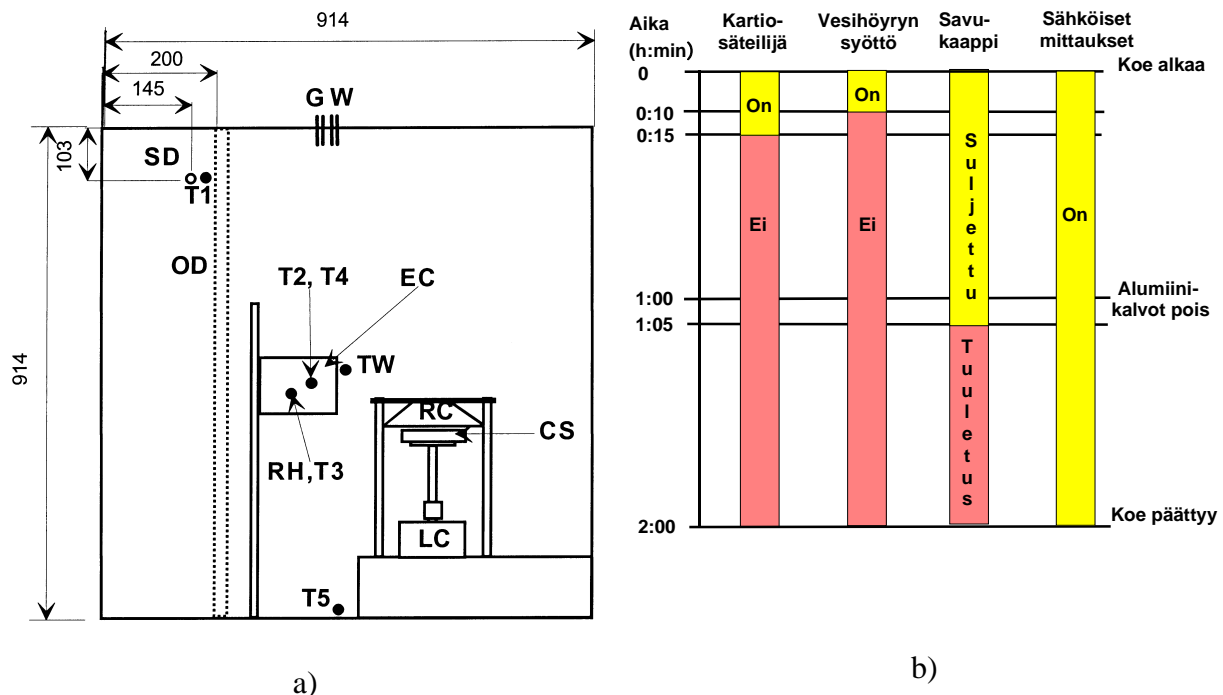
b)

Kuva 1. Elektronisia mallipiirejä joita altistettiin joko pelkästään savulle tai kosteudelle tai molemmille yhtä aikaa. a) johdeliuskojen muodostamia kampakuvioita ja b) yhdensuuntainen reikälevyperi.

Savukaapissa tehtiin seuraavat mittaukset:

- Savun tiheys polykromaattisen valon vaimennuksesta, josta saa savun massapitoisuuden
- Eristysvastus
- Kosteus
- Säteilytetyn PVC-muovinäytteen massa
- Savun laskeuma alumiinikalvoille
- Lämpötiloja
- Kaasujen pitoisuuksia

Kuvassa 2 esitetään koelaitteisto kaavamaisesti sekä kokeiden aikajana.



Kuva 2. a) Koejärjestely savukaapissa kaavamaisesti, edestä. EC elektroninen mallipiiri, RC kartiosäteilijä, LC vaaka, CS kaapelinäyte, OD optisen tiheyden mittaus valon vaimenemisesta, SD savun laskeuman mittaus pysty- ja vaakakalvoista, T1...T3 ja T5 kaasun lämpötiloja, T4 piirilevyn pintalämpötila, TW savukaapin seinän lämpötila, RH suhteellinen kosteus, G kaasunäytteen otto, W vesihöyryn syöttö. b) Kokeiden aikajana.

