

Konsta Elias Kaurala

LIUKURENKAAT SIGNAALIN- JA DATAN- SIIRROSSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Marraskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Konsta Kaurala: Liukurenkaat signaalin- ja datansiirrossa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan kandidaatintutkinto
Marraskuu 2023

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia kirjallisuusselvityksen muodossa tekijöitä, jotka vaikuttavat liukurenkaassa syntyvään sähköiseen kohinaan. Työn alussa esitellään erilaisia liukurengas- ja kontaktityyppejä sekä niiden materiaaleja. Tribologiset ilmiöt kuten kitka ja voitelu vaikuttavat oleellisesti signaalin laatuun, ja näihin asioihin perehdytään ennen kuin käsitellään mitä sähköinen kohina on ja mikä sen vaikutus on signaalin- ja datansiirtoon.

On tärkeää ymmärtää liukurenkaan toimintaan vaikuttavia tekijöitä, sillä liukurenkaiden käyttöä monissa mittaus- ja säätötekniikan sovelluksissa ei tulla heti syrjäyttämään sen yksinkertaisen rakenteen ja edullisuuden ansiosta.

Käytetyin mittari kontaktin laadun tarkistamiseksi on ollut jo pitkään resistanssi. Sähköinen kohina syntyy liukurenkaissa pitkälti resistanssin vaihteluiden seurauksena. Korkeammilla taajuuksilla myös kokoonpanon kapasitanssilla voi olla pieni vaikutus.

Suunnitellessa liukurenkaita joudutaan aina tekemään jonkinlainen kompromissi kulumisen ja kontaktin laadun välillä. Samalla kun kontaktipintojen väliin syntyvä kalvo kasvattaa resistanssia, eli lisää sähköistä kohinaa, se myös pidentää renkaan kestoikää. Kontaktiympäristöllä ja materiaalien valinnalla voidaan vaikuttaa oleellisesti tähän, mutta täydellistä liukurengasta on mahdoton suunnitella.

Avainsanat: Liukuva sähköinen kontakti, liukurenkaat signaalinsiirrossa, liukuvan kontaktin häiriöt

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Konsta Kaurala: Slip rings in signal- and datatransfer
Bachelor's Thesis
Tampere University
Bachelor's Programme Mechanical Engineering
November 2023

The purpose of this thesis is to investigate, in the form of a literature review, the factors affecting the generation of electrical noise in slip rings. The beginning of the work introduces various types of slip rings and contacts, as well as their materials. Tribological phenomena such as friction and lubrication significantly impact the quality of the signal, and these issues are explored before addressing what electrical noise is and its impact on signal and data transmission.

It is important to understand the factors influencing the operation of slip rings because the use of slip rings in many measurement and control applications will not be immediately displaced due to their simple structure and cost-effectiveness.

The most commonly used measure to check the quality of the contact has been resistance. Electrical noise in slip rings largely arises as a result of variations in resistance. At higher frequencies, the capacitance of the assembly can also have a small effect.

When designing slip rings, a compromise between wear and contact quality always has to be made. While the film formed between contact surfaces increases resistance, thus adding electrical noise, it also extends the lifespan of the ring. The contact environment and material selection can significantly influence this, but designing a perfect slip ring is impossible.

Keywords: Sliding electrical contact, slip rings in signal transfer, sliding contact noise

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. LIUKUVA KONTAKTI.....	3
3. MIKROYMPÄRISTÖ	4
4. MATERIAALIT JA KONTAKTITYYPIT	6
4.1 Materiaalit	6
4.2 Kontaktityypit.....	6
4.3 Muotoilu ja kontaktien lukumäärä.....	7
5. TRIBOLOGISET SEIKAT JA VOIMAT	9
5.1 Kitka ja kuluminen.....	9
5.2 Voitelu ja normaalikäyttö	12
6. DATAN EHEYS.....	15
6.1 Resistanssi	16
6.2 Ei-lineaarinen resistanssi	17
6.3 Kontaktin impedanssi	19
7. YHTEENVETO.....	21
LÄHTEET	23

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Alkeellisen liusketyyppisen liukurenkaan rakenne. (Lähde Moog.com).....</i>	3
Kuva 2.	<i>Kontaktialue, kontaktipisteet ja sen välissä oleva kalvo (Lähde: Dorsey et al. 2012).....</i>	4
Kuva 3.	<i>Kiilan muodostuminen kontaktipinnoille (Antler 1981)</i>	5
Kuva 4.	<i>Havainnekuva liukurenkaan pinnoittamisesta. Harjatyypinen liuku. (Sawa 2013, kuva 12)</i>	7
Kuva 5.	<i>Liukurenkaan eri uratyypit. (Lähde: Slade 2014, luku 22.5.1.3)</i>	8
Kuva 6.	<i>Kontaktin resistanssi ja kitkakerroin samasta mittauksesta. (Alkuperäinen lähde: Gao & Kuhlmann-Wilsdorf 1990. Kuva otettu lähteestä Braunovic et al 2006 s. 405)</i>	10
Kuva 7.	<i>Kohinan jännite kontaktivoiman funktiona. (Alkuperäinen lähde: Mano & Oguma 1990, kuva otettu oppikirjasta Braunovic et al 2006)</i>	11
Kuva 8.	<i>Kohinan riippuvuus kulumispartikkeleiden koosta. (Alkuperäinen lähde: Tsuchiya & Tamai 1970, kuva otettu oppikirjasta Braunovic et al. 2006 s.409)</i>	12
Kuva 9.	<i>Riittävästi voiteluainetta ja riittämätön voitelu kontaktipinnoilla. (Slade 2014, luku 22.4.4)</i>	13
Kuva 10.	<i>Eri materiaaleista valmistettujen liukurenkaiden sähköinen kohina käyttöiän funktiona. (Lähde: Grandin & Wiklund 2016).....</i>	14
Kuva 11.	<i>Piirikaavio näyttää liukurenkaan ja RCL-piirin impedanssiin vaikuttavia tekijöitä (Slade 2014, luku 22.3)</i>	15
Kuva 12.	<i>Kohinan jännite liukumisnopeuden funktiona. (Alkuperäinen lähde: Taniguchi et al. 1985, kuva otettu oppikirjasta Braunovic et al. 2006)</i>	16
Kuva 13.	<i>Liukurenkaan kokoonpanon sähköinen malli. Havainnollistus muuttuvista impedansseista (Lähde: Dorsey et al. 2012)</i>	19
Kuva 14.	<i>Arvioitu reaktiivinen kapasitanssi taajuuden funktiona. (Dorsey et al. 2012).....</i>	19
Kuva 15.	<i>Pääasialliset keinot elektronisen kontaktin parantamiseksi (Perustuu lähteeseen: Braunovic et al. 2006, s. 372).</i>	21

1. JOHDANTO

Tässä tutkielmassa perehdytään liikkuvan sähköisen kontaktin ja erityisesti liukurenkkaan ominaisuuksiin ja huomioitaviin asioihin signaalin- ja datansiirrossa. Alussa esitellään yleisempiä liukurenkkaan käyttökohteita sekä rakenne. Tästä edetään johdonmukaisesti esittelemään signaalin laatuun vaikuttavat tekijät kirjallisuuskatsauksen muodossa.

Liukurengastekniikka on oleellinen osa koko ajan pidemmälle automatisoituvaa yhteiskuntaa, ja on tärkeää ymmärtää mitä rajoja tribologiset ilmiöt sekä materiaalien ominaisuudet eri ympäristössä luovat signaalin- ja datansiirtoon. Liukurenkaita esiintyy tuulivoimaloissa, helikoptereissa, lääketieteen tietokonetomografiassa ja erilaisissa generaattoreissa. Datan ja signaalien läpivienti pyörivästä rakenteesta on entistä tärkeämpää, kun koneet tuottavat entistä enemmän informaatiota. Esimerkiksi metsäkoneen harvesteripäässä tarvitsee olla liukurengas, joka välittää sekä hydraulikkaa voimansiirrolle että dataa ohjaamoon.

Liukurenkaalla on erilaisia vaatimuksia riippuen käyttökohteesta. Tyypillisesti sähköistä liukua on tutkittu mahdollisimman häiriöttömän signaalin kuljetuksen tai mahdollisimman suuren virran läpisyötön suhteen. Generaattorin liukurenkaasta tarvitaan suuri virta läpi, kun taas tutkan antennista halutaan virheetön data ulos. Kumpaankin vaikuttaa paljon samoja asioita, kuten materiaalin valinta, kontaktipintojen eheys ja liukujen määrä. Nyt tarkoitus on kuitenkin tutkia ja painottaa tapoja, joilla mahdollisimman ehyt signaali ja virheetön data saadaan myös liukurenkaan läpi. Tämä oli tutkimuskysymys, johon katsauksessa haluttiin antaa vastaus.

