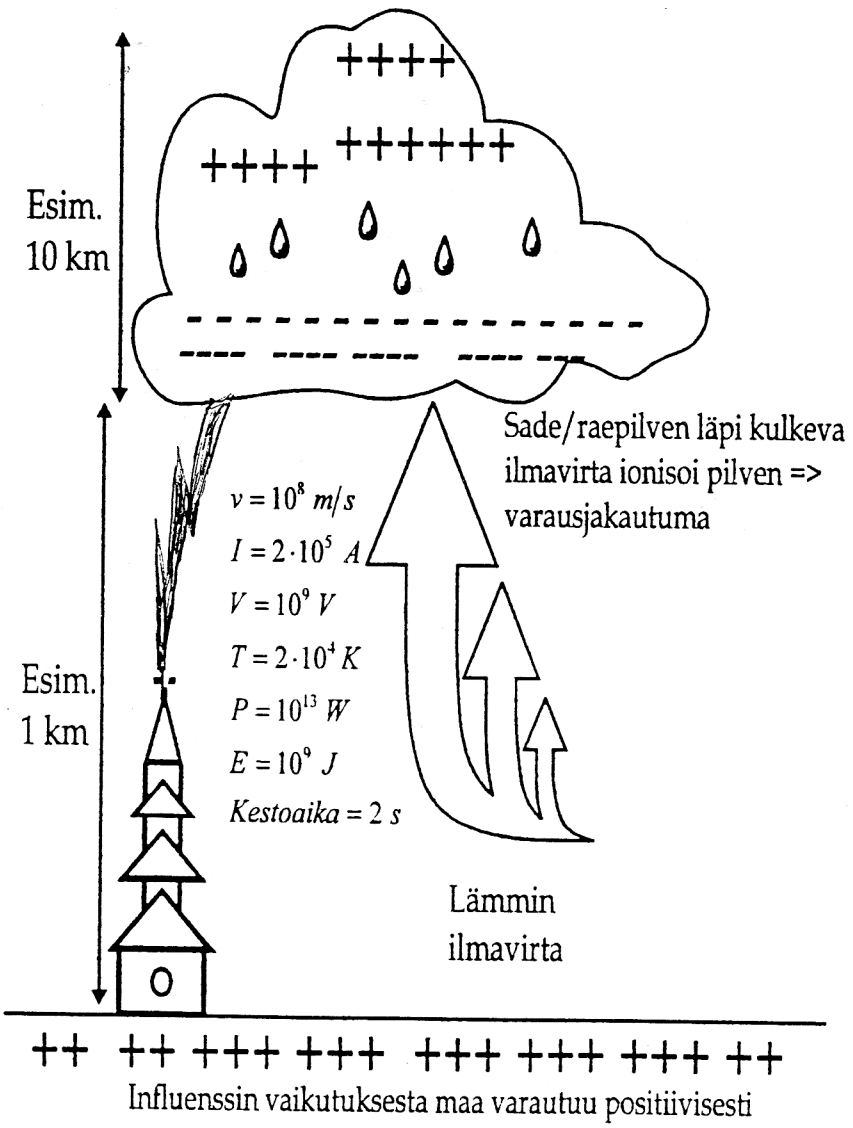
Ukkosilma ja salama

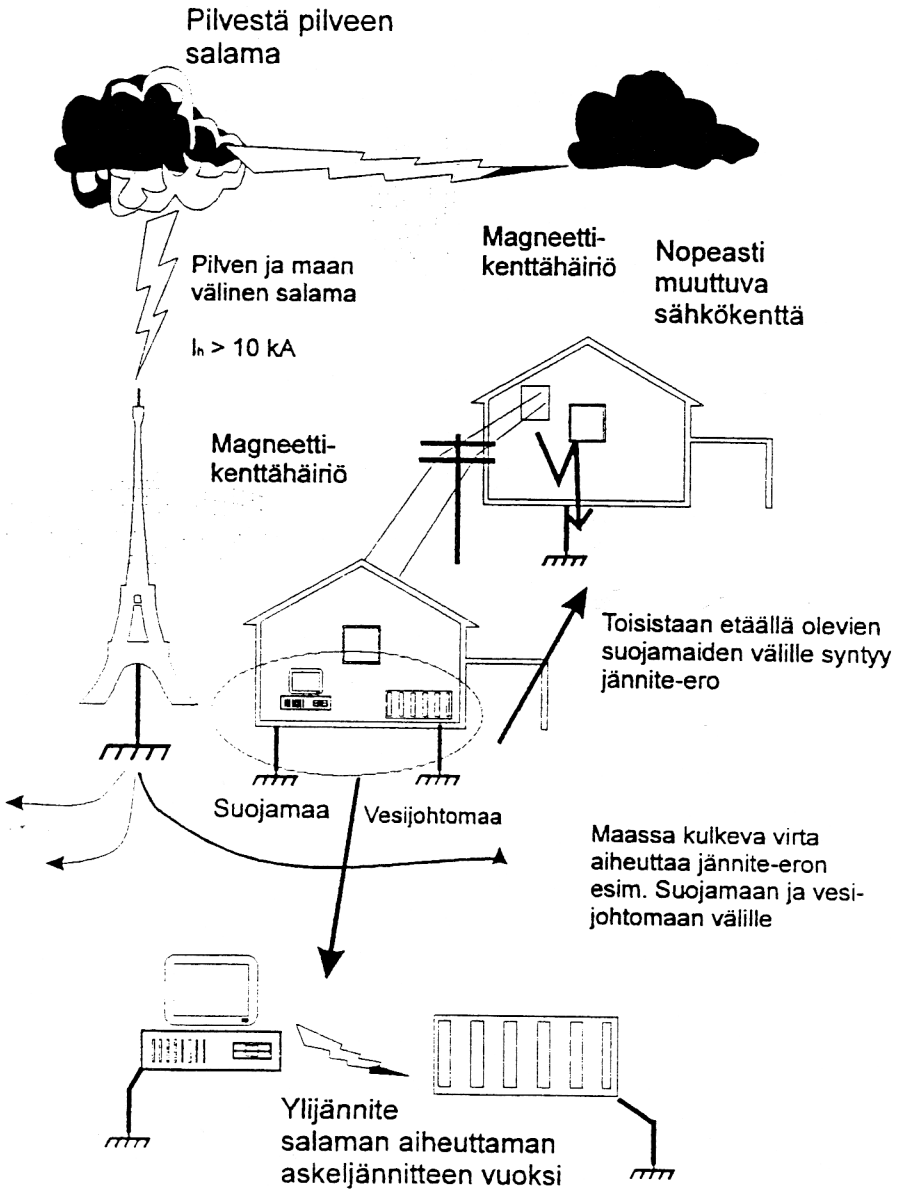
Eräs voimakkaimmista ulkoisista häiriölähteistä ovat ukkosilman aikaiset salamapurkaukset. Tämä on myös otettu huomioon EMC-standardeja laadittaessa. Laitteeseen kaapeleiden kautta tapahtuvaa purkauksen kytkeytymisen sietoa testataan standardin *IEC 1000-4-5* mukaisesti. Ukkosilma aiheuttaa myös häiriöitä verkkojännitteessä. Näiden sietoa testataan pursketestillä, *IEC 1000-4-4* ja syöttöjännitteen häiriötestillä standardin *IEC 1000-4-11* mukaisesti.



Kuva 11-31 Staattisen sähkön syntyminen pilvien eri kerroksiin johtaa ukkosilman syntymiseen. Staattinen sähkö voi syntyä paitsi kerrosten läpi kulkevan ilmavirran vaikutuksesta myös vesipisaroiden ja rakeiden vaikutuksesta.

Ukkosilma syntyy esimerkiksi siten, että lämmin ilmavirta nousee ylös ja kulkee sade- tai raepilven lävitse. Pilven läpi kulkiessaan ilmavirta varaa staattisella sähköllä pilven eri osat siten , että maata kohden syntyy voimakas negatiivinen varaus ja taas pilven yläosaan syntyy vastaavasti voimakas positiivinen varaus. Näiden kahden varauskerroksen välinen etäisyys saattaa olla esimerkiksi kymmenen kilometriä.

Pilven ja maan välinen tyypillinen etäisyys on muutama kilometri. Influenssin vaikutuksesta maa varautuu positiivisesti ja näin ollen pilven ja maan välille syntyy