TULOKSIA

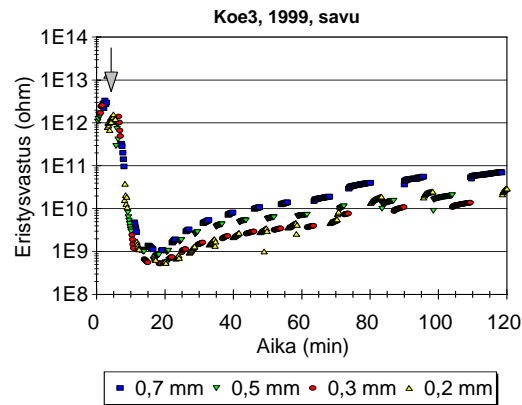
Altistuksen vaikutus kampakuvioihin ja kaupalliseen piirikorttiin

Altistuminen pelkästään kytevä PVC-kaapelin vaippanäytteen savulle aiheutti suurimmillaan 2...4 dekadin pudotuksen kampakuvioiden eristysvastuksessa (kuva 3a).

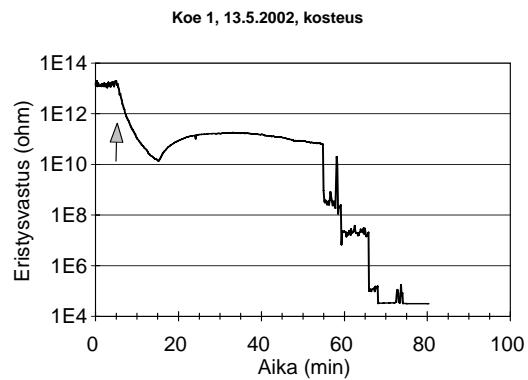
Altistuminen pelkästään kosteudelle aiheutti samansuuruisen eristysvastuksen maksimipudotuksen, 3...3,5 dekadia (kuva 3b). Kosteus pelkästään vaikutti yhdessä kokeessa hyvin voimakkaasti piirilevymateriaaliin johtaen läpilyöntiin 50 min vesihöyryn syötön alkamisesta, ja lopullisesti oikosulkuun (kuva 3b). Kyseinen piiri oli altistunut aikaisemmin pelkälle savulle 11 kokeessa ilman oikosulkua. Altistuminen pelkälle kosteudelle ei aiheuttanut oikosulkua aiemmin altistumattomassa piirilevyssä, mutta kampakuvion eristysvastus palautui huonosti tuuletuksen jälkeen. Sama piirikortti altistettiin kosteuden ja savun yhdistelmälle seuraavassa kokeessa, jolloin läpilyönti tapahtui 40,8 min vesihöyryn syötön ja kaapelinäytteen säteilytyksen alkamisesta (kuva 3c).

Altistuminen sekä kosteudelle että savulle aiheutti 5 dekadin maksimipudotuksen eristysvastuksessa ennen läpilyöntiä (kuva 3c).

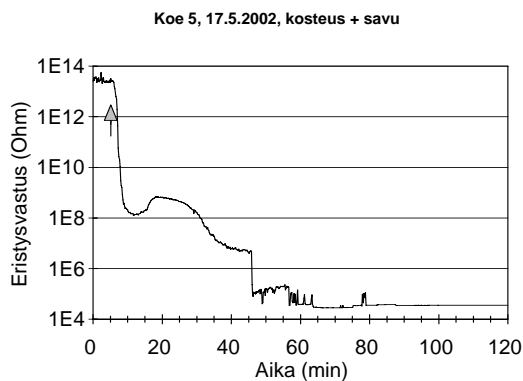
Altistuminen pelkästään savulle ei aiheuttanut oleellisia muutoksia kaupallisen piirikortin eristysvastuksessa riittävästä suojapinnoituksesta johtuen (kuva 3d).