Työssä lukija perehdytetään erityisesti tribologisiin ilmiöihin ja niiden vaikutuksiin resistanssissa. Sähköinen kohina syntyy resistanssin vaihteluista ja siksi kontaktin dynaaminen luonne on erityisen tarkastelun alla. Näihin ilmiöihin kuuluu kitka, kuluminen ja voitelu. Osa edellä mainituista tribologisista ilmiöistä ja fyysiset tekijät kuten kontaktivoima, pyörimisnopeus, pinnankarheus sekä värinä esiintyvät sähköisen kosketuspinnan makrotasolla. Jotta kohinaan vaikuttavat ilmiöt voitaisiin täysin käsitellä, on tutustuttava kontaktipintoihin myös mikrotasolla ja otettava ympäristön aiheuttamat muuttujat kontaktissa huomioon. Tämän lisäksi virta kulkeutuu aina jonkinlaisen kalvon läpi

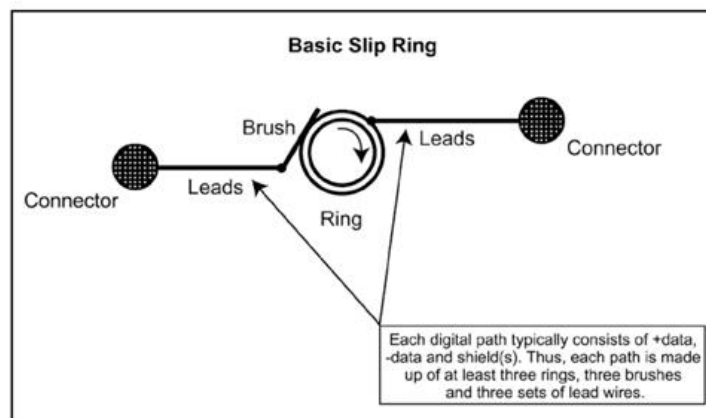
kontaktien välillä. Tämän kalvon rakentuminen on tärkeä osa sähköistä kontaktia ja käsitellään työssä.

Lopussa käsitellään liukurengaskontaktissa syntyvän sähköisen kohinan juurisyitä ja miten kohina määritellään. Yleisin tapa mitata kontaktin laatu on ollut resistanssin mittaaminen, mutta riippuen datatyypistä, myös kapasitanssilla voi olla vaikutusta. Resistanssi voidaan jakaa lineaarisiin ja ei-lineaarisiin tekijöihin. Esimerkiksi liukurenkaan pyörimisliikkeestä aiheutuu ei-lineaarista resistanssia. Työssä esitellään muutamia kokeellisia tutkimuksia eri lähteistä, joilla pyritään havainnollistamaan ilmiöiden vaikutusta signaalin sekä datanlaatuun.

2. LIUKUVA KONTAKTI

Liukurengas on laite ja osa järjestelmää, jolla saadaan siirrettyä sähkövirtaa tai sähköistä dataa paikallaan olevasta osasta pyörivään rakenneosaan (Kutz 2013). Tämän ominaisuuden vuoksi liukurengas on hyvin tyypillinen osa erilaisissa sähkömekaanisissa rakenteissa. Osittain pyöriviä järjestelmiä on mahdollista tehdä ilman liukurenkaita, mutta tällöinkin liukurenkaan käyttö monesti yksinkertaistaa rakennetta. Yleisemmin liukurenkaita löytyy erilaisista moottorisysteemeistä, robottien nivelistä, generaattoreista, mittaustekniikasta sekä paperi- ja pakkausteollisuudesta. Tässä tutkielmassa perehdytään erityisesti säätö- ja mittaustekniikan esittämiin vaatimuksiin mahdollisimman virheettömästä signaalista.

Tyypillinen liukurengasrakenne koostuu tulevista johtimista, yleensä grafiitti- tai metallikontaktista, itse liukurenkaasta, jonkinlaisesta koteloinnista sekä siitä poistuvista johtimista. Seuraava kuva havainnollistaa alkeellista liukurengasrakennetta ja sen osia.



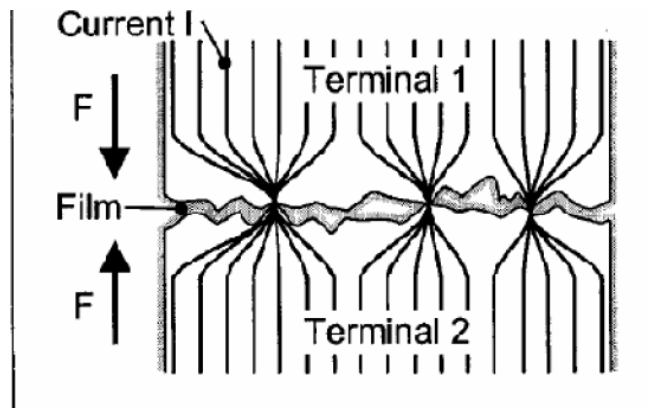
Kuva 1. Alkeellisen liusketyyppisen liukurenkaan rakenne. (Lähde Moog.com)

Kontaktityyppejä renkaan ja sitä hankaavan osan välillä on erilaisia ja se valitaan käyttökohteen mukaan. Kontakti voi olla kiinteä kuten hiiliharjoilla tai metalliliuskoilla muodostettu, tai kontaktissa voidaan käyttää nestemäistä metallia kuten elohopeaa. Kuituharjoista puhuttaessa tarkoitetaan harjasta, joka koostuu useammista metallisista tai komposiittilangoista, jotka hankaavat liukurengasta. Langattomat liukurenkaat eivät ole uusi keksintö, mutta ne ovat yhä suosituimpia nykypäivänä eritoten niissä esiintyvän vähäisen sähköisen häiriön vuoksi (Kumagai & Deardon 1997) (Zhang et al. 2022).

3. MIKROYMPÄRISTÖ

Liukurenkaan kontaktipinnoilla esiintyvä resistiivisyys aiheutuu epäpuhtauksista ja pienestä sähköä johtavasta pinta-alasta. Pieni kontaktiala johtuu pintojen pinnankarkeudesta. K.G Budinski arvioi kirjassaan *Surface Engineering for Wear Resistance*, että varsinainen kontaktiala on 1 ja 10 prosentin väliltä kokonaispinta-alasta (Danks 2013). Pinta-ala ei ole yhtenäinen vaan koostuu pienistä kohoumapisteistä, jotka koskevat liukuessa toisiaan ja useissa julkaisuissa näihin kohtiin viitataan a-pisteinä.

Kontaktipinnoille epäpuhtauksista muodostuva kalvo ja pieni pinta-ala aiheuttavat resistanssin liukurenkaassa. Tätä vastusta kutsutaan yleisesti rajoitusresistanssiksi. Rajoitusresistanssi määritellään resistanssin kasvuna, kun täysin johtava rajapinta korvataan rajoittavalla rakenteella. Tämä malli on esitetty kuvassa 2. (Dorsey et al. 2012)

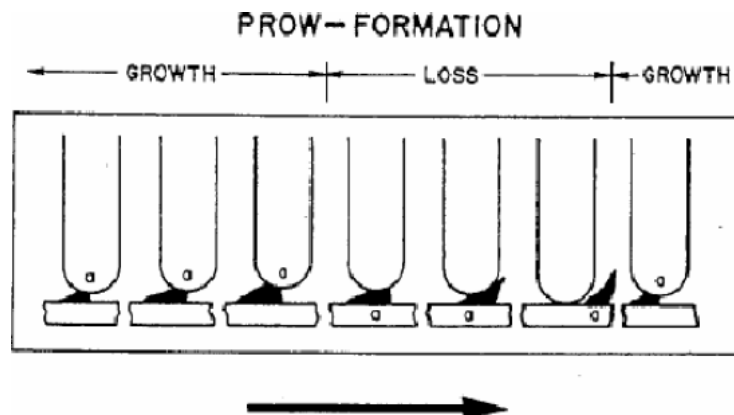


Kuva 2. Kontaktialue, kontaktipisteet ja sen välissä oleva kalvo (Lähde: Dorsey et al. 2012)

Kuva myös havainnollistaa hyvin, kuinka virta johtuu kontaktipinnoilla pääasiassa pienestä pinta-alasta. Hyvin pieni osa virrasta myös kulkeutuu elektronien tunnelointiefektin avulla kalvon läpi (Holm 1951). Tunnelointiefektillä viitataan tapahtumaan, jossa osa elektroneista löytävät tiensä kalvon kerroksien läpi vaikka resistanssin periaatteessa pitäisi olla niin suuri, ettei johtumista tapahdu.

Morton Antlerin kehittämä teoreettinen malli on yhä yleisin selitys liukukontaktiresistanssin vaihteluilmiöille. Tilanteissa, joissa metalli liukuu metallin päällä, metallia siirtyy renkaasta harjalle muodostaen kiilan, joka tarttuu harjaan. Jopa silloin, kun harja ja renkas ovat eri materiaalia, irtomateriaali siirtyy renkaasta liukujalle. Kontaktin menetys liukujasta tapahtuu tämän kiilan takia. Kun kiila irtoaa lopulta väsymismurtumalla, tämä aiheuttaa muutoksia resistanssissa. Antlerin mukaan kontaktin resistanssikohina syntyy

tartunta-liukuliikkeestä, kulumisroskan muodostumisesta ja pinnan kovettumisesta. Kuvassa 3 kuvataan tätä kiilan muodostumista. (Antler 1981)



Kuva 3. Kiilan muodostuminen kontaktipinnoille (Antler 1981)

Kuvassa 2 esiintyvä kalvo eli *Film*, on tärkeä osa liukukontaktin toimintaa, sillä tämä kalvo määrittelee paljolti sähköisen kontaktin laadun estäen tai mahdollistaen kiilojen muodostumisen (Kogut & Komvopoulos 2003). Käytännössä melkein kaikki keskustelut liukukontaktien suorituskykyongelmista ovat loppujen lopuksi keskusteluja sähköä johtavasta ohuesta liimakalvosta, jossa elektronit todella virtaavat pinnalta toiselle.

Kontakti toimisi sähköisessä mielessä kaikista tehokkaimmin, kun pinnat olisivat täysin puhtaat, jolloin myös resistanssi olisi minimissään. Puhtailla metallipinnoilla on kuitenkin taipumus absorboida pintaansa ympäröivien kaasujen molekyylejä, kontaktipinnoista irronneita aineita, vettä ja pölyä. (Slade 2014, luku 22.4) Liukurenkaan pyörimisnopeudella ja virralla on suuri vaikutus näiden aineiden muodostumiseen kontaktipinnoille. Suurilla nopeuksilla ja virralla lämpövaikutus on suurempi mahdollistaen monenlaisia kemiallisia reaktioita. Toisaalta paikallaan pitkään olleen liukurenkaan ja harjan kontaktipinnat alkavat monissa tapauksissa sitoutua kiderakenteeltaan toisiinsa.