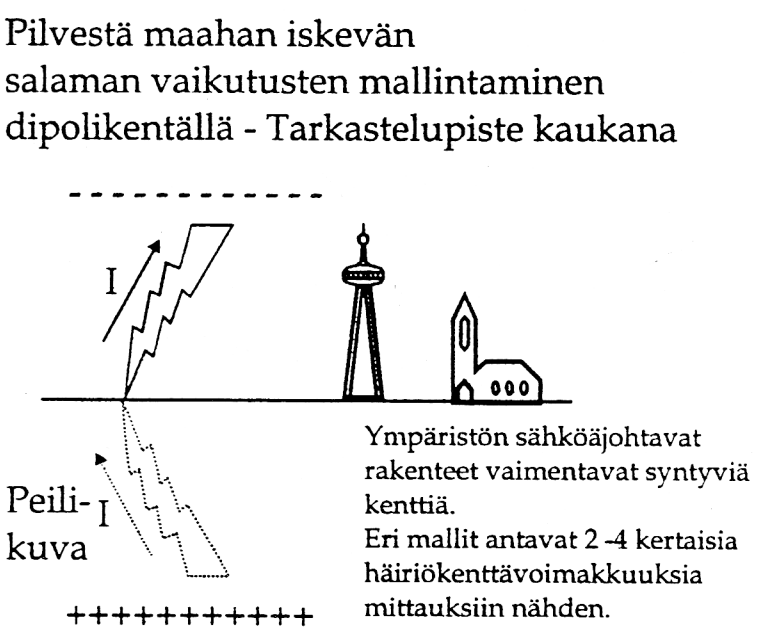


Kuva 11-32 Salamapurkaus voi tapahtua pilven ja maan tai pilvien välillä. Purkauksen lähialueella ilmenee magneetti- ja sähkökenttähäiriöitä. Salaman iskiessä maahan synttyy maahan jännite-eroja, jotka saattavat olla hengenvaarallisen suuria. Tästä syystä laitteiston maadoitukset on suunniteltava siten, ettei maahan syntyvät jännitteet kytkeydy laitteistoon..

sähkökenttä. Kun sähkökenttä kasvaa riittävän voimakkaaksi, syntyy salamapurkaus. Salamapurkaus etenee hyvin nopeasti, nopeudella 10^8 m/s, ja salamakanavassa vallitsee jopa 20 000°C lämpötila.

Salaman kokonaiskestoaika on tavallisesti alle 2 sekuntia, yksittäisen purkausvirtapulssin kesto on tyypillisesti 30 µs.. Virta saattaa nousta jopa 200 kA:iin, tyypillisesti 20 kA:iin ja jännite on 1000 MV luokkaa. Salaman huipputeho on yli TW (10^{12} W) ja energia noin 0,5 GJ. Virtapulssin nousuaika on 0,5 µs luokkaa. Pulssin nousureuna sisältää merkittäviä taajuuskomponentteja 500 kHz taajuuksiin saakka ja pulssin merkittävät taajuuskomponentit ulottuvat 20 kHz taajuuksiin. Näitä vastaavat aallonpituudet ovat 600 m ja 15 km. Salaman pituus on kilometrien luokkaa, joten purkaus on hyvä antenni. Usein salaman aiheuttamia häiriöitä voidaan tarkastella olettamalla lähikenttäolosuhteet. Käytännössä yksittäisen salaman ominaisuudet vaihtelevat hyvinkin paljon.

Salamapurkaus aiheuttaa läheisyydessään voimakkaita sähkö- ja magneettikenttähäiriöitä. Nopeat kenttämuutokset aiheuttavat radiohäiriöitä, joiden voimakkuutta voidaan arvioida käyttäen kirjallisuudessa esitettyjä malleja purkaustapahtumalle. Pilvestä maahan tapahtuvaa purkausta voidaan tarkastella esimerkiksi dipolimallilla. (Kuva 11-33)

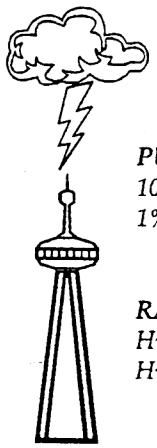


Kuva 11-33 Salamapurkaukset synnyttävät sähkömagneettista säteilyä, jonka voimakkuutta voidaan arvioida mm. dipolimallilla. Muunmuassa maan muodon ja johtavuuden vaihtelut, rakennukset ja kasvisto vaikuttavat syntyvien häiriökenttien voimakkuuteen.

Pilven ja maan välisen purkauksen lisäksi purkaus voi tapahtua myös pilven sisällä tai kahden pilven välillä. Vastoin vakiintunutta käsitystä salama iskee useita kertoja samaan paikkaan. Yhdessä purkausjaksossa tapahtuu oikeastaan useampi salamapurkaus peräkkäin, ja niitten etenemissuunta saattaa vaihdella pilvestä maahan ja maasta pilveen. Maahan kohdistuvaa salamapurkausta houkuttelevat korkeat rakenteet kuten antennimastot, tornit ym. korkeat paikat (kts. esimerkiksi Kuva 11-34).

