

BL10A1000 Kandidaatintyö ja seminaari

KANDIDAATINTYÖ

7.10.2009

Mika Lehtisare

0280777

Säte 5

Laakerikipinöintilaskurin toteuttaminen FPGA- piirillä

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Sähkötekniikan osasto

Mika Lehtisare

Laakerikipinöintilaskurin toteuttaminen FPGA- piirillä

Kandidaatintyö

2009

22 sivua, 11 kuvaa ja 3 taulukkoa

Ohjaaja ja tarkastaja: Professori Jero Ahola

Hakusanat: FPGA, laakerivirrat

FPGA- piirit ovat viime vuosina kehittyneet tehokkaammiksi, mutta samalla niiden hinta on laskenut tasolle, jolloin ne ovat vaihtoehto yhä useampiin sovelluksiin. Kandidaatintyöni aiheena oli suunnitella ja mahdollisesti toteuttaa sulautettu laite, joka laskisi signaalissa esiintyvien pulssien lukumäärää. Sitä käytettäisiin mitattaessa kipinöintiä sähkömoottorin laakeroinnissa. Kipinät havaitaan moottorin ulkopuolelta UHF- antennilla. Antennisignaalista poimittavat pulssit ovat hyvin nopeita, joten digitaaliselta logiikalta vaaditaan myös erityistä nopeutta. Tämän takia laitetta lähdettiin toteuttamaan esimerkiksi mikrokontrollerin sijasta FPGA- piirin avulla. Pulssilaskurin toteutus onnistui suhteellisen vaivattomasti FPGAlla, ja sen toimivuutta käytännössä päästiin testaamaan todellisissa olosuhteissa.

ABSTRACT

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Department of Electrical Engineering
Mika Lehtisare

Designing a counter for bearing current arching using a FPGA-circuit

Bachelor thesis
2009

22 pages, 11 figures and 3 tables
advisor and supervisor: Professor Jero Ahola
Keywords: FPGA, bearing currents

FPGA- circuits have grown more powerful over the few last years, but at the same time their price has lowered to a level, when they become a considerable option to a great number of applications. This work was about designing and possibly making an embedded device, which could count the number of pulses occurring in a signal. It would be used in measuring arching in bearings of an electric motor caused by bearing currents. The sparks would be detected from the outside of the motor by an UHF-antenna. The pulses occurring in the signal are very fast, so this also demands great speed from the digital logic. This is why the device was chosen to be designed with a FPGA-circuit instead of, for example, a common microcontroller. It was considerably easy to implement the design using FPGA, and it was possible to test if it actually worked it in a real environment.

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT LYHENTEET JA MERKINNÄT	2
1. JOHDANTO	3
2. LAAKERIVIRRAT	4
2.1 Muodostuminen	4
2.2 Vaikutukset sähkömoottorissa	5
2.3 Laakerikipinöinnin havaitseminen ulkoisella antennimittauksella	6
3. SULAUTETTU LAAKERIKIPINÄLASKIN	7
3.1 Analoginen osa	8
3.2 Digitaalinen osa	8
3.2.1 Spartan-3E FPGA-piiri	9
3.2.2 FPGA:lle sulautettu ohjelmistoprosessori PicoBlaze	11
3.2.3 Digitaalisen logiikan toteutus	11
3.2.4 PicoBlaze- ohjelmistoprosessorin ohjelma	13
4. MITTAUKSET JA TULOKSET	14
4.1 Testaus signaaligeneraattorilla	14
4.2 Testaus antennilla ja sähkömoottorilla	15
5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	20
5.1 Tehtävänasettelu ja tavoitteet	20
5.2 Tärkeimmät toimenpiteet ja tulokset	20
5.3 Ehdotetut jatkotoimenpiteet	20
6. Lähdeluettelo	21

KÄYTETYT LYHENTEET JA MERKINNÄT

CLB	Configurable logic block, ohjelmoitava logiikkalohko
DCM	Digital clock manager, digitaalinen kellonohjain
FPGA	Field-programmable gate array, ohjelmoitava logiikkapiiri
IOB	Input/output block, sisään- tai ulostulolohko
LCD	Liquid crystal display, nestekidenäyttö
LED	Light emitting diode, valodiodi
PROM	Programmable read only memory, ohjelmoitava ROM-muisti
RAM	Random access memory, muisti, jota voidaan lukea ja kirjoittaa
ROM	Read only memory, muisti jota voidaan vain lukea.
SMA	SubMiniature version A, koaksiaalinen liitin
UHF	Ultra high frequency, mikroaaltojen taajuusalue
USB	Universal serial bus, yleiskäyttöinen sarjaväylä
VHDL	Hardware description language, laitteistokuvauskieli

1. JOHDANTO

Laakerivirrat ovat muodostuneet merkittäväksi tekijäksi vaihtosähkömoottorien laakerien kulumisessa. Suuri syy tähän on taajuusmuuttajakäyttöjen yleistyminen (Muetze 2006). Laakerivirtojen mittaaminen perinteisillä menetelmillä on vaatinut hankalia mittausjärjestelyjä ja kalliita laitteistoja, joten mittausten tekeminen vaativissa teollisuusympäristöissä ei välttämättä onnistu. Laakerivirran pulssien aiheuttamat kipinät aiheuttavat kuitenkin sähkömagneettista säteilyä, joka voidaan havaita sopivalla antennilla. Näin voidaan kehittää mittausjärjestelmä, jolla voidaan tehdä havaintoja laakerikipinöinnin määrästä helposti käytössä ja ajossa olevista moottoreista. Mitattavaan moottoriin ei tarvitse tehdä mitään muutoksia, riittää kun asetetaan antenni sopivalle etäisyydelle. Tällaista mittauskeinoa on sovellettu ja aikaisemmin esimerkiksi tehomuuntajien kunnonvalvonnassa (Judd, 2005). Laakerikipinöinnin määrää havainnoitiin laskemalla kipinän aiheuttamien pulssien määrää tietyllä ajanjaksolla, kuten 30 sekunnin aikana. Helppoja reaaliaikaisia mittauksia varten tarvittiin laskuri, joka laskeisi pulssien kokonaismäärää, sekä näyttäisi hetkellisen aktiivisuuden tietyillä aikaväleillä. Tämä laskuri päätettiin toteuttaa käyttäen FPGA (Field-Programmable Gate Array)-piiriä, sekä sille sulautettua ohjelmistoprosessoria.