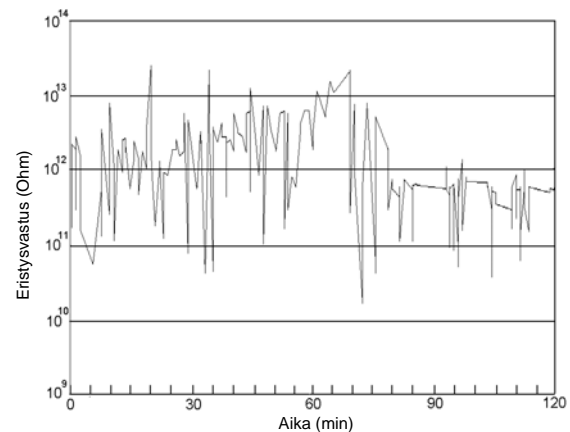
a)



b)



c)



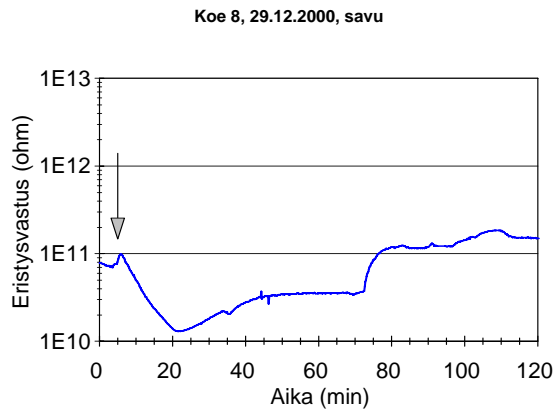
d)

Kuva 3. Altistuksen vaikutus kampakuvioiden eristysvastukseen, a) 0,2 mm - 0,7 mm kuvioiden altistus savulle, b) 0,2 mm kuvion altistus kosteudelle, läpilyönti alkaa 55 min kohdalla, c) 0,2 mm kuvion altistus kosteudelle ja savulle, läpilyönti alkaa 45,8 min kohdalla ja d) kaupallisen piirikortin altistus pelkälle savulle. Kaapelinäytteen säteilytys ja/tai altistus kosteudelle alkaa 5 min kohdalla (nuoli).

Altistuksen vaikutus yhdensuuntaiseen reikälevypariin

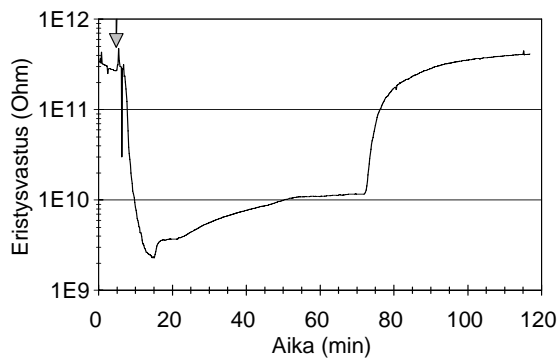
Altistuminen pelkästään kytevä PVC-kaapelin vaippanäytteen savulle aiheutti suurimmillaan 0,5...1 dekadin pudotuksen yhdensuuntaisen reikälevyparin eristysvastuksessa (kuva 4a). Kosteus yksinään aiheutti vastaavasti noin yhden dekadin eristysvastuksen pudotuksen (kuva 4b). Altistuminen sekä kosteudelle että savulle kasvatti eristysvastuksen maksimipudotuksen kahteen dekadiin (kuva 4c).

Kaapelin eristysvaipasta otettu näyte syttyi palamaan liekillä yhdessä kokeessa ja tuotti paljon enemmän nokea muihin kokeisiin verrattuna. Tämä aiheutti nokiviiksien kasvamisen reikälevyjen väliin, minkä johdosta eristysvastus heikkeni viisi dekadia (kuva 4d). Viiksien kasvu oli paljon voimakkaampi ja nopeampi liekehtivän palon aikana kuin kytevä palon, mikä saattaa vaikuttaa huomattavasti sähkömekaanisiin laitteisiin.

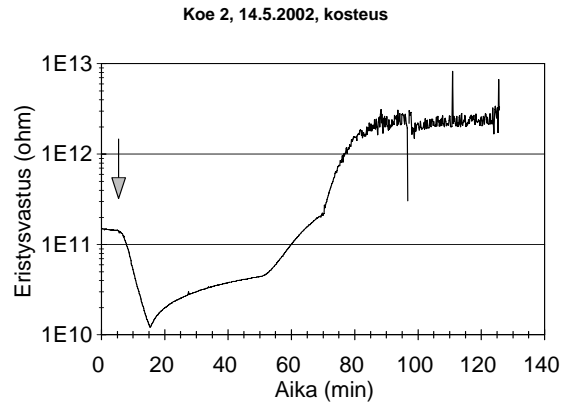


a)