Vaikka puhtaat metallipinnat johtavat parhaiten sähköä, se ei ole tavoiteltu tila liikkuvia kontaktipintoja suunniteltaessa. Hyvän liukurenkaan suunnittelu on tasapainottelua sähkönjohtavuuden ja kulumisen kanssa. Täysin puhtaat pinnat kuluvat huomattavan nopeasti, mikä huomattiin jo toisen maailmansodan aikaan, kun lentokoneet lensivät ensimmäisiä kertoja hyvin korkealla, missä ilman vesipitoisuus oli matalalla (Colucciello 1954) Huomattiin että vesi toimii voiteluaineena pintojen välissä ja sen puuttuminen nosti kitkavoimia huomattavasti.

4. MATERIAALIT JA KONTAKTITYYPIT

4.1 Materiaalit

Yksinkertaisimmillaan liukurengas on sähköä johtava pyörivä rakenne, johon on kytketty käämi tai virtapiiri. Tämä liitos tapahtuu yleensä jonkinlaisten harjojen välityksellä, ja näin ollen liitoksissa täytyy huomioida sähkönsiirtokapasiteetti, lämpötilan vaihtelut, kitkakerroin ja liu'un tasaisuus sekä harjan ja liukurenkaan välistä aiheutuva sähköinen kohina. (Slade 2014, luku 21.1) Tässä luvussa esitellään liukurenkaiden ja harjan materiaaleja, jotka ovat kiistämättä kaikkein eniten elinikään vaikuttava suunnitteluseikka ja joilla voidaan merkittävästi vaikuttaa kontaktin kykyyn kuljettaa laadukasta signaalia.

Liukurenkaan materiaaliksi valitaan jokin hyvin sähköä johtava materiaali, kuten kupari, teräs, messinki, hopea tai kulta. Kuparia hyödynnetään liukurenkaissa, joiden läpi tarvitsee saada suuri virta materiaalin hitaan lämpenemisen vuoksi (Sawa 2013, s. 3133–3141.) Toinen vaihtoehto suuremman virran läpivienniksi on laittaa enemmän liukuja peräkkäin. Esimerkiksi turbiinigeneraattorien liukurenkaat ovat melkein aina terästä ja liukuja laitetaan useampi peräkkäin. (Hall & Roberge 2010, luku 1) Yleisesti ottaen voidaan todeta, että terästä käytetään olosuhteissa, joissa mekaaninen kestävyys on tärkeää, ja kalliimpia metalleja käytetään signaalinsiirrossa.

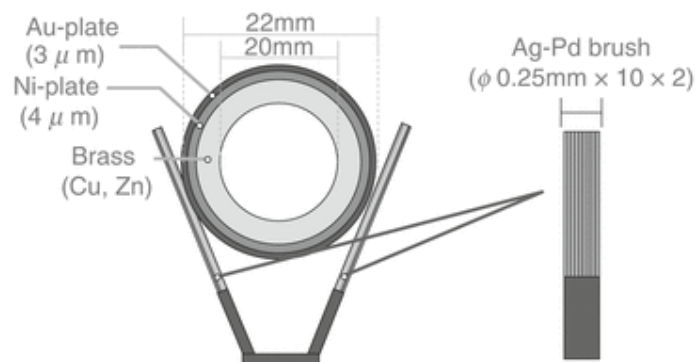
Kullan sekä monien muiden jalometallien inerttiys estää pintojen reagoimista ilmassa olevien kaasujen sekä veden kanssa. Esimerkiksi hopea ei juuri reagoi ilman kaasuihin muodostaen pintaan oksideita tai sulfaattia, minkä vuoksi sitä käytetään myös suoja-kerroksena liukurenkaissa, joiden käyttöasteet eivät ole korkeat. (Sawa 2013, s. 3133–3141) Liukurengas usein pinnoitetaan sen suunnitellun käyttöiän mukaan näillä kalliimmilla materiaaleilla ja alla on yleensä messinkiä tai kuparia.

4.2 Kontaktityypit

Liukutyypeistä yleisimmät mallit ovat kiinteät ja harjatyypiset liu'ut eli esimerkiksi auton laturissa esiintyvät kiinteät grafiittipalat, jotka painautuvat liukurengasta vasten, ja kuvassa 1 esiintyvä harjatyypinen liuku, joka koostuu yhdestä metalliliuskasta. Useimmat kiinteään liukukontaktiin valitut metallit ovat melko sitkeitä, mutta vastakontaktiin valittavan aineen on oltava sitkeydeltään mahdollisimman matala. Tämä sitkeysero estää suurempien kulutuspartikkeleiden irtoamisen ja vähentää yleisesti ottaen kulumista. (Slade 2014, luku 22.6) Yleisimmät harjan materiaalit ovatkin aina olleet hiilen ja grafiitin komposiitteja. Grafiitti tarjoaa voitelua ja johtaa hyvin sähköä, kun taas hiili tekee

harjasta lujan. Liukurenkaissa, jotka on suunniteltu nimenomaan mittaus- tai säätötekniikkaan, käytetään hiilen sijaan usein metalleja, joita sekoitetaan harjaan hyvän sähkönjohtavuuden tuottamiseksi (Braunovic et al. 2006, luku 4).

Mittaustekniikan sovelluksissa johdintyyppinen eli monofilamentti kontakti on kiinteää grafiittiliukua suositumpi ratkaisu. Harjat poistavat kiinteälle kontaktille vaikeita ominaisuuksia, kuten kitkavoimasta johtuvan kulumisen ja pintaan syntyvien aineiden vaikutuksen resistanssiin. Harja on yleensä metallinen ja saattaa sisältää useampaa eri metallia: on mahdollista käyttää esimerkiksi jalometalliydintä niiden joustavuuden takia ja kuparipunosta johtavuuden saamiseksi. Seuraavassa kuvassa on havainnollistettu liukurengaan ja harjatyypin liukujan pinnoittamista eri materiaaleilla.

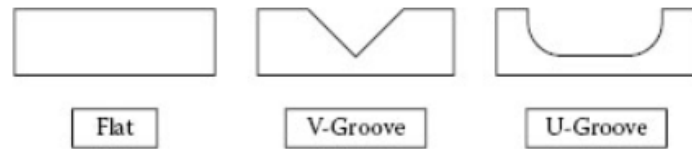


Kuva 4. Havainnekuva liukurengaan pinnoittamisesta. Harjatyypinen liuku.
(Sawa 2013, kuva 12)

Kuituharjan eli polyfilamenttiharjan käytössä tarvitsee ottaa huomioon samoja seikkoja kuin johdintyyppisessä kontaktissa, mutta voitelua ei usein tarvitse käytännössä ollenkaan. Tämä johtuu siitä, että kuituharjassa on useampia kontakteja liukurengaaseen ja kuituihin kohdistuvat voimat ovat pieniä. (Kuhlmann-Wilsdorf 1991, s. 5) Polyfilamenttiharjaa käytetään sovelluksissa, jotka tarvitsevat useita kontakteja per kanava ja äärimmäisen matalaa kosketusvastusta. Tällaisia ovat esimerkiksi tilanteet, joissa tavoitellaan korkeaa datanopeutta reaaliaikaisen ohjauksen sovelluksiin tai eheyttä herkkiin analogisiin signaaleihin.

4.3 Muotoilu ja kontaktien lukumäärä

Kontaktin koolla ja muodoilla voidaan vaikuttaa syntyvän kohinan määrään. Lisäksi siihen vaikuttaa kohtauskulma, jolla harjas tai jousi hankaa liukurengasta. Kun liukujatyypin on valittu, tulee tehdä vielä päätös optimaalisesta liukurengaspinnasta. Yleisimmät muodot on esitelty kuvassa 10.



Kuva 5. Liukurenkaan eri uratyypit. (Lähde: Slade 2014, luku 22.5.1.3)

Täysin tasainen pinta on useimmiten käytössä komposiittiharjojen kanssa. Esimerkiksi tyypilliset auton laturissakin olevat hiiliharjat hankaavat tasaista pintaa. Kaksi jälkimmäistä muotoa ovat yleisimmät mittaus- ja säätötekniikassa. V-ura on käytössä liukurenkaissa, joiden vastakontaktina on yksittäinen johdin. Tällöin ura ohjaa johdinta ja muodostuu kaksi kontaktipistettä. U-uraa käytetään ohjaamaan vastakontaktia, kun liukuja koostuu useista johtimista.