2. LAAKERIVIRRAT

Laakerivirralla tarkoitetaan sähkömoottorin roottorin laakeroinnin läpi kulkevaa sähkövirtaa, joka syntyy laakerin yli indusoituvasta jännitteestä. Laakeroinnin läpi kulkevat virtapulssit edesauttavat laakerin kulumista. Laakerivirtoja on esiintynyt sähkömoottoreissa kautta aikojen, mutta varsinkin nykyisissä taajuusmuuttajakäytöissä niiden aiheuttamat vahingot ovat suuresti lisääntyneet. Taajuusmuuttajassa luodaan 3-vaiheinen vaihtojännite pulssileveysmodulaation avulla. Nykyaikaisissa taajuusmuuttajissa kytkentätaajuudet ovat verrattain suuria, jolloin nopeat kytkennät aiheuttavat laakereiden läpi purkautuvia suuritaajuisia virtapulsseja, jotka ovat laakerin kulumisen kannalta erityisen haitallisia (Muetze 2006).

2.1 Muodostuminen

Kuten edellä mainittiin, suuritaajuiset laakerivirtapulssit syntyvät laakerin yli indusoituvasta jännitteestä. Kun jännite ylittää laakereiden öljykalvon läpilyöntijännitteen, alkaa virta kulkea laakerin lävitse. Tämä jännite voi syntyä kolmella eri tavalla (ABB 2000).

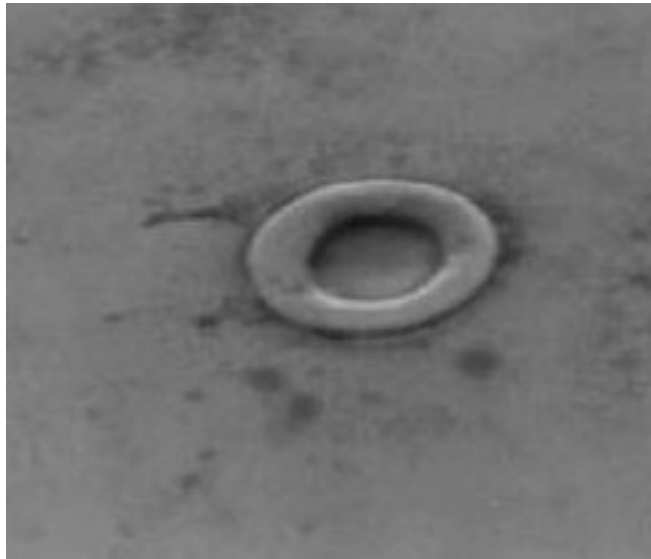
Kiertävän suuritaajuinen laakerivirran aiheuttaa staattorikäänityksessä kiertävä suuritaajuinen vuo, joka indusoi jännitteen akselinpäiden välille. Suuritaajuinen vuo aiheutuu käänityksestä staattorin runkoon kulkevien kapasitiivisten vuotovirtojen epäsymmetriasta (ABB 2000). Virtapiirinä toimii akseli, laakerointi ja staattorin runko.

Akselinmaadoitusvirralla tarkoitetaan virtaa, joka kulkee akselin käyttämän laitteen maadoituksen kautta takaisin teholähteeseen. Vuotovirrat palaavat aina teholähteeseen reittiä, jolla on pienin impedanssi. Jos moottorin runko on huonosti maadoitettu, saattaa sen potentiaali nousta teholähteen maatasoon nähden niin korkeaksi, että virta kulkee laakeroinnin ja akselin läpi käytettävän laitteen maadoituksen kautta (Muetze, Binder 2006).

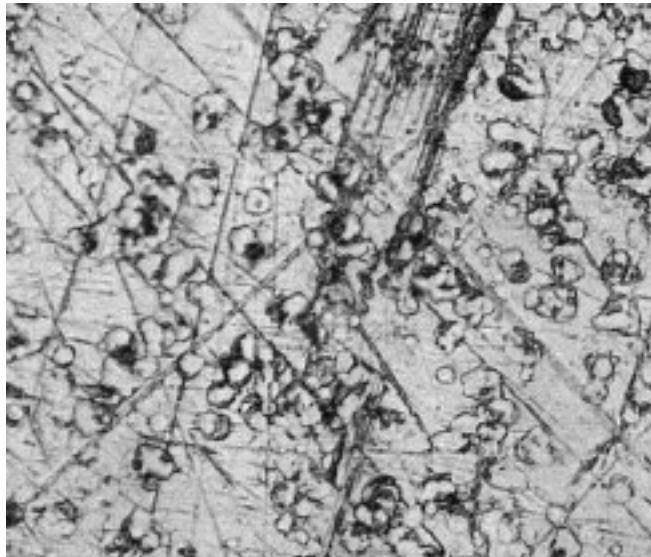
Kapasitiivinen purkausvirta aiheutuu yhteismuotoisen jännitteen jakautumisesta moottorin sisäisissä hajakapasitansseissa. Tämä on yleistä erityisesti pienillä koneilla, jos akselia ei ole maadoitettu käytettävän laitteen kautta (Muetze, Binder 2006).

2.2 Vaikutukset sähkömoottorissa

Laakerin öljykalvon läpilyöntijännitteen ylittyessä syntyy kipinä, jolla on samanlainen vaikutus kun pistehitsauksella. Pieni määrä materiaalia sulaa. Kun tämä toistuu samassa kohtaa useita kertoja, syntyy mikrokraatereja. Kuvassa 2.1 on esitetty lähikuva tällaisesta mikrokraaterista. Kuva 2.2 on laakeripinnasta, johon on muodostunut useita mikrokraatereja.



Kuva 2.1. Lähikuva mikrokraaterista (SKF 2008).



Kuva 2.2. Laakeripinta, johon on muodostunut mikrokraatereita (SKF 2008).

Kun laakerin kuulat tai rullat osuvat mikrokraatereihin, alkaa laakeripinnalle muodostua peräkkäisiä poikkittaisia uria. Tämä johtuu mekaanisten värähtelyjen resonansseista. Ilmiö on samanlainen, kuin on havaittavissa hiekkateillä, kun autojen huonoista iskunvaimentimista johtuen on syntynyt pyykkilautamaista pintaa. Nämä urat ovat

usein nähtävissä jo paljain silmin. Kuvassa 2.3 on esitetty laakerin sisäura, jossa urat näkyvät selkeästi.



Kuva 2.3. Pitkittäisiä uria laakerin sisäuralla (SKF 2008).

Kulumisen edettyä tähän vaiheeseen, alkaa laakeri olla jo vaihdon tarpeessa.