Suomessa salamapurkaukset eivät ole kovinkaan merkittävä häiriölähde pienille elektroniikkalaitteille, mutta suurille laitteistoille ja laitteistokokonaisuuksille nämä saattavat merkitä oleellista toiminnan vaarantumisen uhkaa. Suomessa rajuja ukkosilmoja on lyhyestä kesästä johtuen suhteellisen harvoin, mutta esimerkiksi Floridassa ukkosilmapäiviä on yli sata vuodessa. Floridan alueella salamapurkaukset saattavat olla lukumäärältään luokkaa 10-15 salamaa/km^2 vuodessa. Näistä purkauksista ainakin puolet on pilven ja maan välisiä purkauksia. Yhdessä prosentissa purkauksista virta nousee 200 kA:n luokkaan.

SALAMAPURKAUKSET FLORIDASSA



PURKAUSTIHEYS
10 - 15 salamaa/km²/vuosi
1% purkauksista I_{max} ~ 200kA

RAKENTEEN KORKEUDEN VAIKUTUS
H~150 m: 2 salamaa/vuosi
H~400 m 100 salamaa/vuosi

Kuva 11-34 Salamapurkaukset ovat mm. Floridassa merkittävä häiriölähde.

---

* Kesällä 1997 rajut Etelä-Suomen ukkosilmat aiheuttivat ongelmia rautateiden opastin- ja turvalaitteille. Syyksi esitettiin uuden tekniikan herkkyyttä salamoinnin aiheuttamille häiriöille.

Kuten aikaisemmin mainittiin, rakenteen korkeuden vaikutus vaikuttaa siihen, kuinka usein salamapurkaus kohdistuu rakenteeseen. Mikäli rakenteen korkeus on noin 150 metriä, siihen osuu Floridan alueella 2 salamapurkausta vuodessa. Jos rakenteen korkeus on 400 metriä, siihen osuu 100 salamapurkausta vuodessa. (Kuva 11-34)

Koska maat, joissa ukkosilmat ovat tavallisia, ovat merkittäviä markkina-alueita, on myös suomalaisen elektroniikkasuunnittelijan kiinnitettävä huomiota salamapurkauksen aiheuttamiin häiriöihin ja niiden torjuntakeinoihin.

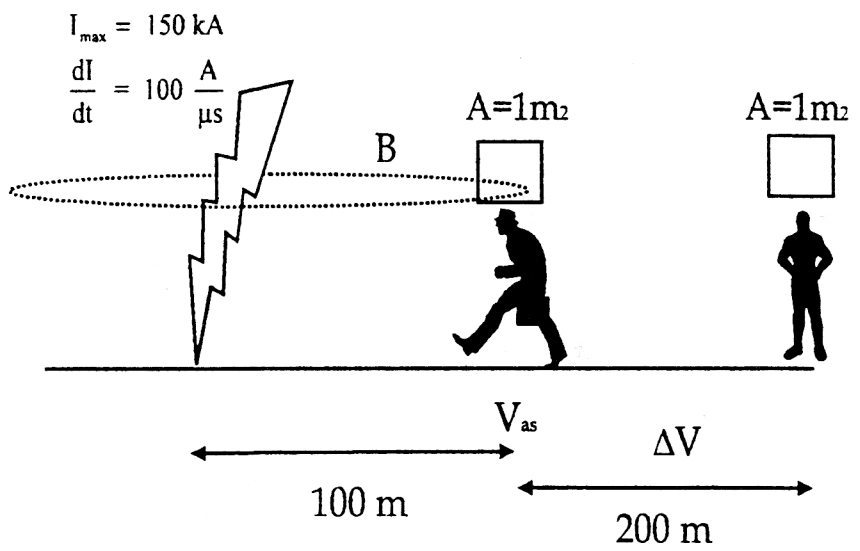
Tarkastellaan pilvestä pilveen tapahtuvaa salamapurkausta. Tällaisen salamapurkauksen tyypillinen pituus on noin kolme kilometriä. Sen pääasiallinen häiriömuoto on magneettikenttähäiriö, mutta nopeasti muuttuva sähkökenttä pilvien välittömässä läheisyydessä on myös oleellinen häiriö. Magneettikenttähäiriö indusoi häiriöjännitteitä mm. ilmajohto-maasilmukoihin ja laitteistosilmukoihin. (Kuva 11-38)