Riippumatta kontaktityypistä, kaikki liukurengaskokoonpanot hyötyvät kontaktien lukumäärän lisäämisestä. Yhden johtimen resistanssi jakaantuu monelle vähentäen huomattavasti oikosulun todennäköisyyttä. Virran jakautuminen useille johtimille parantaa piirin virransietokykyä ja pienempi tarvittava kontaktivoima vähentää yleensä renkaan kulumista. Lisäämällä ylimääräisiä kontakteja piiriin yleinen RMS-hälytaso (”root mean square”) alenee. Tämä tarkoittaa yleisen kohinatason laskemista. Erityisen herkkät signaalipiirit hyötyvät tästä. Lisäämällä liikaa kontakteja edut häviävät kuitenkin nopeasti ja liukurengas toimii huonommin. (Slade 2014, luku 22.5.3.6)

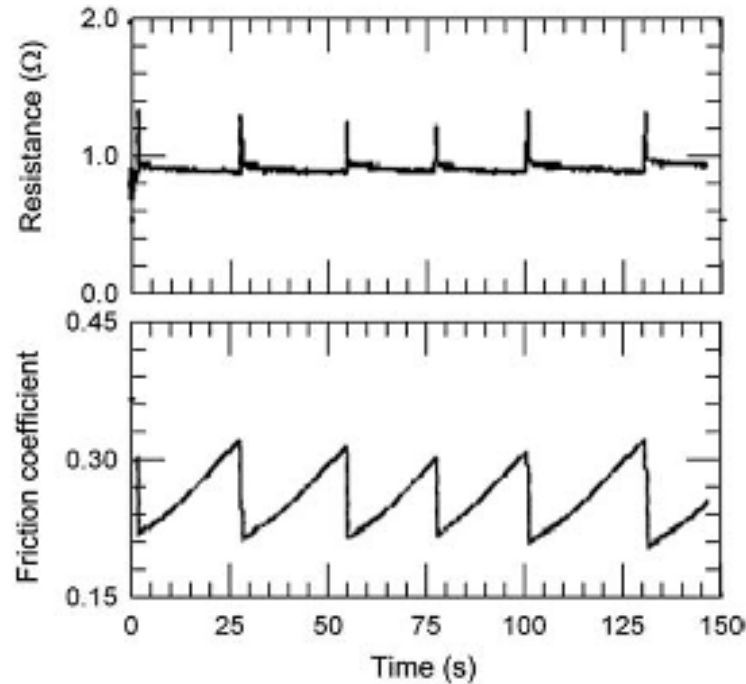
5. TRIBOLOGISET SEIKAT JA VOIMAT

Liukuvia pintoja on käytetty siirtämään piensignaaleja ja virtaa jo yli sadan vuoden ajan. Vaikka viime vuosina on alettu siirtymään langattomiin ratkaisuihin, on harja-liukurengas-systeemejä silti paljon käytössä niiden korkean siirtotehokkuuden ja yksinkertaisen rakenteen ansiosta. Materiaalin lisäksi muita huomioitavia mekaanisia seikkoja signaalilin eheydessä ovat kosketuspinta-alan koko ja sitä kautta paine. Tarttumissidoksen vahvuudella on merkittävä rooli kontaktien kulumisnopeudessa ja kitkakertoimessa. Kitkakerroin vaikuttaa suoraan liukurengaan signaalinsiirto-ominaisuuksiin ja tulee täten käsitellä.

5.1 Kitka ja kuluminen

Kontaktialueen kitka syntyy normaalivoiman painaessa pintoja toisiaan vasten. Staattisessa tilassa vaikuttaa suurempi kitkakerroin kuin liikkeessä, mikä aiheuttaa resistanssiin muutoksia ja sitä kautta myös vaikuttaa signaalin laatuun. Staattisen kitkakertoimen suuruuteen vaikuttaa pintojen välinen *liimautuminen eli adheesio*. Tällä viitataan atomien välisiin vuorovaikutusvoimiin, jotka estävät pintojen liikkumista toisiinsa nähden. Tällaisia voimia ovat esimerkiksi Van der Waals voima ja metallisidoksien voimat. Adheesiota tapahtuu ainoastaan puhtailla kontaktipinnoilla, mutta myös pinnoilla esiintyvät epäpuhtaudet lomittuvat ja reagoivat keskenään vaikuttaen kitkaan. (Braunovic et al. 2006, luku 3.1.3)

Sähkökontakti, joka on staattisessa tasapainossa liikkeen aloittamisen hetkellä, sisältää useita kosketuspisteitä, joissa tapahtuu elastista muodonmuutosta normaalivoiman vaikutuksesta. Kitkasta aiheutuva poikittainen voima alkaa siirtää jännityskenttää mikä johtaa harjan siirtymiseen ilman liukumista, kunnes liitos "epäonnistuu" äkillisesti. Tämän jälkeen liukuminen tapahtuu alentuneen poikittaisvoiman (eli liikekitkakertoimen) kanssa, kunnes pinnat uudelleentarttuvat toisiinsa. (Slade 2014, luku 22.2.3) Tätä kutsutaan stick-slip-ilmiöksi ja sitä käytetään yleisesti selittämään kitkakertoimen vaihtelua kontaktipinnoilla. Tätä ilmiötä on tutkittu paljon ja sen vaikutus kontaktiresistanssiin on kiistaton.

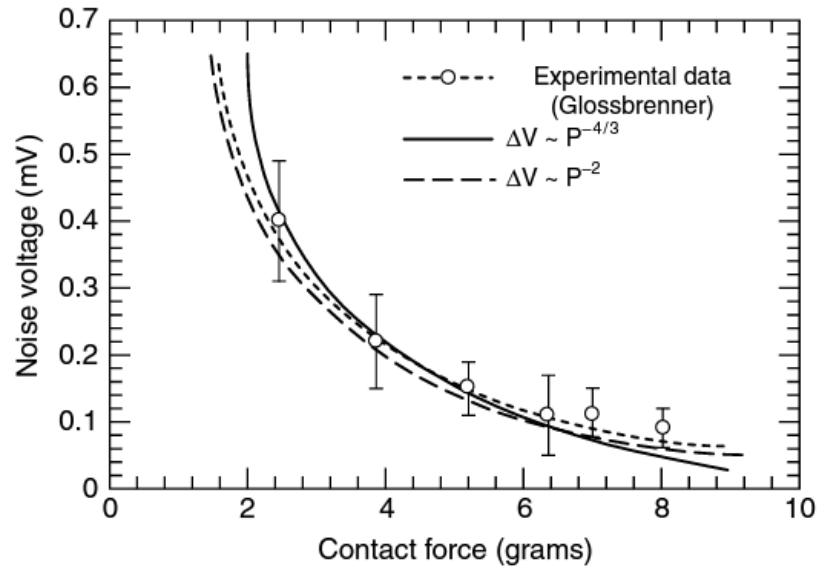


Kuva 6. Kontaktin resistanssi ja kitkakerroin samasta mittauksesta. (Alkuperäinen lähde: Gao & Kuhlmann-Wilsdorf 1990. Kuva otettu lähteestä Braunovic et al 2006 s. 405)

Nämä tyypilliset sahalaitaiset liukusuhte-käyrät osoittavat tämän kontaktin liikehdinnän äkillisenä tapahtumana, mutta jokaista liikahdusta edeltää joukko mikrotapahtumia yksittäisissä kosketuspisteissä ja stick-slip on siten aikariippuvainen prosessi.

Liukurenkaan nopeudella voidaan vaikuttaa tämän ilmiön syntymiseen, sillä yleensä hitailla pyörimisnopeuksilla ilmiö toistuu useammin. Kullekin renkaalle voidaan määrittää rajanopeus, jolla kontaktit lähtevät liukumaan ja jos nopeus pidetään tässä rajanopeudessa, tätä tarttumisilmiötä tapahtuu mikrotasolla käytännössä koko ajan. Erityisesti mittaustekniikassa käytetyt monofilamenttityyppiset liukujat voivat olla herkkiä tälle stick-slip-vaikutukselle, johtuen taipuisan kontaktijousen herkyydestä värinävaikutuksille (Slade 2014, luku 22.2.3).

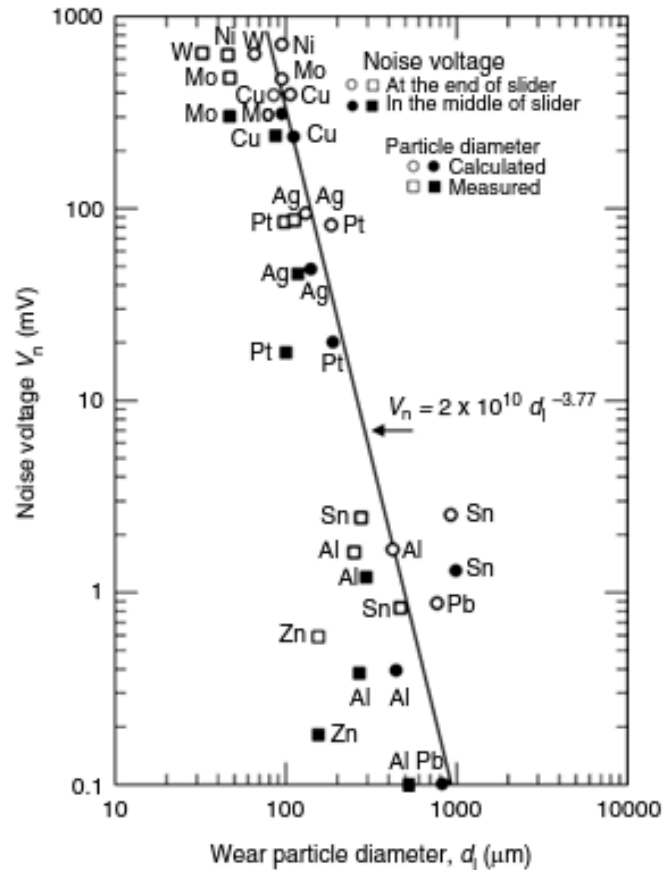
Pääasiallinen voima kontaktipinnoilla on normaalivoima, joka pitää harjaa liukurengaspintaa vasten. Tämän voiman vastavoima jakaantuu kontaktipinnan mikrotasolla havaittaviin pieniin kohoumiin ja aiheuttaa pinnassa elastista muodonmuutosta. Muuttuva kitkavoima syntyy, kun vastapinta yrittää liikkua harjan alla ja tapahtuu äkinäisiä romahduksia liiketilassa. Kitkavoimaa tasapainottaa harjan joustavuus ja reaktivoima. Myös tämä normaalivoima on merkittävä tekijä sähköisten häiriöiden eli kohinan syntyyn liukurenkaassa. Kuvassa 5 on esitetty kontaktivoiman vaikutus sähköiseen kohinaan.