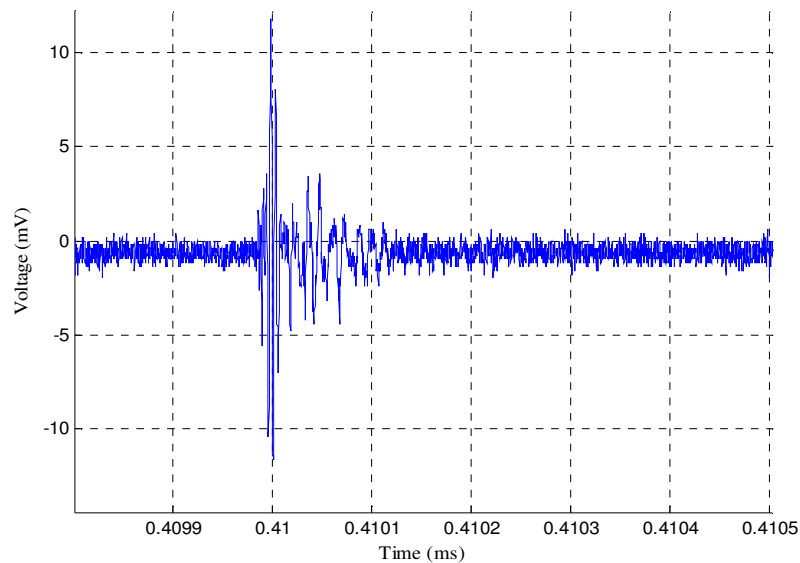
2.3 Laakerikipinöinnin havaitseminen ulkoisella antennimittauksella

Laakerivirtojen syntymistavat ja vaikutukset on tunnettu jo pitkään. Laakerivirtoja voidaan havainnoida esimerkiksi mittaamalla sähkömoottorin akselijännitettä. Laakerikipinän aiheuttamat virtapussit saavat aikaan lyhyen jännitteen putoamisen, joita voidaan koettaa tarkkailla mittauksessa. Pelkkä akselijännitteen mittaaminen ei kuitenkaan anna tarpeeksi luotettavaa tietoa laakerivirroista. Itse laakerivirtojen mittaaminen vaatisi esimerkiksi laakerin eristämisen rungosta, mitä ei voida käytännössä tehdä kenttäolosuhteissa (Särkimäki 2009).

Laakerikipinään liittyvä nopea virtapulssi synnyttää sähkömagneettista säteilyä UHF (Ultra High Frequency)-taajuusalueella. Virtapulssit voidaan siis havaita antennilla sähkömoottorin ulkopuolelta. Näin voidaan siis helposti tehdä mittauksia kentällä ajossa olevista tavallisista sähkömoottoreista ilman monimutkaisia mittausjärjestelyitä.

3. SULAUTETTU LAAKERIKIPINÄLASKIN

Laakerikipinän aiheuttamat antennisignaalista havaittavat pulssit ovat hyvin lyhytkestoisia. Pulssin pituus on keskimäärin 100 ns, mutta signaalin erilaisten kulkureittien ja oskillaatioiden voidaan olettaa vaikuttaneen pulssin pituuteen. Itse kipinän aiheuttama pulssi voi olla pituudeltaan vain 5 ns (Särkimäki 2009). Kuvassa 3.1 on esitetty antennisignaalista mitattu yksittäinen pulssi.



Kuva 3.1 Laakerikipinän aiheuttama pulssi antennisignaalisissa.

Nopeista pulseista johtuen mittausten tekeminen esimerkiksi tallentavalla digitaalisella oskilloskoopilla on hankalaa, sillä tarvittava näytteenottotaajuus on erittäin korkea. Näytteenottotaajuuden ollessa enemmän kuin muutama giganäytettä sekunnissa, oskilloskoopin muisti täyttyy nopeasti, eikä ole mahdollista tehdä muutamaa millisekuntia pidempiä mittauksia kerralla. Kipinöinnin aktiivisuutta tutkittaessa, täytyisi saada mitattua pitkiäkin aikavälejä, kuten sekunteja, tai jopa minuutteja. Reaaliaikaisen mittausten tekeminen laakerikipinöinnin aktiivisuudesta käyttäen oskilloskoopin muistia ei tietenkään ole mahdollista. Oskilloskooppiin tallennetun datan purkaminen ja analysoiminen vaativat käytännössä erillisen tietokoneen, ja melkoisesti laskentatehoa.

Laakerikipinöinnin aktiivisuuden reaaliaikaista havainnointia varten voitaisiin kehittää yksinkertainen laskuri, joka laskisi vain yksittäisten laakerikipinöiden aiheuttamien pulssien lukumäärää. Laite voisi näyttää reaaliajassa, pulssien kokonaismäärän lisäksi, lukemaa kipinöinnin hetkellisestä aktiivisuudesta, esimerkiksi yhden sekunnin

aikana saapuneista pulsseista. Näin voitaisiin tehdä havaintoja erilaisten toimenpiteiden välittömästä vaikutuksesta laakerikipinöinnin aktiivisuuteen.

3.1 Analoginen osa

Laitteen tulisi havaita antennisignaalista laakerikipinän aiheuttama nopea pulssi, ja muuttaa se digitaaliseksi tuloksi laskurille. Signaali tarvitsee suodatusta, jotta muita ympäristön häiriöitä ei tulkita laakerikipinöinnin aiheuttamiksi pulsseiksi. Esimerkiksi taajuusmuuttajakäytöstä teollisuusympäristössä voi syntyä paljonkin häiriöitä signaaliin. Erittäin lyhyiden pulssien takia vaadittava kaistanleveys ylettyy yli 300 Mhz (Särkimäki 2009), ja tämä aiheuttaa melko kovia vaatimuksia laitteen analogisen osan suunnittelulle. Tästä syystä analogista toimintaa ei lähdetty toteuttamaan laitteeseen erillisillä komponenteilla, vaan mittauksissa päätettiin käyttää apuna digitaalista oskilloskooppia, jonka avulla analogisesta signaalista saatiin poimittua pulssit digitaaliseksi lähdöksi laskurille.

3.2 Digitaalinen osa

Tarvittiin siis laskuri, jolla lasketaan pulssien lukumäärä, ja voidaan esittää kipinöinnin hetkellistä aktiivisuutta. Laitteen digitaaliselta logiikalta vaaditaan pulssien lyhyen keston takia suurta nopeutta. Pulssien epäsäännöllisyyden ja lyhyen keston vuoksi pulssilaskuri tuntui järkevältä toteuttaa asynkronisena. Tämä tarkoittaa sitä, ettei pulssin tarvitse sattua samalla ajanhetkellä järjestelmän kellopulssin aikana tullakseen havaituksi. Muuten tarvittaisiin erittäin korkeita kellotaajuuksia.