Pilvestä maahan tapahtuva purkaus synnyttää myöskin magneettikenttähäiriön, mutta lisäksi se synnyttää maahan jännitejakautuman purkauspaikan ympäristöön. Mikäli laitteisto on kytketty useasta pisteestä ympäröivään maapotentiaaliin ja näiden pisteiden välillä on jonkin verran etäisyyttä, esiintyy yhdistyspiteiden välillä suuri potentiaaliero. Mikäli purkauspaikka on rakennuksen välittömässä läheisyydessä ja rakennuksen sisällä esimerkiksi suojamaa-, vesi-ja lämpöjohtojärjestelmä on kytketty eri maapisteeseen, syntyy rakennuksen sisällä laitteiden ja vesijohtojärjestelmän välille vaarallisia ylijännitteitä. Näiden jännitteiden vaikutuksesta voi elektroniikkalaitteet tuhoutua täysin. Nämä jännitteet

voivat olla hengenvaarallisia ja purkausvirtojen aiheuttama lämmönnousu saattaa sytyttää tulipaloja. Tästä syystä on tärkeää, että rakennuksen sisällä eri maat on yhdistetty rakennuksen ulkopuolella olevaan maahan vain yhdestä pisteestä tai eri yhdistyspisteet ovat hyvin matalaimpedanssisessa kontaktissa keskenään.(Kuva 11-32)

Salaman iskiessä johtoon virran muutosnopeus on hyvin suuri, esimerkiksi 100 kA/µs. Tällöin johtoon syntyvä jännite on verrannollinen paitsi tähän muutosnopeuteen, niin myös johdon induktanssiin. Halkaisijaltaan 10 mm johdon induktanssi pituusyksikköäkohden on n. 2,8 µH/m, mikäli johto on hyvin kaukana muista johteista. Käytännössä lähellä olevat johdot pienentävät induktanssia niin, että johdon induktanssi on tyypillisesti alle 2 µH/m.

Jos oletamme salaman iskevän johtoon , joka on kaukana muista johteista, niin jännite, joka syntyy johdon pituusyksikköä kohti, on luokkaa 300 kV/m. Käytännön tilanteissa



$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

100m:

$$B_{max} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 150 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 100} T = 0{,}3\, mT$$

300m:

$$B_{max} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 150 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 300} T = 0{,}1\, mT$$

100 m:

$$V_s = \left|\frac{d\Phi}{dt}\right| = \frac{0{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{1{,}5 \cdot 10^{-6}} V = 200\, V$$

300 m:

$$V_s = 66\, V$$

$$V_{as} = \frac{\rho_{maa} I}{2\pi}\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + Askel}\right) =$$

$$V_{as} = \frac{500 \cdot 150 \cdot 10^3}{2\pi}\left(\frac{1}{100} - \frac{1}{101}\right) \approx 1{,}2\, kV$$

$$\Delta V = \frac{\rho_{maa} I}{2\pi}\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + D}\right)$$

$$\Delta V = \frac{500 \cdot 150 \cdot 10^3}{2\pi \cdot}\left(\frac{1}{100} - \frac{1}{300}\right) V \approx 8\, kV$$

Kuva 11-35 Lähelle maahan iskevän salaman 100 ja 300 m päässä sijaitseviin 1 m^2 silmukoihin indusoituvat häiriöjännitteet sekä maahan 100 ja 300 m etäisyyksien välille syntyvä jännite-ero.

voidaan arvioida, että syntyvä jännite on luokkaa 100 kV/m. Siten purkausvirtaa kuljettavaan johtoon kytkettyjen laitteistojen välille syntyy hyvin korkeita jännite-eroja, jotka pystyvät rikkomaan laitteistot ja muodostavat selvän turvallisuusriskin. Tästä syystä laitteiston kokonaisuutta suunniteltaessa on otettava huomioon, miten salamapurkausvirrat kulkevat laitteiston johdotuksessa.(Kuva 11-36)

Johdon halkaisijaa lisäämällä voidaan loppujen lopuksi sen aiheuttamaa induktanssia pienentää hyvin vähän. Näin ollen johdotuksen rakenne on suunniteltava siten, että laitteiston eri osat eivät ole eri pisteissä salaman purkausvirran kulkuun nähden. Myöskin on pyrittävä välttämään tilannetta, jossa maapotentiaalierot synnyttävät vaarallisia potentiaalieroja laitteiston sisälle tai laitteiston ja ympäröivän maan välille.

$$\phi = \int_{r_j}^{R} \frac{\mu i}{2\pi} dr = \frac{\mu i}{2\pi} \ln\left(\frac{R}{r_j}\right) \quad \left[\frac{Wb}{m}\right]$$

$$L = \frac{\phi}{I}\left[\frac{H}{m}\right]$$

$$L_{10mm}/_{m} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{5000}{5 \cdot 10^{-3}}\right) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \ln(10^6) \approx 2{,}8\,\mu H$$

Virran muutosnopeus salaman iskussa 100 kA/µs.

$$V = L\frac{dI}{dt}$$

Jännite johdon pituusyksikköä kohden:

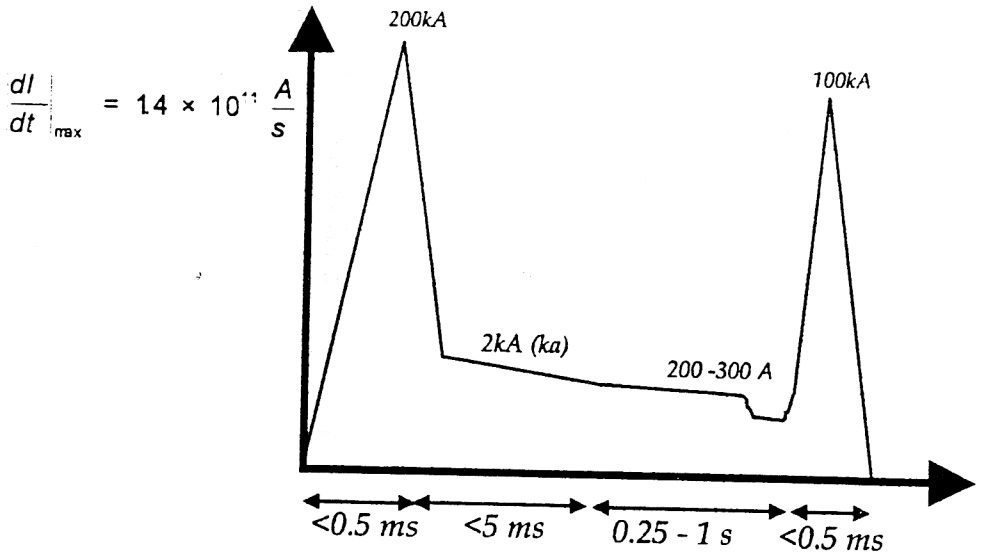
$$\frac{V}{l} = 2{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{100 \cdot 10^3}{10^{-6}} \frac{V}{m} = 2{,}8 \cdot 10^5 \frac{V}{m}$$

Kuva 11-36 Arvio purkausvirtapulssin synnyttämästä jännitteestä.

Salaman ja sen aiheuttamien virtapulssien ja jännitepulssien aaltomuotoja on kuvattu eri standardeissa. Salaman aaltomuodolle on tyypillistä nopea nousureuna, jossa virta saavuttaa maksiminsa, jopa 200 kA, alle puolessa millisekunnissa. Sen jälkeen seuraa satoja millisekunteja pitkä pienemmän virran jakso, jota seuraa nopea virtapiikki, joka vastaa paluulyönnin aiheuttamaa virtapulssia. Verkkojännitteeseen syntyviä jännitepulsseja on kuvattu mm. IEEE:n standardissa 587.1 ja EU standardissa EN 61000-4-5. Tässä jännite nousee huippuarvoonsa (esim. 4 kV) 1,2 µs:ssa ja puolittuu 50 µs:ssa. Virtapulssi saavuttaa maksiminsa 8 µs:ssa ja puolittuu 20 µs:ssa. Tällaisia pulsseja varten on kaupallisesti saatavilla testigeneraattoreita, joita voidaan käyttää laitteiston testaamiseen.(Kuva 11-37)

Verkosta tuleva piikki sisältää yleensä nopean nousureunan ja sen jälkeen värähtelyosan, joka johtuu verkon induktanssien ja kapasitanssien muodostamasta värähtelypiireistä. Tyypillinen taajuus tälle värähtelylle on 100 kHz ja värähtelyn kesto useita kymmeniä mikrosekunteja. Pulsseja saattaa tulla useita peräkkäin riippuen salaman purkauksesta ja purkauksen luonteesta. Tällaista jännitepulssia elektroniikkapiirit kestä ilman erityisiä

SALAMAN AALTOMUOTO
MIL-STD-1757A



Kuva 11-37 Testisalaman aaltomuoto MIL-standardin 1757A mukaisesti.

suojakomponentteja. Näin ollen laitteistoihin, jotka on tarkoitettu käytettäväksi alueilla, jossa salamapurkaukset ovat merkittävä uhka, on suunniteltava tarpeelliset suojapiirit pulssienergian vaikutusten vähentämiseksi ja mahdollisesti eliminoimiseksi.

Salaman aiheuttamien syöksyaaltojen sietokyvyn testaukseen soveltuva standardi on IEC 1000-4-5, jota vastaa EN 61000-4-5 (kts. sivu 12 -17). Standardin testipulssin kaltainen, suurenerginen syöksyaalto syntyy salaman aiheuttamista maajännitteistä ja johtoihin indusoituneista jännitteistä. Ukkosen aikana jännitesuojapiirit kytkevät verkosta pois suuria kuormia, mikä aiheuttaa voimakkaita syöksyaaltoja.