Kuva 7. Kohinan jännite kontaktivoiman funktiona. (Alkuperäinen lähde: Mano & Oguma 1990, kuva otettu oppikirjasta Braunovic et al 2006)

Mittausdata kontaktivoiman merkityksestä kohinalle on lähteestä riippumatta hyvin selvä ja voidaankin todeta, että kontaktivoimaa kasvattamalla saadaan merkittävästi parannettua kontaktin laatua. Kontaktivoiman lisääminen vähentää kuitenkin huomattavasti kontaktin elinikää ja lisää kitkaa sekä lämpövaikutusta. Yleensä voiman lisääminen onkin hyvin lyhytkestoinen ratkaisu signaalin laadun parantamiseksi.

Viimeisimpänä tribologisena ilmiönä käsitellään pinnankarheus. Vastoin intuitiivista olettamusta karheampi pinta on syntyvien häiriöiden kannalta yleensä parempi kuin siileä. Tutkimuksessaan Tsuchiya ja Tamai (1970) saivat muodostettua yhteyden kulumispartikkeleiden koon ja syntyvän kohinan välille.



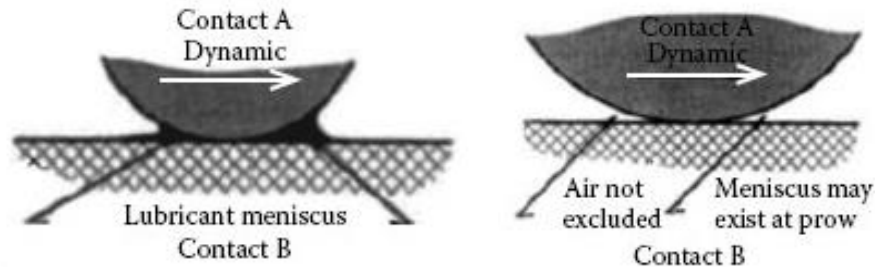
Kuva 8. Kohinan riippuvuus kulumispartikkeleiden koosta. (Alkuperäinen lähde: Tsuchiya & Tamai 1970, kuva otettu oppikirjasta Braunovic et al. 2006 s.409)

Kohinan vähentymistä suuremmalla pinnankarheudella selitetään siten, että suurempi pinnankarheus irrottaa isompia kulumispartikkeleita pinnoista ja pitää pinnat puhtaampina, mikä taas vähentää sähköistä kohinaa. (Braunovic et al. 2006, s.406–409)

5.2 Voitelu ja normaalikäyttö

Voitelu on tärkeimpiä elementtejä, jolla liukurenkaan kulumista ja syntyvää kohinaa voidaan säädellä. Suurin osa liukukontakteista on jollain tavoin voideltuja ja nämä voiteluaineet valitaan yleisestä sähkökoskettimissa käytettävien voiteluaineiden ryhmästä. Esimerkiksi erilaisia rasvoja tai synteettisiä polymeerejä käytetään. Näiden voiteluaineiden tärkein ominaisuus on niiden kyky kiinnittyä kosketuspintaan. Sidosprosessi voi olla vahva molekyylien välinen voima (kovaalenttinen tai Coulombin sidos) tai heikko molekyylien välinen voima (yleisimmin Van der Waalsin voima). (Slade 2014, luku 22.4.4)

Voitelu voidaan jakaa kahteen erityyppisen tilanteeseen. Toisessa kontaktipintaa suo-
jaa voiteluaineen kerros ja toisessa voiteluainetta on niin vähän, että suojaavaa ker-
rosta ei pääse syntymään. Kontaktipinnoilla on useita pieniä kontaktipisteitä ja näiden
ympäriin muodostuu ilmatiivis tila, kun voiteluaineet tukevat kontaktipistettä kapillaari-
ilmiön ja pintajännityksen seurauksena. (Slade 2014, luku 22.4.4)



Kuva 9. Riittävästi voiteluainetta ja riittämätön voitelu kontaktipinnoilla. (Slade 2014, luku 22.4.4)

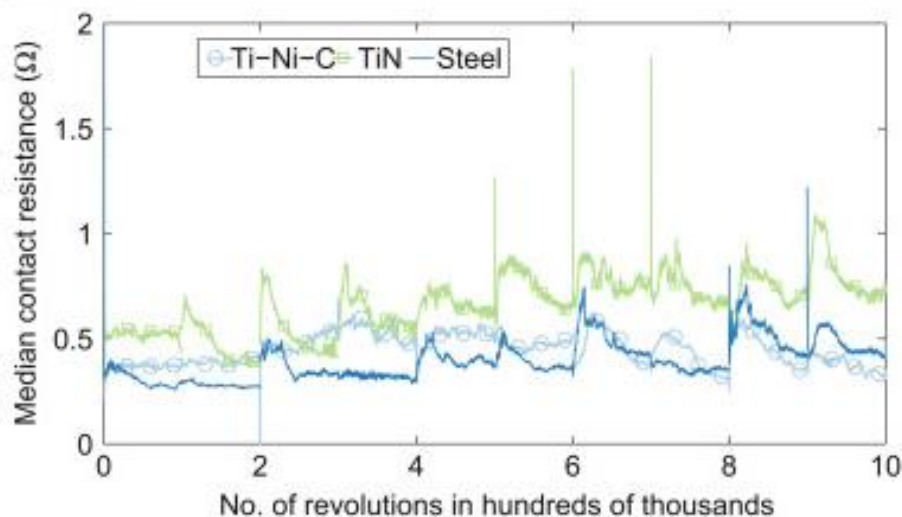
Kosketusliitokset liikkuvat ja kuluvat ympäristössään. Kosketuspinnat saattavat olla suurimman osan ajasta täysin voideltuja. Tällöin kontaktin resistanssi ja melu pysyvät yleisesti alhaisina ja vakaina. Kuluminen ei ole suurta ja ilmenee pääasiassa puhtaina metallisina juovina renkaan pinnassa. Kitka riippuu harjan pyyhkäisyn taajuudesta kontaktipisteen yli: yleensä mitä korkeampi taajuus, sitä suurempi kitka. Käyttöään jatkuessa kuluma-aineita syntyy tasaisella nopeudella, ja jokainen partikkeli kerää ympärilleen voiteluaineita ja roskia, imien samalla nesteitä kontaktipinnoilta. Tämän seurauksena jossain kohti kontaktipintojen voiteluominaisuudet muuttuvat ilmatiiviistä avoimeksi voiteluaineen hävittyä. (Slade 2014, luku 22.8.3)

Ei-ilmatiiviin voitelun tapauksessa, joko alkuperäisenä tilana tai siirtymänä ilmatiiviistä voitelusta, kontaktit jatkavat toimintaa suunnilleen samalla kitkalla, kontaktiresistanssilla ja melulla. Kuluma-aine näyttää vähemmän metalliselta kuin anaerobisesti voiteluissa kontakteissa ja on tummempi väriltään. Ympäristöstä peräisin olevat epäpuhtaudet tai satunnaiset voiteluaineet voivat helposti päästä kontaktialueelle. Tämä kontaktien ilmahakuinen jakso voi olla varsin pitkä, jos renkaan pyörimisnopeudet ovat alhaiset ja saatavilla on kuitenkin riittävästi jotain voitelua. Toisaalta se voi olla lyhyt, jos pyyhkäisy nopeus on korkea eli kontakti on suunniteltu anaerobiseksi.

Jossain kohti kontaktiresistanssin vaihtelu liukurenkaan pyöriessä nousee korkeaksi kuluma-aineiden häiritessä kontaktialuetta. Syntyy voimakasta sähköistä kohinaa ja kuluminen kiihtyy huomattavasti. Tämän vaiheen alkamista pidetään yleisesti sähköisen kontaktin tehokkaan käyttöään päättymisenä. Se on peruuttamaton ilman tehokasta puhdistusta ja uudelleenvoitelua kokoonpanolle. Jos kontakti jatkaa liukumistaan tämän

korkean melun rajan yli, todennäköisin tilanne on, että kohina yhtäkkiä vaimenee ja kuluma-aine muuttuu jälleen puhtaan metalliseksi, samalla kun kulumisnopeus nousee räjähdysmäisesti. Tämä on kontaktien käyttöiän päättymisvaihe, sillä kontaktit kuluvat pian loppuun, eikä niiden puhdistaminen ja uudelleenvoiteleminen ole enää kunnostusvaihtoehto. (Slade 2014, luku 22.8.3)

Normaalissa käytössä liukurengas pyörii harvoin koko ajan. Käyttöikänsä mahtuu paljon taukoja, jonka jälkeen kohinan resistanssi melkein poikkeuksetta nousee hetkellisesti. Tästä esimerkkinä Grandin ja Wiklundin (2016) tekemät kokeet kolmella eri materiaali-ryhmällä. Näitä hetkellisiä nousuja voidaan selittää stick-slip ilmiöllä ja pintaan kertyvillä epäpuhtauksilla, mutta tutkimuksessa nostetaan esiin myös se, että kontaktipintojen hangatessa toisiaan myös materiaalien kovuus kasvaa. Tästä seuraa se, että kontaktipinta-alat pienenevät entisestään, kun materiaalien joustavuus pienenee. (Grandin & Wiklund 2016)



Kuva 10. Eri materiaaleista valmistettujen liukurenkaiden sähköinen kohina käyttöiän funktiona. (Lähde: Grandin & Wiklund 2016)

Tasaiseen sähköisen kohinan nousuun esitetään selitykseksi, että lämpenemisestä johtuva resistanssin lasku ei riitä kumoamaan pinnoille syntyvän patinan luomaa rajoitusresistanssia. (Grandin & Wiklund 2016)