Laitteessa tulisi olla yksinkertainen käyttöliittymä. Siinä tarvitaan myös jonkinlainen lähtö, kuten näyttö, jolta mittausdataa voidaan lukea. Tällaisten toimintojen toteuttamiseen olisi käytännöllistä käyttää mikro-ohjainta. Hyvänä esimerkkinä LCD (Liquid Crystal Display)- näytön ohjaaminen vaatii tietynlaisia sekvenssejä, ja millisekuntien viiveitä. Näitä on hankalaa toteuttaa erillisillä logiikkapiireillä, mutta helppo ohjelmoida mikro-ohjaimen ohjelmaksi. Useimmissa mikro-ohjaimissa käytetyt matalat kellotaajuudet ovat kuitenkin nopeista pulsseista johtuen tähän sovellukseen liian hitaita.

Tähän ongelmaan käytännöllisen ratkaisun tarjoaa FPGA- piiri, sekä sille sulautettu mikroprosessori. FPGA- piirillä voidaan toteuttaa yhdellä sirulla lähes mitä tahansa

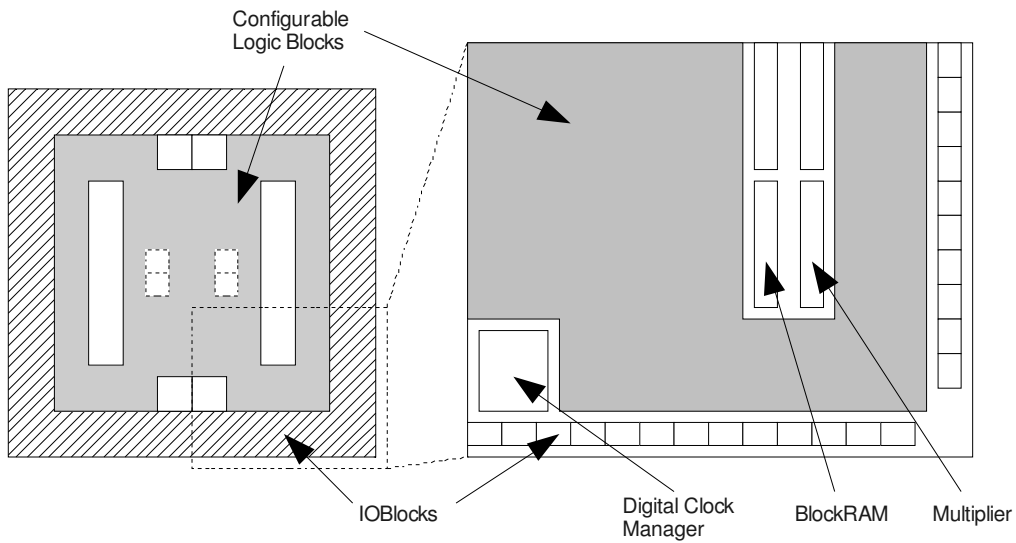
loogisia operaatioita, joten sillä voidaan korvata erilliset logiikkapiirit. Haluttu logiikka voidaan määritellä ohjelmallisesti käyttäen esimerkiksi VHDL (Hardware description language)- laitteistokuvauskieltä. Logiikan suunnittelu tällä tavalla muistuttaa ohjelmointikielellä kirjoittamista. Samalle piirille voidaan myös sulauttaa täysin toiminnallinen mikroprosessori. Laitteen tarvitsema nopea ja asynkroninen digitaalinen logiikka, sekä käyttöliittymän toteutusta helpottava mikroprosessori voidaan siis toteuttaa yhdellä FPGA- piirillä.

FPGA- piiriin ohjelmoitu logiikka häviää aina, kun käyttöjännite katkaistaan. Piiri täytyy siis ohjelmoida uudelleen joltakin ulkoiselta muistilta aina, kun laite kytketään päälle.

3.2.1 Spartan-3E FPGA-piiri

Laite päätettiin toteuttaa käyttäen Xilinxin Spartan-3E-sarjan FPGA- piiriä. Se on suunniteltu suuren volyymin tuotteisiin, joissa matala hinta on tärkeää, joten se on kustannuksiltaan edullinen ratkaisu. Yksittäiskappaleissa, kuten tässä esitellyssä laakerikipinälaskurissa, kustannukset eivät tosin ole käytännössä kovin merkittävät. Spartan-3E tarjoaa kuitenkin edulliseen hintaansa nähden hyvän suorituskyvyn. Se tukee kellotaajuuksia 5 Mhz:stä jopa yli 300 Mhz:iin. Sen IO- portit tukevat monia eri logiikkastandardeja eri jännitetasoilla, joten liittyminen muihin piireihin on helppoa.

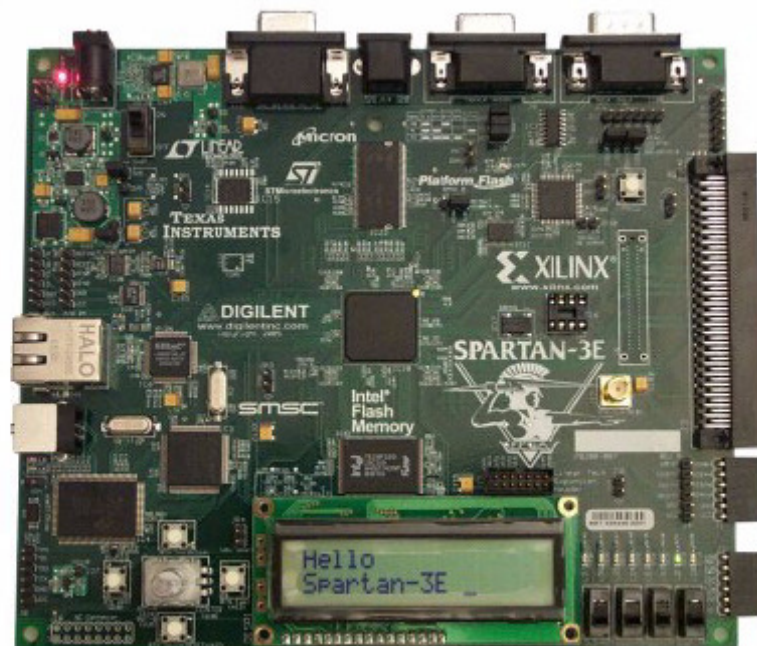
Spartan-3E sarjan piirin arkkitehtuuri koostuu viidestä perusosasta. CLB(configurable logic block) on ohjelmoitava logiikkalohko, joita yhdistelemällä muodostetaan tarvittava logiikka. Niitä käytetään myös muistielementteinä, kuten salpoina ja kiikkuina. IOB(input/output block) on lohko, jonka avulla ohjataan tietoa ulkoisten IO- liityntöjen ja piirin sisäisen logiikan välillä. Vaikkakin CLB- lohkoja voidaan käyttää muistina yksittäisten bittien säilyttämiseen, piiriltä löytyy myös Block RAM- lohkoja suurempien datamäärien tallettamiseen. DCM(digital clock manager)- lohkoja voidaan käyttää kellosignaalien tarkkaan käsittelyyn, kuten viivästämiseen, jakamiseen, tai kalibrointiin. Piirillä on myös kertolaskukykykköjä, joista voi olla hyötyä esimerkiksi nopeassa reaaliaikaisessa signaalinkäsittelyssä. Kuvassa 3.2 näkyy kaavio Spartan-3E piirin eri lohkojen sijainneista (Xilinx 2008).