Koe 3, 15.5.2002, kosteus + savu

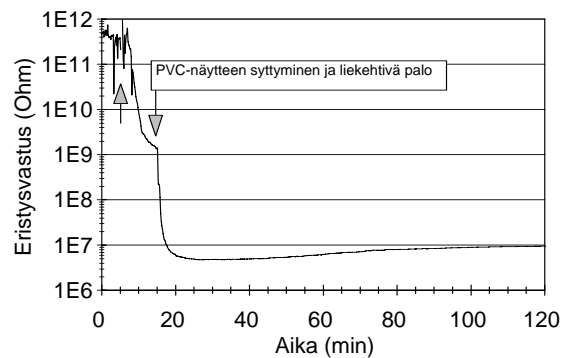


c)



b)

Koe 6, 20.5.2002, kosteus + savu



d)

Kuva 4. Altistuksen vaikutus yhdensuuntaisen reikälevyvarin eristysvastukseen, a) altistus savulle, b) altistus kosteudelle, kokeen lopussa on todennäköisesti ollut häiriöitä eristysvastusmittauksessa ja liian suuria mittauservoja, c) altistus sekä kosteudelle että savulle ja d) altistus sekä kosteudelle että savulle ja PVC-näytteen syttyminen liekehtivään paloon. Kaapelinäytteen säteilytys ja/tai altistus kosteudelle alkaa 5 min kohdalla (nuoli).

TEOREETTISIA MALLEJA

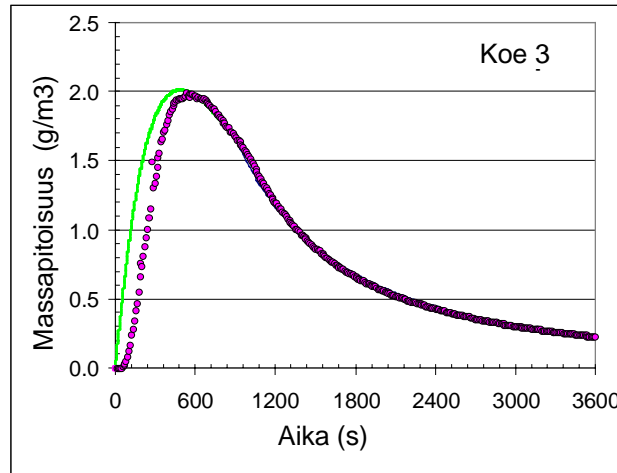
Koagulaatiomalli

Savuhiukkasilla on jatkuva kokojakauma. Kokeen aikana hiukkasten lukumäärä vaihtelee jatkuvasti. Savuhiukkasten laskeutumiselle esitetään tässä dynaamista mallia soveltaen vanhaa Schmolukowskin teoriaa. Malli ottaa koagulaation huomioon ja selittää ainakin kvalitatiivisesti savun tiheyden aikakäyttäytymistä kokeen aikana:

$$\begin{aligned} \frac{dn_1}{dt} + \frac{n_1}{\tau} + \Gamma n_1^2 &= \frac{dn_e}{dt}; & 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{dn_2}{dt} + \frac{n_2}{\tau} + \Gamma n_2^2 &= 0; & t \geq t_1 \end{aligned} \quad (1)$$

missä n_i on savun hiukkasten lukumäärätiheys, t_1 on säteilytyksen päättymisaika, Γ on koagulaation nopeusvakio, τ on laskeuman aikavakio ja n_e kaapelinäytteestä lähtevien savuhiukkasten lukumäärätiheys. Yhtälöiden (1) mukaisia käyriä sovitettiin koetuloksiin, jolloin yhteensopivuus oli melko hyvä (kuva 5). Koska säteilytyskartion kuumeneminen vaati