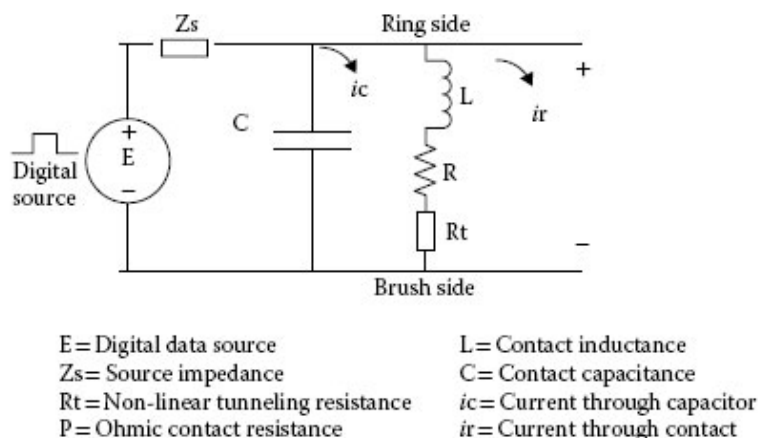
6. DATAN EHEYS

Yksi tärkeimpiä ja halutuimpia liukurenkaiden ominaisuuksia on sen kyky siirtää mahdollisimman ehyttä signaalia. Tällaisia sovelluksia on paljon: tuulimyllyn lapojen säätö, pyörivä tutkan antenni ja lääketieteen tietokonetomografia. Liukurenkaan käyttö osana datan ja signaalien siirtoa on tasapainotuspeli. Suurella pintapaineella ja puhtailla kosketuspinoilla saataisiin puhtaampaa dataa, mutta liukurenkaan ikä pienenisi merkittävästi kulumisen vuoksi. Tässä luvussa onkin tarkoitus perehtyä, mitä rajoituksia liukurengas tuottaa järjestelmään sen ollessa kytkettynä signaalinsiirtolinjaan.

Viimeisten 50 vuoden ajan vaihteleva resistanssi liu'ussa on ollut pääparametri, jonka mukaan signaalin laatua on arvosteltu (Siddeswara et al. 2011). Tämä resistiivisyyden vaihtelu tuottaa jännite- ja virtahäiriöitä signaaliin eli niin sanottua kohinaa. Jatkuvasti kasvavan tiedonsiirtonopeuden ja järjestelmien monimutkaisuuden vuoksi liukurenkaiden ominaisuudet on valittava siten, että signaalin etenemishäiriöt (kuten soiminen, heijastukset ja vaiheviive), signaalien välinen vuorovaikutus (cross-talk) ja ympäristön aiheuttama sähkömagneettinen häiriö minimoituvat. Liukurengas aiheuttaa tähän vielä omat ilmiönsä, kun yhden kierroksen aikana kontaktit ovat sekä maksimaalisen että pienimmän resistanssin alueella. Tähän resistanssiin vaikuttaa etäisyys, joka muuttuu liukurenkaan kontaktin ja johtimien välillä renkaan pyöriessä.

Kontaktin resistanssi on hyvä mittari, kun tutkitaan analogista signaalia ja matalan nopeuden digitaalista dataa. Nopean digitaalisen datan osalta pitää ottaa kuitenkin enemmän asioita huomioon, kuten kontaktin impedanssin vaihtelut ja kohinan taajuus.

(Slade 2014, luku 22.2)

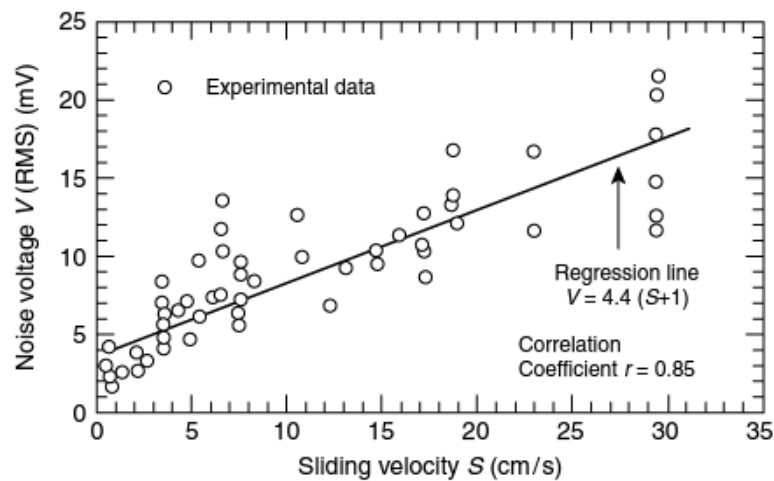


Kuva 11. Piirikaavio näyttää liukurenkaan ja RCL-piirin impedanssiin vaikuttavia tekijöitä (Slade 2014, luku 22.3)

Kuvan 10 piirikaaviossa on esitetty tekijöitä, jotka teoreettisesti vaikuttavat liukurengas-kokoonpanon siirtämän digitaalisen datan laatuun. Näistä käsitellään kaikki muut paitsi induktanssi, jonka vaikutukset mittaustekniikan liukurenkaissa ovat pienet.

6.1 Resistanssi

Aikaisemmin käsiteltiin kuinka alhainen pyörimisnopeus altistaa stick-slip-ilmiolle, mutta mittauksien mukaan myös kohina kasvaa suoraan verrannollisesti, jos nopeutta kasvatetaan (Braunovic et al. 2006, s. 402–413). Tästä saatua mittaustietoa on esitelty kuvassa 8.



Kuva 12. Kohinan jännite liukumisnopeuden funktiona. (Alkuperäinen lähde: Tani-guchi et al. 1985, kuva otettu oppikirjasta Braunovic et al. 2006)

Liukurenkaiden kohina on usein katsottu lineaariseksi ongelmaksi, joka noudattaa Ohmin lakia. Matalan kohinatason tarkkuusliukurenkaita kehitettiin alun perin analogista maailmaa varten. Usein nämä liukurenkaat sijoitettiin järjestelmän vahvistuksen eteen, ja mahdollinen liukurenkaan aiheuttama kohina voimistui ja havaittiin anturivirheenä. Tyypillinen tekninen vaatimus näille liukurenkaille oli $20 \text{ m}\Omega$, mikä vastasi muutamien mikrovolttien kohinaa, kun siirrettiin milliampeerin signaaleja. Oleellista tässä on, että näillä järjestelmillä oli yleensä hyvin alhainen taajuusvaste, joten kaikki yli muutaman kilohertsin oleva melu suodatettiin pois eikä vaikuttanut niiden tuottamaan dataan. (Slade 2014, luku 22.3.2)

Liukurenkaiden kautta tapahtuva digitaalinen tiedonsiirto alkoi tuoda esiin liukurenkaiden aiheuttamia siirtolinjaongelmia. Ongelmat voidaan jakaa kahteen pääalueeseen.

Ensimmäinen on yleinen siirtolinjaongelma, joka aiheutuu sijoittamalla liitäntäkokoontapano, jolla on sovittamaton ja vaihteleva impedanssi (liukurengas), ominaisimpedanssiltaan vakioisen tiedonsiirtolinjan sisään. Toinen on kosketusmeluongelma. Digitaalisen liukuvan kosketuksen kohinan kriittiset parametrit eroavat merkittävästi analogisesta. Ongelma siirtyy amplitudiongelmasta taajuusongelmaan. Kosketusmelu 20 mΩ:n alueella jää digitaalisten signaalien kohinan alle, mutta MHz-tasolla oleva kohina voi aiheuttaa bittivirheitä dataan.

Digitaalisessa keskustelussa termi ”katkokset” (intermittence) on tärkeämpi kuin kontaktista aiheutuva kohina. Katkokset viittaavat lyhytkestoisiin tapahtumiin, joissa sähköisessä kontaktissa esiintyy korkea resistanssi. Korkea resistanssi ja lyhyt kesto voivat olla signaalitasosta ja signaalin nopeudesta riippuvaisia, mikä tarkoittaa, että ne vaihtelevat signaalin tason ja nopeuden mukaan. (Dorsey et al. 2012)

Esimerkiksi, jos katkoksia esiintyy aikaskaalalla, joka vastaa signaalin nousuaikaa ja ne ovat merkittävä osa signaalin tasosta (esim. 10 dB pienempi), ne voivat aiheuttaa värähtelyä ja lisätä bittivirheiden määrää digitaalisessa signaalin siirrossa. Katkokset vaikuttavat digitaalisignaaleihin kriittisellä tavalla, ja niiden minimoiminen on tärkeää luotettavan datansiirron ylläpitämiseksi. (Dorsey et al. 2012)

6.2 Ei-lineaarinen resistanssi

Aikaisempien resistanssia aiheuttavien tekijöiden lisäksi on otettava huomioon sähkövirran aiheuttama vastus, joka ei ole lineaarinen. Sähkövirta on tärkeä toimintaparametri sähköpiireissä ja sähköisissä kontakteissa sillä kontaktin suorituskyky on riippuvainen virrasta ajan funktiona. Liukutilanteessa virta siirtyy jo valmiiksi jännitystilassa olevien kontaktien läpi ja prosessin aikana syntyy lämpöä. Tämä aiheuttaa Holmin & Ragnarin (1967) mukaan kolme seikkaa (Slade 2014, luku 22.3.3):

1. Sähköä johtavien pisteiden ympäristön kalvojen lujuus heikkenee
2. Haihtuminen kiihtyy kontaktialueella
3. Sähköä johtavien pisteiden metallin myötölujuus heikkenee

Nämä tekijät edesauttavat kontaktialueen kasvua ja kontaktin resistanssin vähene- mistä. Merkittävin muutos tapahtuu silloin, kun kontaktin jännite (rajoitusresistanssi ker- taa virta) lähestyy Holmin & Ragnarin (1967) kuvailemaa pehmenemisjännitettä. Resis-