Kuva 3.2. Spartan-3E sarjan arkkitehtuuri.

Xilinxiltä löytyy prototyyppien helppoa kehitystä varten kehitysalusta Spartan-3E FPGA Starter Kit Board. Tämä kehitysalusta sisältää esimerkiksi kytkimiä, ledejä sekä LCD-näytön, joilla voidaan helposti toteuttaa käyttöliittymän toiminnallisuuksia. Pulssilaskuri päätettiin toteuttaa käyttäen tätä kehitysalustaa, sillä tarvittava digitaalinen logiikka ja koko käyttöliittymä voitiin toteuttaa sen avulla. Kehitysalusta on esitetty kuvassa 3.3.

UG230 (v1.1) June 20, 2008



Kuva 3.3. Spartan-3E FPGA Starter Kit Board (Xilinx 2008b).

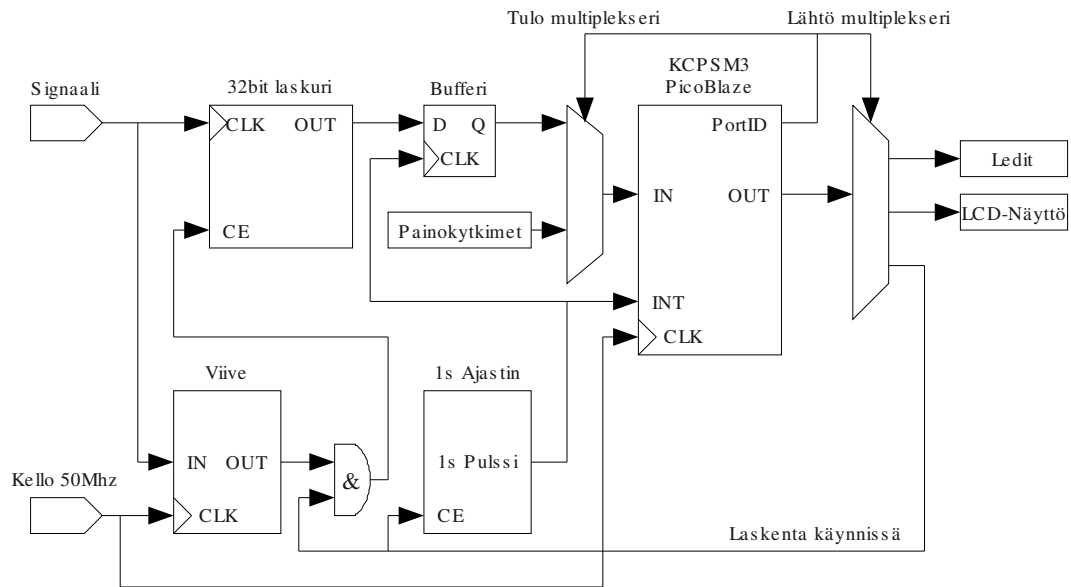
Starter Kit Board sisältää koaksiaalisen SMA (SubMiniature Version A)- liittimen, jonka avulla saadaan luotettavasti siirrettyä korkeataajuisia signaaleja. Tätä liitintä käytettiin mitattavan signaalin sisään tulona. LCD- näyttö on yleisesti käytetty malli, jossa on kaksi riviä, joista kummallekin mahtuu 16 merkkiä. Käyttöliittymän toteutusta varten kehitysalustalta otettiin käyttöön neljä painokytäkintä. Starter Kit Board sisältää Xilinxin Platform Flash PROM(Programmable Read Only Memory)- piirin, jota voidaan käyttää FPGA- piirin logiikkaohjelmoinnin säilyttämiseen, kun käyttöjännite poistetaan. Kun laite kytketään päälle, FPGA- piiri ohjelmoidaan tästä muistista. Kehitysalustalla on myös USB(Universal Serial Bus) liityntä, jonka kautta voidaan ohjelmoida itse FPGA- piirin lisäksi myös Platform Flash PROM- piiri ilman mitään erillisiä ohjelmointilaitteita. Kehityslaudan käyttö on siis kokonaisuudessaan hyvin selkeää, eikä siinä tarvita juurikaan muita laitteita.

3.2.2 FPGA:lle sulautettu ohjelmistoprosessori PicoBlaze

PicoBlaze on Xilinxin kehittämä FPGA- piirille sulautettava mikroprosessori. Se on 8-bittinen, ja erittäin kompakti. Se vie esimerkiksi kehitysalustalta löytyvältä Spartan-3E-piiriltä vain 0.3 % käytettävissä olevasta tilasta. PicoBlazen lisääminen projektiin, ja liittäminen FPGA:lla oleviin muihin logiikkapiireihin on varsin yksinkertaista. PicoBlazen käskykanta on pienehkö, ja jokaisen käskyn suorittaminen vie saman ajan, kaksi kellopulsssia. Tämä tekee aikakriittisten ohjelmarutiinien kirjoittamisen helpoksi. PicoBlaze sisältää 16 yleiskäyttöistä kahdeksanbittistä rekisteriä, sekä 64 tavua RAM (random access memory)- muistia sisäänrakennettuna.

3.2.3 Digitaalisen logiikan toteutus

Pulssilaskurin digitaalinen logiikka toteutettiin käyttäen VHDL- laitteistokuvauskiel- tä. Logiikan suunnittelussa käytettiin apuna Xilinxin tekemää esimerkkisovellusta taa- juuslaskimesta, jossa oli monia hyödyllisiä ratkaisuja, joita voitiin soveltaa pulssilas- kurissa (Xilinx 2006). Pulssilaskurin digitaalisen logiikan toimintakaavio on esitetty kuvassa 3.4.



Kuva 3.4 Pulssilaskurin digitaalisen logiikan kaaviokuva.