Standardin IEC 1000-4-4, jota vastaa EN 61000-4-4 mukainen pienienergisempi mutta laajakaistaisempi purskehäiriö on myös tavallinen ukkosilman aikana (kts. sivu12 -17).

Verkkojännitehäiriöt kuten lyhyet katkokset ovat tavallisia ukkosilman aikana. Näiden häiriöiden sietokykyä voidaan testata standardin IEC 1000-4-11, jota vastaa EN 61000-4-11.

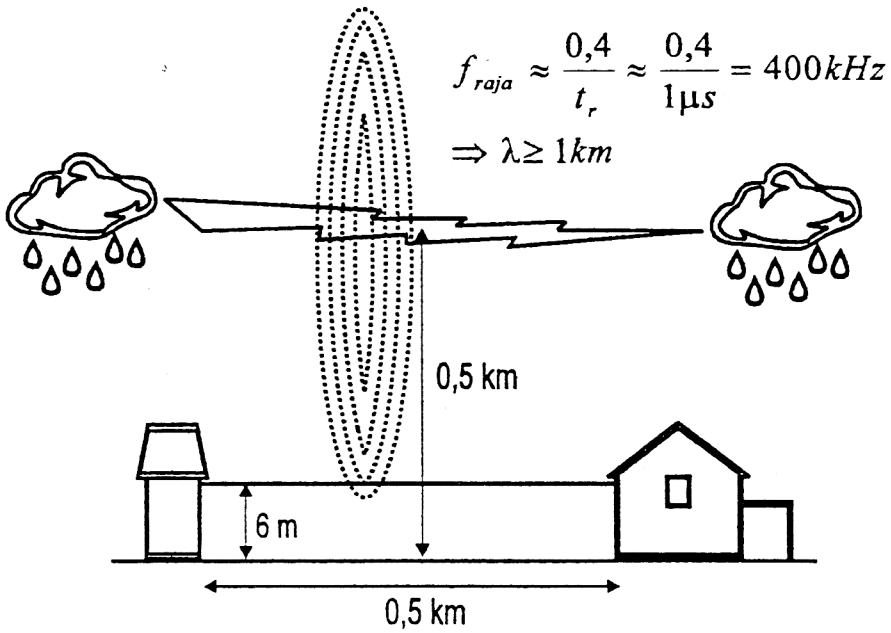
Kuten aikaisemmin mainittiin, pilvestä pilveen- salaman merkittävin häiriökomponentti on sen synnyttämä magneettikenttäpulssi. Tätä voidaan yksinkertaisesti arvioida käyttämällä hyväksi tunnettua virtajohtomallia ja Ampéren lakia. Pilvestä pilveen-salaman pituus on tavallisesti useita kilometrejä. Tyypillisen salaman huippuvirta on 30 kA, jonka se saavuttaa yhden mikrosekunnin kuluessa.

Jos oletetaan, että kaksi rakennusta ovat puolen kilometrin etäisyydellä toisistaan ja näiden välillä on ilmajohto, joka on 6 m korkeudella maasta. Pilvestä pilveen-purkaus tapahtuu esimerkiksi puolen kilometrin korkeudella. Purkauksen synnyttämä magneettikenttä maan pinnassa on n. 12 μT. Kentän muutoksen synnyttämä jännite silmukkaan, jonka muodostaa

maa ja ilmajohto, on n. 36 kV (Kuva 11-38). Laitteiston suojaaminen tällaisia pilsseja vastaan edellyttää moniasteisia suojauspiirejä, joissa ensimmäisenä pulssin kulkutiellä on suurta huippuvirtaa kestävät purkausputket.

Kaasupurkausputket ovat suhteellisen hitaita komponentteja, joten ne eivät yksin riitä elektroniikkalaitteen suojaksi tällaisessa tapauksessa. Tällöin on syytä lisätä suojaukseen sopivan impedanssin taakse pienjännitteisemmistä kaasupurkausputkista, varistoreista ja zenereistä koostuvat suojapiirit.

Pilvestä pilveen salama on 4km pituinen ja saavuttaa 30 kA huippuvirran 1 ms kuluessa. Mikä on muuntamon ja asuinrakennuksen väliseen 500 m pituiseen ilmajohtoon indusoituvan jännitten suuruus. Ilmajohto on salaman suuntainen ja keskimäärin 6 m korkeudella maasta. Ilmajohdon etäisyys salamasta on 0.5 km.



Ilmajohdon ja maan muodostaman silmukan pinta-ala on 3000 m2.

Lasketaan likimäärin maksimivuotiheys ilmajohdon ja maan muodostamassa silmukassa:

Koska salamapurkauksen synnyttämän kentän merkittävien komponenttien aallonpituus on yli 1 km voidaan käyttää Ampéren lakia..