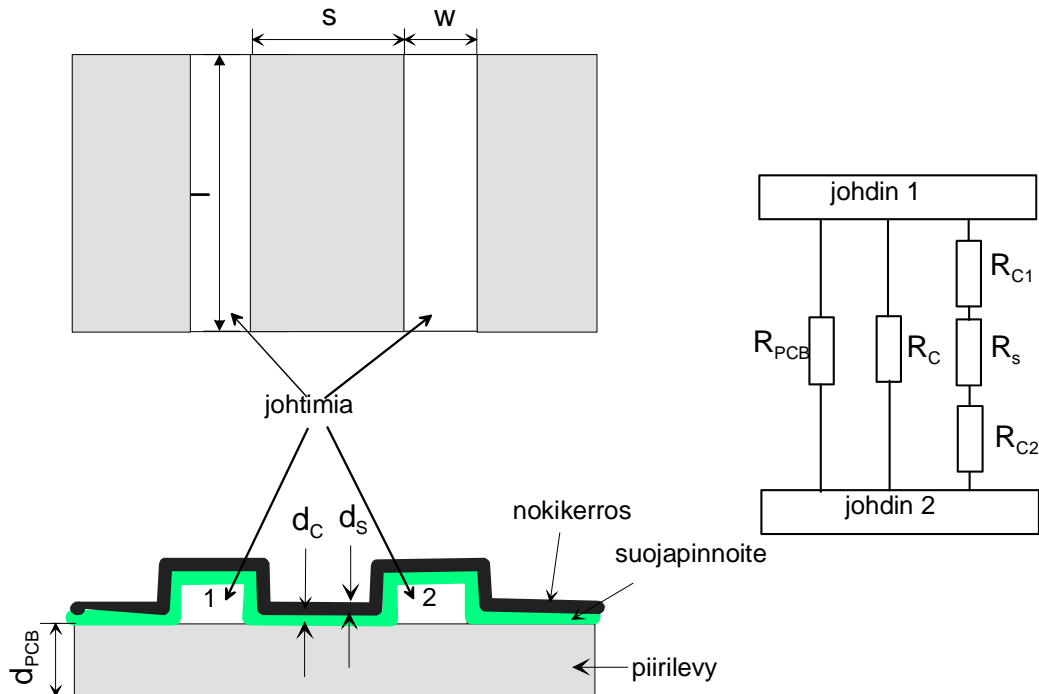
jonkin verran aikaa, teoreettisen käyrän nollakohtaa pitäisi siirtää noin 100 s oikealle kuvassa 5, jotta mallin oletukset olisivat täysin voimassa. Silloin myös sovite olisi paljon parempi kokeen alkuvaiheessa. Yhteensopivuus on niin hyvä, että teoreettista ja kokeellista käyrää ei erota enää toisistaan 10 min jälkeen.



Kuva 5. Yhtälöiden (1) mukaisen mallin sovitus (yhtenäinen viiva) savun massapitoisuuden koetulokseen (pisteet).

Noen ominaisvastuksen malli

Noen eristysvastuksen (kuva 3) ymmärtämiseksi on esitetty yksinkertainen malli (kuva 6). Nokilaskeuma oletetaan (heikosti) johtavaksi kerrokseksi. Eristysvastuksen heikkenemisen syy on ohminen johtuminen piirikortin kampakuvion johtimien väliin laskeutuneen noen kautta.



Kuva 6. Sähkön johtuminen suojapinnoitetulla piirilevyllä jonka päällä on nokikerros (vasemmalla) ja vastusten rinnakkaisyhteyksien vastinpiirissä (oikealla).

Kampakuvioiden mitattu eristysvastus R on puhtaan piirilevyn eristysvastus R_{PCB} ja noen vastus R_S rinnan. Nokilaskeuman paksuuden $d_s(t)$ ja noen ominaisvastuksen ρ_s suhde on

$$\frac{d_s}{\rho_s} = \frac{s}{nl} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_{PCB}} \right) \quad (2)$$

missä l on johtimien pituus, s on johtimien välinen vakioetäisyys ja n on nokikaistaleiden lukumäärä johtimien välissä. Kokeelliset d/ρ -suhteet ja keskimääräiset nokilaskeumat antavat noen tehollisen ominaisvastuksen $10^6 \Omega\text{m}$.