Laitteen keskeisin komponentti on 32-bittinen asynkroninen laskuri. Kipinän aiheuttama pulssi värähtelee hieman, joten tarvittiin keino estää värähtelyjen virheellinen tulkinta uusiksi pulsseiksi. Tämä toteutettiin yksinkertaisella viiveellä. Kun pulssi saapuu, se aktivoi lyhyen viiveen, jonka aikana laskurin arvoa ei voi lisätä. Toinen toiminnan kannalta tärkeä osa on ajastin, joka tuottaa pulsseja yhden sekunnin välein. Sulautettu mikro-ohjain lukee asynkronisen laskurin arvon aina sekunnin välein, tekee valitun toimintatilan mukaiset tarvittavat laskutoimitukset, ja näyttää tulokset. Asynkronisen laskurin ja mikrokontrollerin välissä on 32-bittinen puskuri, johon laskurin hetkellinen arvo tallennetaan, jonka mikro-ohjain käy tämän jälkeen lukemassa. Puskuri tarvitaan siitä syystä, että asynkronisen laskurin arvo saattaisi muuttua kesken lukuoperaation. Sekunnin välein syntyvä signaali aiheuttaa keskeytyksen mikro-ohjaimelle, mutta tätä signaalia on hieman viivästetty, jotta laskurin arvo ehtii varmasti tallentua puskuriin ensin.

PicoBlaze- mikro-ohjaimessa on yksi kahdeksanbittinen tuloportti, ja yksi samankokoinen lähtöportti. Suuremmalle määrälle tuloja- ja lähtöjä tarvitaan multiplexerit, jotka valitsevat halutut signaalit Mikro-ohjaimen antaman PortID- signaalin mukaisesti. Esimerkiksi laskurin 32-bittinen arvo on luettava kahdeksan bittiä kerrallaan, joten tarvitaan neljä lukuoperaatiota. PicoBlazen muut tulot ovat käyttöliittymän painokytkimien tilat. Lähtöjä ovat LCD- näytön ohjaus, LEDien (Light emitting diode)

ohjaus, sekä laskurin käynnistäminen ja pysäytys. Pulssilaskuri vilkuttaa LEDiä sekunnin välein laskennan ollessa käynnissä.

3.2.4 PicoBlaze- ohjelmistoprosessorin ohjelma

Pulssilaskuri näyttää LCD- näytöllä laskettujen pulssien kokonaismäärän, sekä ajan, jonka laskenta on ollut käynnissä. Tämän lisäksi laitteessa on kolme erilaista näyttötilaa, joissa se näyttää saapuneiden pulssien lukumäärän viimeisen sekunnin, 10, tai 30 sekunnin aikana. Näin voidaan paremmin tehdä havaintoja kipinöintiaktiivisuuden muutoksista. Laskenta voidaan käynnistää ja pysäyttää omista kytkimistään. Laskuri voidaan myös tarvittaessa nollata.

PicoBlazella pyörivän ohjelman toiminta perustuu pääosin sekunnin välein tapahtuvaan keskeytykseen. Pääohjelmassa tarkastetaan vain painokytkimien tilaa, ja kytkintä painettaessa tehdään tarvittavat toimenpiteet. Keskeytysrutiinissa haetaan ja näytetään laskurin uusin arvo, sekä lasketaan erotus näyttötilan mukaisen aikamäärän takaiseen arvoon. Lisäksi lisätään laskuria, joka laskee mittaukseen kulunutta aikaa. LCD- näytön päivitys tapahtuu myös keskeytysrutiinin aikana.

4. MITTAUKSET JA TULOKSET

Kun pulssilaskuri oli toteutettu Starter Kit Board- kehitysalustalle, sen toimivuutta testattiin ensin syöttämällä sitä signaaligeneraattorilla. Tässä vaiheessa ei tarvinnut vielä huolehtia analogisesta puolesta, eli antennisignaalin suodattamisesta ja muuttamisesta digitaaliseksi lähdeksi. Kun todettiin laskurin toimivan odotetulla tavalla, siirryttiin kokeilemaan mittauksia käytännössä toimivan sähkömoottorin laakerikipinöistä.

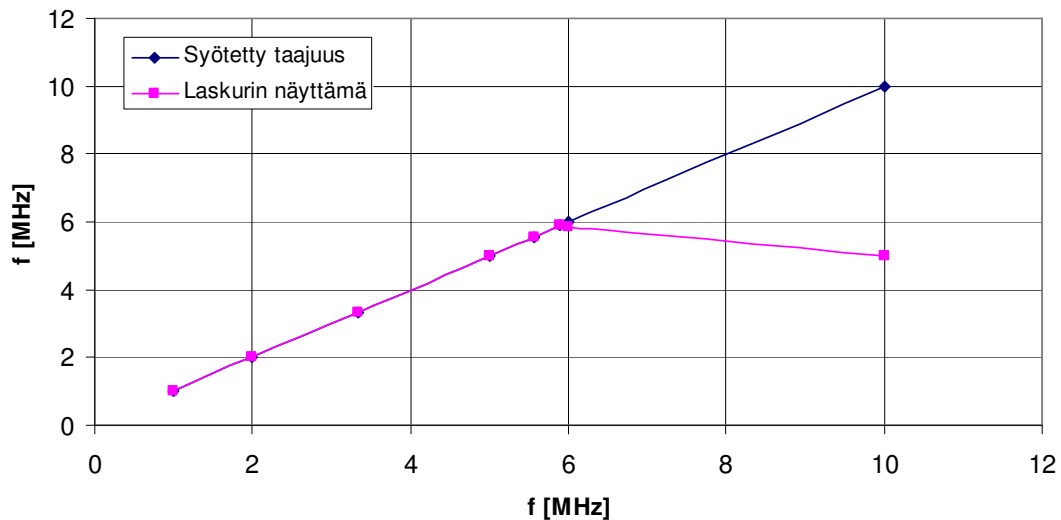
4.1 Testaus signaaligeneraattorilla

Pulssilaskurin toimintaa testattiin siis ensin kytkemällä se signaaligeneraattoriin. Testisignaalina käytettiin lyhyitä pulsseja eri taajuuksilla. Ensimmäisessä näyttötilassa pulssilaskuri näyttää saapuneiden pulssien määrän yhden sekunnin aikana, eli pulssien taajuuden Hertseinä. Vertaamalla tätä näyttämää taajuusgeneraattorin syöttämään taajuuteen, voidaan nähdä onko laskuri laskenut oikean määrän pulsseja. Tällä menetelmällä voitiin myös todeta pulssin jälkeisen viiveen toimivuus, eli jätetäänkö pulssin jälkeen heti perään liian nopeasti saapunut toinen pulssi laskematta. Tällä pyrittiin siis estämään värähtelyjen aiheuttamia virhelaskuja. Viiveen pituudeksi on asetettu 160 ns. Tämä on siis signaalin pienin mahdollinen jaksonaika, joten laskurin ei pitäisi voida näyttää taajuuksia, jotka ovat suurempia kuin 6,25 Mhz.