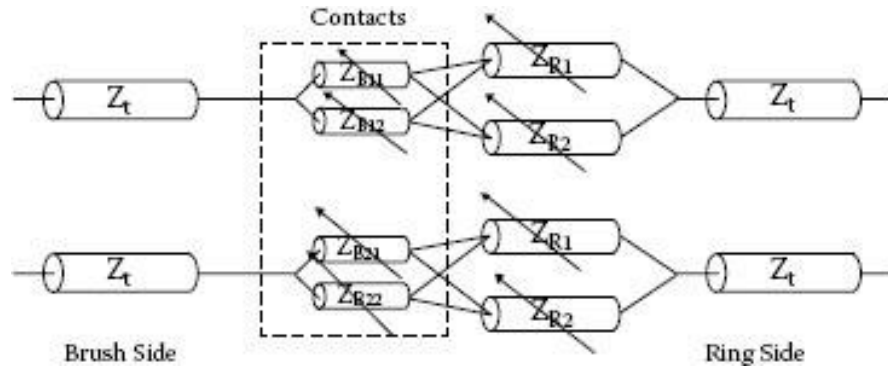
tanssi ja siten kontaktin jännite laskevat välittömästi alempaan arvoon, mikä viittaa suurempaan metalliseen kosketusalaan. (Slade 2014, luku 22.3.3)

Kun samaa kontaktia kuormitetaan jälleen suurella virralla, tapahtuu edellä kuvattu prosessi uudelleen. Kun kontaktin jännite putoaa tasolle, joka on lähellä Holmin kuvailemaa sulamisjännitettä, epätasaisuudet sulavat. Lisäksi korkeammalla virralla ja sitä kautta korkeammassa lämpötiloissa kemialliset reaktiot voivat tapahtua nopeammin; eli epäorgaaniset aineet, oksidit, sulfidit, kloridit ja muut kontaktin epäpuhtaudet reagoivat liukurenkkaan ja kontaktin metallien kanssa. Kun virtaa vähennetään tai katkaistaan, kontaktialueet jäähtyvät, epätasaisuudet supistuvat, enemmän höyryä voi tiivistyä ja nesteiden viskositeetti kasvaa, mutta kylmähitsaus ja kemialliset reaktiotuotteet säilyvät. (Slade 2014, luku 22.3.3) Tätä sähkövirran aiheuttamaa lämmitystä kutsutaan Joule-lämmitykseksi. On havaittu, että tämä epälineaarisuus on riippuvainen signaalin taajuudesta. Epälineaarisuus johtuu virran syklisestä vaihtelusta ja sen seurauksena tapahtuvasta Joule-lämmityksestä kosketusalueella.

Alkuperäisiä tutkimuksia on tehty korkeataajuisilla siniaalloilla, mutta epälineaarisuus monimutkaistuu digitaalisten datan tapauksessa neliöaallon monien taajuuskomponenttien vuoksi. Tämä kontaktin epälineaarisuus on yksi passiivisen intermodulaation häiriön lähde korkeataajuisia sähköisiä signaaleja kuljettavassa siirtolinjassa ja yksi potentiaalinen signaalin aikaviiveen lähde suurtaajuusneliöaallon vasteessa. (Slade 2014, luku 22.3.3)

Korkeataajuisia vaihtovirtasignaaleja välittävissä kontakteissa esiintyy myös efekti nimeltään *virranahto* (Malucci 2001, s. 179). Signaalin taajuuden kasvaessa virta konsentroituu lähemmäksi johtimen, tai tässä tapauksessa kontaktin, pintaa ja rajoittaa virran kulkua. Tämä virranahto johtuu vaihtovirran aiheuttamasta muuttuvasta magneettikentästä.

Seuraavassa kuvassa on havainnollistettu vielä aikaisemmin mainittua liukurengaskoonpanon muuttuvaa impedanssia. Kuluminen ja liukurenkkaan sähköä johtavan etäisyyden vaihtelut ovat suurimpia tekijöitä, jotka vaikuttavat tähän jokseenkin epälineaariin muutokseen. (Dorsey et al. 2012)

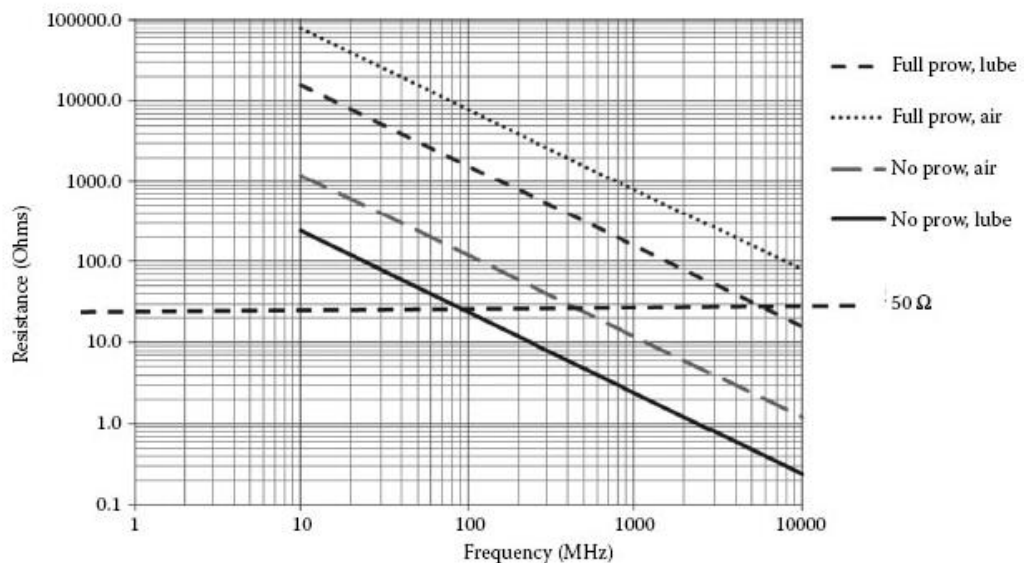


Kuva 13. Liukurenkaan kokoonpanon sähköinen malli. Havainnollistus muuttuvista impedansseista (Lähde: Dorsey et al. 2012)

Kuvassa impedanssin läpi kulkeva nuoli havainnollistaa muuttuvaa arvoa. Harjojen johtimien oletetaan olevan häviöttömiä ja omaavan vakioimpedanssin, mutta itse kontaktien impedanssit eivät ole vakiot.

6.3 Kontaktin impedanssi

Kontaktin impedanssin reaktiiviset elementit, kapasitanssi ja induktanssi, ovat tärkeitä huomioitavia asioita vaihtovirtasignaalien yhteydessä kuten Dorsey et al. (2012) toteaa. Kontaktin induktanssi ei ole ongelma matalilla virroilla, mutta korkeataajuisilla signaaleilla kapasitanssi on huomioimisen arvoinen. On mahdollista, että kahden johtimen välille syntyvä kapasitanssi kuljettaa häiriösignaalia piiristä toiseen eli syntyy häiriövirtaa. Kapasitiiviset häiriöt syntyvät potentiaalierojen synnyttämästä sähkökentästä, joten liukurenkaassa kontaktin ja renkaan väliin voi tulla kapasitanssin synnyttämää häiriösignaalia.



Kuva 14. Arvioitu reaktiivinen kapasitanssi taajuuden funktiona. (Dorsey et al. 2012)

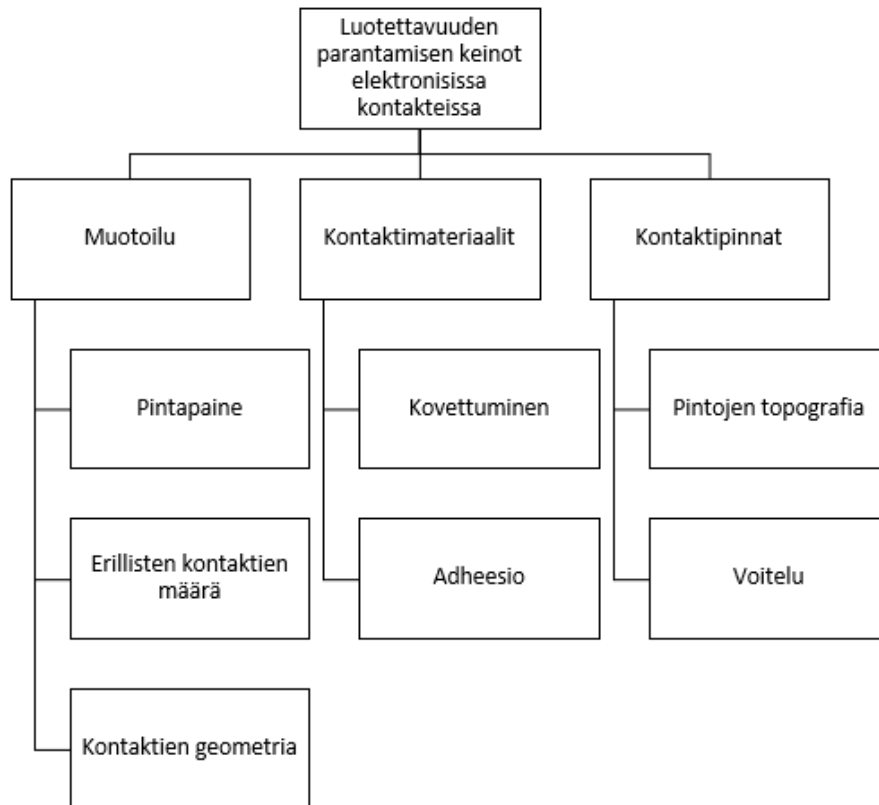
Kuvassa 11 Dorsey et al. on arvioinut muutamalla oletuksella kontaktin reaktiivista kapasitanssia ja toteaa, että pienemmillä kuin 100Mhz taajuuksilla kapasitanssilla ei ole suurta merkitystä. Toisaalta suurilla tiedonsiirtonopeuksilla reaktiivinen kapasitanssi laskee niin pieneksi, että periaatteessa tietoa voisi kulkeutua metallisen kontaktin kadotessa hetkellisesti. Tuloksia voidaan verrata kuvaan merkatun 50 Ohmin rajaan, joka aikaisemmin määriteltiin järkeväksi rajaksi virheille.