Tilanteessa missä on kaksi rinnakkaista johdinta ohuen suojapinnoitteen (kuva 6) alla mahdolliset johtumisreitit ja vastaavat vastukset ovat

- piirilevymateriaalin läpi, R_{PCB}
- johtimien välisen suojapinnoitteen läpi, R_C
- johtimen 1 päällä olevan suojapinnoitteen, nokikerroksen ja johtimen 1 päällä olevan suojapinnoitteen läpi, sarjaan kytkettynä $R_{C1} + R_S + R_{C2}$

Mitattu vastus R on näiden vastusten rinnankytkentä

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{PCB}} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_{C1} + R_S + R_{C2}} = \frac{ld_{PCB}}{s\rho_{PCB}} + \frac{ld_C}{s\rho_C} + \frac{1}{2\rho_C \frac{d_C}{lw} + \rho_s \frac{s}{ld_s}} \quad (3)$$

missä ρ_{PCB} ja ρ_C ovat piirilevyn ja suojapinnoitteen ominaisvastus, d_{PCB} ja d_C piirilevyn ja suojapinnoitteen paksuus ja w johtimen leveys.

Suojapinnoitteen vaikutus tarkastellaan tässä suuruusluokka-arviona. Taulukossa 1 esitetään aineparametreja. Johtimen leveys $w = 0,1$ mm, johtimien välinen etäisyys $s = 0,1$ mm ja johtimen pituus $l = 10$ mm oletetaan tyypillisiksi mitoiksi. Lukuarvoja sijoittamalla saadaan taulukossa 1 esitettyjä vastusarvoja (yhtälö (3)). Huomataan, että suojapinnoite estää tehokkaasti vuotovirtoja johtavaan nokikerrokseen.

Taulukko 1. Piirilevyn, suojapinnoitteen (kirjallisuudesta) ja noen (koetuloksista) ominaisvastuksen ρ ja paksuuden d tyypillisiä arvoja sekä laskettuja vastuksia (vrt. teksti).

	ρ (Ωm)	d (m)	Vastus (Ω)
Piirilevy	$10^{12} \dots 10^{13}$	10^{-3}	$R_{PCB} \sim 10^{13} \dots 10^{14}$
Suojapinnoite	$10^{13} \dots 10^{15}$	10^{-5}	$R_C \sim 10^{16} \dots 10^{18}$ $R_{C1} \sim 10^{14} \dots 10^{16}$
Noki	10^6	10^{-6}	$R_S \sim 10^{10}$

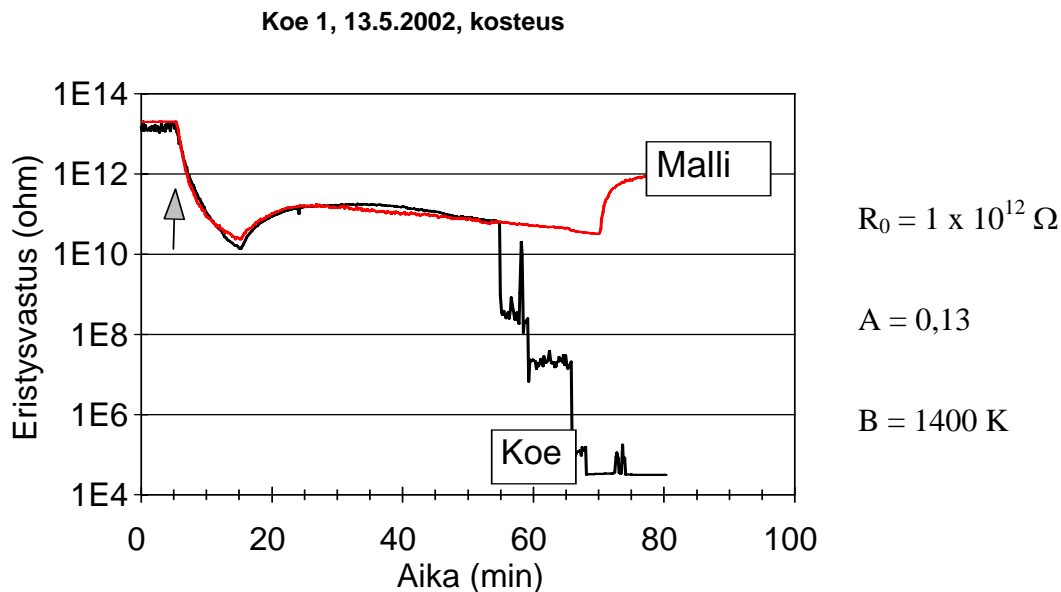
Malli kosteuden vaikutukselle kampakuvioiden eristysvastukseen

Kokeissa havaittiin selvä vastaavuus kampakuvioiden eristysvastuksen ja suhteellisen kosteuden välillä. Kosteuden vaikutus kampakuvioiden eristysvastukseen mallinnettiin käyttämällä Comizzolin [4] esittämää yhteyttä ja olettamalla ohminen vastus johtimien välillä.