Testisignaalin pulssin ylhäällä olevan ajan pituudeksi asetettiin 10 ns, ja jännitteeksi 3.3 V. Taajuutta vaihdeltiin muuttamalla jaksonaikaa, pulssin leveyden pysyessä vakiona 10 ns. Mittauksesta kerättiin taulukossa 4.1 esitetyt mittaustulokset. Kuvassa 4.1 on esitetty kuvaajina syötetty- sekä laskurin näyttämä taajuus.

Taulukko 4.1. Signaaligeneraattoritestauksen mittaustuloksia signaalin eri taajuuksilla.

Taajuus [MHz]	Jaksonaika [ns]	Laskurin näyttämä [Hz]
1	1000	1000000
2	500	1999999
3,33	300	3333332
5	200	4999997
5,56	180	5555552
5,9	169,49	5899996
6	166,67	5832000
10	100	4999997



Kuva 4.1. Laskurin näyttämä taajuus syötetyn signaalin suhteen.

Mittaustuloksista nähdään, että pulsilaskurin näyttämä lukema vastaa syötetyn signaalin taajuutta. Kuvaajasta nähdään, että syötetyn signaalin ylittäessä 6 Mhz, laskurin näyttämä lähtee laskuun. Myös viive siis näyttäisi toimivan odotetusti. Laskuri ei laske pulssia, jos se saapuu alle 160 ns sisällä edellisestä pulssista.

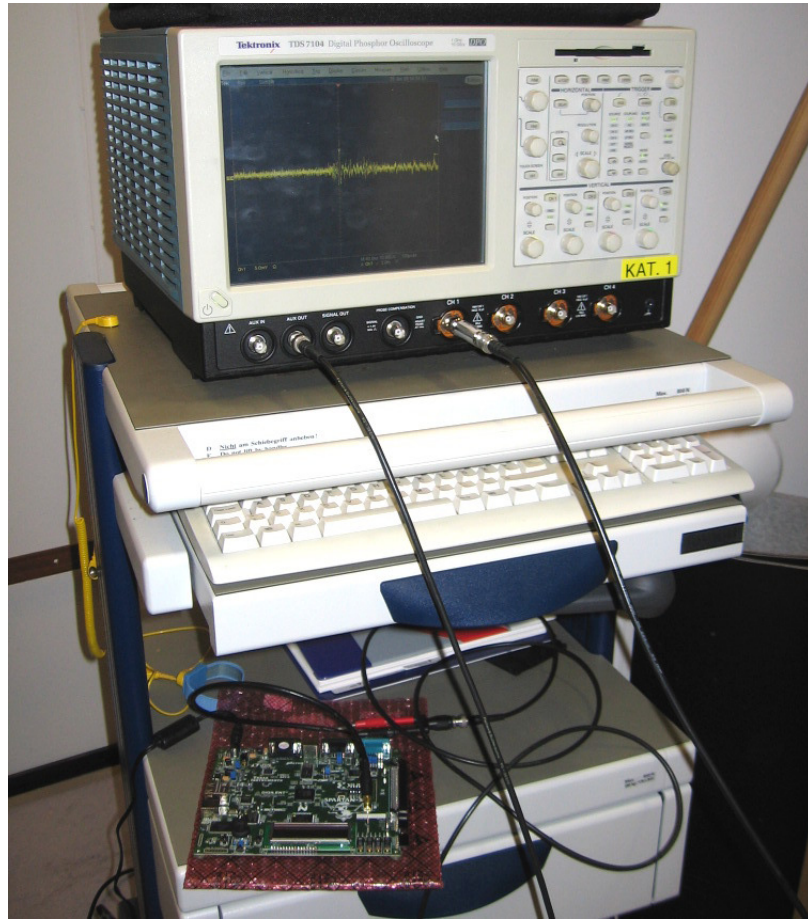
4.2 Testaus antennilla ja sähkömoottorilla

Pulsilaskurin toimintaa käytännössä testattiin mittausjärjestelyllä, jossa antennilla mitattiin taajuusmuuttajalla pyöritetyn sähkömoottorin laakerikipinointiä. Mittauksessa käytetty moottori ja antenni ovat esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Mittauksessa käytetty antenni sekä sähkömoottori.

Kuvassa taaempana näkyvä sähkömoottori on se, jota mittauksessa ajettiin. Toinen moottori toimii vain kuormana. Mittauksessa käytettiin Tektronix TDS7104- oskilloskooppia. Pulssilaskurille saatiin digitaalinen tulosignaali oskilloskoopin lähdöstä, jolloin ei tarvittu suodatuksen lisäksi muuta analogista signaalinkäsittelyä. Lähdössä näkyy pulssi aina, kun oskilloskoopissa tapahtuu liipaisu. Tämä kelpaa tulosignaaliksi pulssilaskurille. Liipaisutasoksi asetettiin 1,5 mV, minkä arvioitiin aikaisempien mitausten perusteella olevan sopiva erottamaan laakerikipinän aiheuttama piikki taustakohinasta. Kuvassa 4.3 on esitetty käytetty oskilloskooppi, ja sen kytkentä pulssilaskuriin, joka on kuvassa oskilloskoopin alapuolella.



Kuva 4.3. Mittauksessa käytetty oskilloskooppi ja pulssilaskuri.

Aluksi kokeiltiin ottaa antennilta tuleva signaali suoraan oskilloskooppiin, ilman suodatusta. Havaittiin, että oskilloskooppi poimi taajuusmuuttajan tehotransistorien kytkennöistä syntyvät piikit. Tämän jälkeen antennilta tulevan signaalin ja oskilloskoopin välissä käytettiin ylipäästösuodatinta. Suodatin oli malliltaan BHP-100+, ja sen kaistanleveydeksi on ilmoitettu 90-400 MHz. Nyt havaittiin, että taajuusmuuttajan aiheuttamat piikit olivat suodattuneet pois. Oskilloskoopin näytölle saatiin laakerikipinöiden aiheuttamia piikkejä. Tämä voitiin todeta vielä maadoittamalla sähkömoottorin akseli suoraan sen runkoon johdonpätkällä, jolloin pulsseja ei enää näkynyt. Oskilloskoopin lähtösignaali kytkettiin pulssilaskuriin, ja todettiin sen laskevan pulsseja odotetulla tavalla. Mittausjärjestely todettiin siis toimivaksi mittaamaan sähkömoottorin laakerikipinöinnin aktiivisuutta.