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 30 \cdot 10^3 A}{2\pi \cdot 0,5 \cdot 10^3}$$

$$B = 12 \cdot \mu T$$

Silmukkaan indusoituva jännite on:

$$U = \frac{d\phi}{dt} = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 3000}{10^{-6}} V = 36 kV$$

Maahan syntyvän peilivirran vaikutus on jätetty huomiotta.

Kuva 11-38 Pilvestä pilveen tapahtuvan salamaniskun lähellä sijaitsevaan ilmajohtoon indusoituva jännite. Maahan syntyvän peilivirran kompensoiva vaikutus on jätetty huomiotta.

Rakennusten välinen johto olisi paremmin suojattu, mikäli se olisi kaivettu maahan. Tosin siinäkin tapauksessa johtoon indusoituisi jännite, mutta tämä olisi suuruusluokaltaan useita kertaluokkia pienempi.

Pilvestä maahan tapahtuvan purkauksen ehkä voimakkain häiriökytkentä tapahtuu syntyvän maapotentiaalijakautuman kautta. Jos oletetaan, että 150 kA:n purkausvirralla kohdistuva salamapurkaus osuu 100 metrin päähän, niin askeljännite, millä tarkoitetaan maapotentiaalieroa noin yhden metrin etäisyydellä eli suhteellisen reippaan askeleen välillä, on luokkaa 1,2 kV. Tähän vaikuttaa maan ominaisresistanssi, joka oletettiin tässä tapauksessa olevan 500 Ωm. Maan johtavuus vaihtelee riippuen siitä, kuinka kuiva maa on ja onko se jäässä. Jäätyminen huonontaa johtavuutta merkittävästi. Tyypillisesti maan ominaisresistanssi vaihtelee 100-1000 Ωm.

Magneettikenttä, jonka purkausvirta aiheuttaa 100 m:n päähän, on luokkaa 0,3 mT. Oletetaan, että virran nousunopeus purkauksen aikana on 100 kA/μs. Tällöin 1 m^2:n silmukkaan syntyvä jännite on 200 V. Mikäli silmukan etäisyys on 300 m, on magneettikentän voimakkuus 0,1 mT. Tällöin silmukkaan indusoituva jännite on 66 V (Kuva 11-35).

Kummassakin tapauksessa elektroniikkalaitteiston komponentit voivat vaurioitua tai niiden toiminta häiriintyä. Purkauksen synnyttämä jännite-ero 100 ja 300 m:n pisteiden välillä on 8 kV. Näin ollen laitteistoja, joita yhdistää johto, uhkaa suuren ylijännitteen aiheuttama vioittuminen. Salamapurkaukset muodostavatkin merkittävän uhan mm. erilaiselle turvallisuuselektroniikalle kuten palohälytys-, murtohälytys- ja instrumentointijärjestelmille.

Nykyään sähkö- ja tietoliikennejärjestelmät ovat varsin hyvin suojattu, mutta vastaavaa suojaustasoa ei instrumentointijärjestelmissä ole tyypillisesti käytetty. Järjestelmien myöhemmin tapahtuva uusiminen ja laajentaminen on tehtävä huolella. On pidettävä mielessä, että salamapurkaus saattaa muodostaa laitteistolle selvän vaara- ja häiriötekijän. Salamapurkauksen aikaiset magneetti- ja sähkökentät pystyvät vaurioittamaan ja häiritsemään herkkää elektroniikkaa. Tämä on jo pitkään osattu ottaa huomioon mm. lentokoneteollisuudessa. Elektroniikan käyttöjännitteiden pienentyessä ja logiikan kohinamarginaalin vastaavasti kaventuessa salamapurkauksen magneettikentät saattavat häiritä myös suhteellisen pienikokoisiakin laitteita. Ukkosilman aikaiset verkkohäiriöt ovat tavallisia. Verkossa tapahtuvien kytkentöjen ja ylijännitesuojien toiminnasta syntyy verkkoon häiriöpurskeita ja jännitekatkoksia. Salamapurkauksien aiheuttamien häiriöiden torjunta vaatii suhteellisen kalliita ratkaisuja. Suojaus kannattaa rakentaa siten, että suurenergisemmät suojakomponentit vastaanottavat häiriöpulssin ensimmäisenä. Pienenergisemmät suojakomponentit sijoitetaan lähemmäksi laitteistoa sopivan impedanssin taakse. Verkkokatkoksia vastaan on laitteiston verkko-osaan varattava riittävästi kapasiteettia. Lisäksi voidaan käyttää erillistä stabilisaattori- ja UPS-laitteistoa.