Eristysvastuksen R riippuvuus suhteellisesta kosteudesta RH (%) ja lämpötilasta T on silloin muotoa

$$R = R_0 \exp(-A \cdot RH) \exp(B/T) \quad (4)$$

missä R_0 , A ja B ovat sovitusparametreja ilman fysikaalista tulkintaa. Ainoa perustelu sovitusparametrien valinnalle on sovituksen silmämääräinen yhteensopivuus mittaus-tulokseen. Kuvan 7 mallikäyrän yhteensopivuus koetulokseen on varsin hyvä.



Kuva 7. Kosteuden vaikutuksen mallin (yhtälö 4) sovitus kampakuvion eristysvastusmittaukseen. Altistus kosteudelle alkaa 5 min kohdalla (nuoli).

JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokeissa on mitattu pelkän kosteuden tai pelkän savun sekä savun ja kosteuden yhteisvaikutusta kampakuvioihin ja yhdensuuntaiseen reikälevypariin, sekä pelkän savun vaikutusta kaupallisen ohjausjärjestelmän piirikorttiin.

Sekä kosteus yksinään että savu yksinään heikensi suojaamattoman kampakuvion eristysvastusta selvästi, noin kolme dekadia. Kosteuden ja savun yhteisvaikutus oli vielä suurempi, noin viiden dekadin heikennys eristysvastuksessa.

Sähköinen läpilyönti ja oikosulku suojaamattomassa kampakuviossa esiintyi kahdessa kokeessa, toinen pelkällä kosteusaltistuksella ja toinen kosteuden ja savun yhteisaltistuksella.

Kaupallisen ohjausjärjestelmän piirikortin eristysvastuksessa ei havaittu oleellisia muutoksia riittävän suojausjärjestelmän ansiosta.

Kosteus yksinään aiheutti samansuuruisen yhdensuuntaisen reikälevyparin eristysvastuksen pienenemisen kuin savu yksinään, noin yhden dekadin. Altistuminen sekä kosteudelle että savulle aiheutti kahden dekadin vähenemisen.

Kaapelivaippanäytteen liekehtiminen ja suuren nokituoton yhdessä kokeessa aiheutti nokiviiksien kasvamisen yhdensuuntaisten reikälevyjen väliin ja eristysvastuksen viiden dekadin heikkenemisen. Viiksien kasvu oli paljon voimakkaampi ja nopeampi liekehtivän palon aikana kuin kytevä palon, mikä saattaa vaikuttaa huomattavasti sähkömekaanisiin laitteisiin. Tulokset viittaavat siihen, että liekehtivän palon ja nokiviiksien kasvamisen lisätutkimus on perusteltu.

Malleja on esitetty savun laskeutumiselle, noen ominaisvastukselle ja kosteuden vaikutukselle kampakuvioiden eristysvastukseen.

KIITOKSET

Tutkimuksen rahoittajina ovat olleet Fortum Engineering Ltd, Kauppa- ja teollisuusministeriö, Säteilyturvakeskus sekä Teollisuuden Voima Oy.

Kiitämme Hemmo Juutilaista avusta mittauksissa ja savukaapin käytössä sekä Mika Letonsaarta avusta kaupallisen piirikortin eristysvastuksen mittauksissa.

LÄHDELUETTELO

1. Tanaka, T.J. & Nowlen, S.P. Results and Insights on the Impact of Smoke on Digital Instrumentation and Control. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories. NUREG/CR-6597, SAND99.1320, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2001. 114 s.
2. Gross, D., Loftus, J. J. & Robertson, A.F. Method for Measuring Smoke from Burning Materials, ASTM STP 422, 1967. S. 166 - 204.
3. ISO 5659-2:1994. Plastics - Smoke generation - Part 2: Determination of optical density by a single-chamber test. Geneva: International Organization for Standardization, 1994. 29 s.
4. Comizzoli, R.B. Surface conductance on insulators in presence of water vapor. Materials developments in microelectronic packaging; performance and reliability, Proceedings of the fourth electronic materials and processing congress. 1991. S. 311-316