Kokeessa tehtiin oletuksia kontaktin koosta, kontaktien välisen kosketuksen laadusta ja sähköä johtavan alan suhteesta koko kontaktin alaan (Dorsey et al. 2012). Voidaankin sanoa, että on epätodennäköistä, että kontaktien välinen etäisyys on yhtä pieni kuin pinnankarheus. Lisäksi pienet kontaktipinta-alat ja kevyt kontaktipaine eivät erityisesti edesauta kapasitiivisen kytkennän syntymistä.

Vastaava analyysi voitaisiin suorittaa myös kontaktien impedanssin induktiivisille elementeille. Vaikka induktanssi on tärkeä mittauskohde suurempien virtojen kontakteille, induktiivinen kytkentä ei yleensä ole merkittävä tekijä mittaus- ja ohjausliukurenkaiden kontakteissa. Voidaankin todeta, että sekä induktanssilla että kapasitanssilla voi olla tärkeä rooli mittaus- ja ohjauslaitteiden liukurenkaissa sekä muussa laitteessa olevassa yleisessä liitántä rakenteessa, mutta niiden vaikutus itse kontaktipinnoilla on suhteellisen vähäinen verrattuna resistanssiin.

7. YHTEENVETO

Liukuvien sähköisten kontaktien on suoritettava vaikea tribologinen tasapainoilu: metalli-metalli-kosketuksen on oltava riittävän hyvä sähkövirran johtamiseksi alhaisella kosketusvastuksella ja resistanssin vaihtelulla, mutta myös tarpeeksi huono kulumisen minimoimiseksi. Pintakalvojen on oltava riittävät voitelemaan kontakteja, mutta ne eivät saa olla liian vahvoja, jotta resistanssi ei nousisi hankalan korkeaksi. Tämä "hyvä mutta ei liian hyvä" on perustavanlaatuinen ristiriita, joka liittyy erottamattomasti liukuvien kontaktien suunnitteluun. Kuva 11 tiivistää tärkeimmät seikat, jotka on muistettava liukuvien kontaktien suunnittelussa erityisesti mittaus- ja säätötekniikassa.



Kuva 15. Pääasialliset keinot elektronisen kontaktin parantamiseksi (Perustuu lähteeseen: Braunovic et al. 2006, s. 372).

Sähkön johtuminen kontaktin läpi, olipa kyse staattisesta tai liukuvasta kontaktista, riippuu metallisista pienistä sähköä johtavista kohdista eli a-pisteistä. Useimmissa kontak-

teissa on syklinen suhteellinen liike kontaktin osien välillä, eli kontakti kulkee useita kertoja saman alueen yli. Useimmat (mutta eivät kaikki) liukuvat kontaktit ovat voiteluaineella käsiteltyjä ympäristön hallitsemiseksi kontaktialueella tietyillä parametreilla sekä valitulla materiaalilla. Ympäristöstä tulevat epäpuhtaudet voivat päästä a-pisteisiin ja muuttaa niiden johtavuutta, tarttuvuutta ja kemiallista luonnetta. Näiden ulkopuolisten aineiden vaikutukset ovat yksi suurimpia tekijöitä kontaktin suorituskyvyn ja eliniän sääntämisessä.

Liukuvien ja staattisten kontaktien suunnittelijoiden sekä käyttäjien tulisi tietää ja kiinnittää huomiota mikroympäristöön kontaktin sähköä johtavissa kohdissa sekä kontaktikoonpanon rakenteeseen. Minkä tahansa liukuvan kontaktilaitteen suorituskyky riippuu sen suunnittelusta ja sen soveltuvuudesta itse laitteeseen ja sen ympäristöön.

Kontaktimateriaalien kovettuminen ja toisiinsa liimautuminen ovat ongelmia, jotka tulevat esille riippuen käyttöasteesta. Suurilla nopeuksilla lämpövaikutus on suurempi ja pinnat kovettuvat lisäten resistanssia. Toisaalta vähäisellä käytöllä oleva liukurengas kärsii usein pintojen yhteenliimautumisesta sekä pienillä pyörimisnopeuksilla stick-slip-ilmisestä.

Voidaan todeta yhteenvetona, että suurin tekijä liukuvan kontaktin kohinaan on kontaktipintojen dynaaminen luonne, johon vaikuttaa useita asioita: kontaktivoima, pyörimisnopeus, (stick slip ilmiö), hapettuminen, kiilan muodostuminen, pintojen kalvot sekä voitelu. Helpoin tapa vähentää häiriöitä on kasvattaa kontaktipinta-alaa tai lisätä kontaktien määrää. Pintojen puhdistaminen ja kontaktipaineen kasvattaminen ovat kummatkin lyhytaikaisia ratkaisuja.

LÄHTEET

- Antler, M. (1981) Sliding Wear of Metallic Contacts. IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology. [Online] 4 (1), pp. 15–29.
- Braunovic, M., Konchiëtis, V. V., Myshkin, N.K. (2006) Electrical contacts: fundamentals, applications and technology. Boca Raton: CRC Press.
- Danks, D. (2013). Tribology of Electrical Contacts. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) Encyclopedia of Tribology. Springer, Boston, MA. https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/978-0-387-92897-5_1061
- Dorsey, G. F., Coleman, D. S., Witherspoon, B. K. (2012) 'High Speed Data across Sliding Electrical Contacts', in 2012 IEEE 58th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). [Online]. 2012 IEEE. pp. 1–12.
- Gao, C. and Kuhlmann-Wilsdorf, D. (1990) Proceedings of 36th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Institute of Electric and Electronic Engineers, Inc. pp. 292–300
- Grandin, M. & Wiklund, U. (2016) Wear and electrical performance of a slip-ring system with silver–graphite in continuous sliding against PVD coated wires. Wear. [Online] 348-349:138–147.
- Hall & Roberge. (2010) "Carbon brush performance on slip rings," Conference Record of 2010 Annual Pulp & Paper Industry Technical Conference, San Antonio, TX, USA, pp. 1–6, doi: 10.1109/PAPCON.2010.5556522.
- Holm, R. (1951) Errata: The Electric Tunnel Effect across Thin Insulator Films in Contacts. Journal of applied physics. [Online] 22 (9), pp. 1217–1217.
- Kuhlmann -Wilsdorf, D. (1991) 'Uses of theory in the design of sliding electrical contacts', in Electrical Contacts - 1991 Proceedings of the Thirty-Seventh IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts. [Online]. 1991 IEEE. pp. 1–24.
- Kumagai, H. & Deardon, J. D. (1997) Contactless Magnetic Slip Ring. European patent office.
- Kutz, M. (2013). Handbook of Measurement in Science and Engineering, Volume 2 - 48.7.3 Slip Rings. John Wiley & Sons. Retrieved from <https://app.knovel.com/hot-link/pdf/id:kt011BPV71/handbook-measurement/slip-rings>
- Kogut, L. & Komvopoulos, K. (2003) Electrical contact resistance theory for conductive rough surfaces. Journal of applied physics. [Online] 94 (5), pp. 3153–3162.
- LUIGI COLUCCIELLO. (1954) BRUSH WEAR AT HIGH ALTITUDES. Department of Naval Architecture and Marine Engineering. Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/36707295.pdf>
- Mano, K. & Oguma, T. (1990) The frequency characteristics of sliding precious metal contact noise, Proceedings of 5th International Research Symposium on Electrical Contact Phenomena. Munich, W. Germany. v. I, pp. 297–300
- Malucci, R. D. (2001) 'High frequency considerations for multi-point contact interfaces', in Proceedings of the Forth-Seventh IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (IEEE Cat. No.01CH37192). [Online]. 2001 IEEE. pp. 175–185.
- Moog. Slip Ring Fundamentals [verkkoaineisto]. Saatavissa (Viitattu 4.10.2023): https://www.moog.com/images/News/blogs/BasicSlipRingFigure1_prod_banner_narrow.png

Sawa, K. (2013). Sliding Electrical Contacts and Materials. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) Encyclopedia of Tribology. Springer, Boston, MA. pp. 3133–3141. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_439

Slade, P. G. (ed.) (2014) Electrical contacts: principles and applications. 2nd ed. [Online]. Boca Raton: Taylor & Francis.

Siddeswara, Prasad. V., Misra, P., Nagaraju, J. (2011) 'An Experimental Study to Show the Behavior of Electrical Contact Resistance and Coefficient of Friction at Low Current Sliding Electrical Interfaces', in 2011 IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). [Online]. 2011 IEEE. pp. 1–7.

Taniguchi, M., Inoue, T., Mano, K. (1985) The Frequency Spectrum of Electrical Sliding Contact Noise and Its Waveform Model. IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology. [Online] 8 (3), pp. 366–371.

Tsuchiya, K. & Tamai, T. (1970) Fluctuations of contact resistance in sliding contact. Wear. [Online] 16 (5), pp. 337–349.

Zhang, Y., Yang, J., Jiang, D., Li, D., Qu, R. (2022) Design, Manufacture, and Test of a Rotary Transformer for Contactless Power Transfer System. IEEE transactions on magnetics. [Online] 58 (2), pp. 1–6.