Seuraavaksi tehtiin mittaussarjoja, joissa mitattiin, kuinka monta kipinää ilmenee 300 sekunnin aikana taajuusmuuttajan erilaisilla syöttö- ja kytkentätaajuuksilla. Tulokset on ilmoitettu pulsseina yhden sekunnin aikana. Mittauksista saadut tulokset ovat esi-

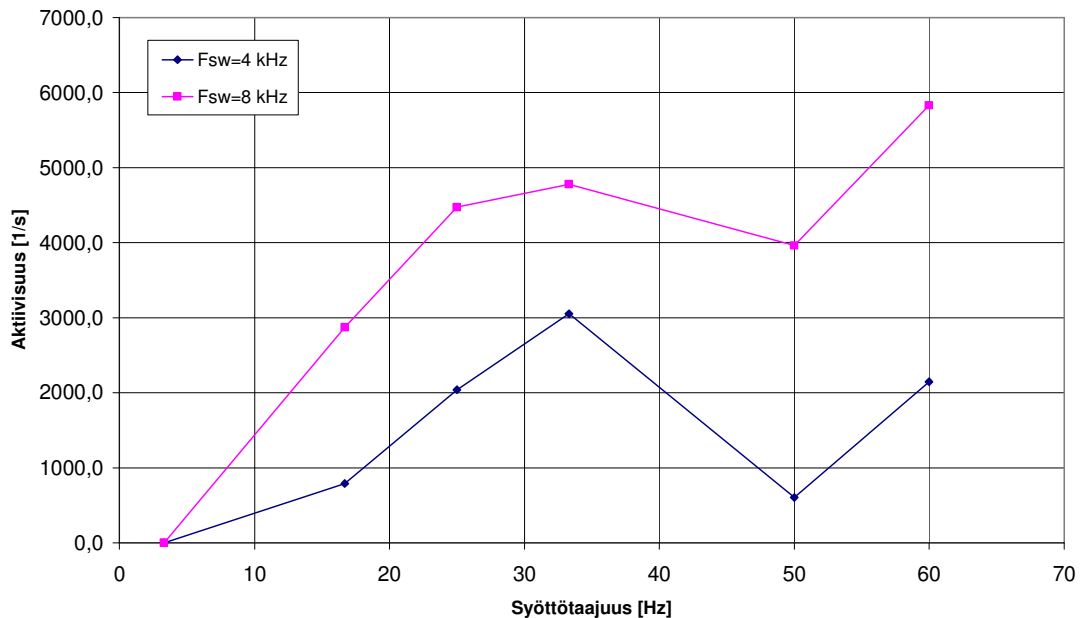
tetty taulukoissa 4.2 ja 4.3. Kuvassa 4.4 on esitetty käyrämuodot saaduista mittaustuloksista.

Taulukko 4.2. 4 kHz kytkentätaajuudella saadut mittaustulokset

KytKentätaajuus 4kHz	
f [Hz]	Pulssia/1s
3,3	0
16,7	790
25	2040
33,3	3050
50	605
60	2144

Taulukko 4.3. 8 kHz kytkentätaajuudella saadut mittaustulokset

KytKentätaajuus 8kHz	
f [Hz]	Pulssia/1s
3,3	2
16,7	2871
25	4473
33,3	4779
50	3961
60	5834



Kuva 4.4 Käyrämuodot kipinöintiaktiivisuudesta syöttötaajuuden funktiona eri mittauksilla.

Kuten kuvan 4.4 käyrästä nähdään, pienillä syöttötaajuuksilla laakerikipinöinti on hyvin vähäistä. Tämän voisi olettaa johtuvan siitä, että pienillä pyörimisnopeuksilla laakerin öljykalvo ei pääse kunnolla muodostumaan. Tällöin laakerin metalliset osat pää-

sevät kosketuksiin, ja akselijännitteet pääsevät purkautumaan suoraan runkoon ilman haitallista kipinöintiä.

Hieman moottorin nimellistä pyörimisnopeutta vastaavaa taajuutta alhaisemmilla taajuuksilla kipinöinnin aktiivisuus saa suurimmat arvonsa. Näillä taajuuksilla yhteis-
muotoisen jännitteen aiheuttamat kapasitiiviset purkausvirrat ovat suurimmillaan. Suuremmilla pyörimisnopeuksilla laakerin öljykalvon paksuus suurenee, jolloin myös purkausvirrat vähenevät (Binder 2008).

Korkeammalla 8 kHz kytkentätaajuudella laakerikipinöinnin määrä on suurempi, kuin matalammalla 4 kHz taajuudella. Tämä on odotettavissa, sillä korkeammalla taajuudella nopeita kytkentäilmiöitä tapahtuu enemmän. Kytkennät aiheuttavat moottorin terminaaleihin suuria jännitteen nousunopeuksia, jotka puolestaan aiheuttavat kiertäviä laakerivirtoja (Muetze 2006).

5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Tehtävänasettelu ja tavoitteet

Työn päätavoitteena oli kehittää FPGA-piiriin perustuva pulssilaskuri, jota voitaisiin hyödyntää tehtäessä tosiaikaisia havaintoja laakerikipinöinnin aktiivisuudesta radio-
taajuisiin signaaleihin perustuvassa mittausmenetelmällä.

5.2 Tärkeimmät toimenpiteet ja tulokset

Laitteen toiminta suunniteltiin tietokoneella laitteistokuvauskielellä. Prototyyppi toteutettiin käyttäen Spartan-3E FPGA Starter Kit-kehitysalustaa. Laitteen toimivuutta testattiin ensin signaaligeneraattorin avulla, ja tämän jälkeen tekemällä käytännön mittauksia taajuusmuuttajan ajaman pyörivän sähkökoneen kanssa. Mittauksissa todettiin pulssilaskurin toimivan suunnitelmien mukaisesti. Sitä voitiin hyödyntää mittauksessa, jossa tehtiin tosiaikaisia havaintoja erilaisten olosuhteiden muutosten vaikutuksesta hetkelliseen laakerikipinöinnin aktiivisuuteen.

5.3 Ehdotetut jatkotoimenpiteet

Pulssilaskuriin voisi kehittää itsenäisen analogisen signaalinkäsittelyosan, jolloin laite ei olisi riippuvainen digitaalisesta oskilloskoopista. Tällöin mittauksia voisi helpommin kokeilla myös kenttäolosuhteissa esimerkiksi teollisuuslaitoksissa.

6. LÄHDELUETTELO

- (ABB 2000) ABB. 2000. Tekninen opas nro 5 - Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä.
- (Binder 2008) Binder, A., Muetze, A., 2008. Scaling Effects of Inverter-Induced Bearing Currents in AC Machines. Lehtiartikkeli. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 44, No 3, pp 769- 776, May/June.
- (Judd, 2005) Judd M. D., Li Yang, and Hunter I. B. B., Partial Discharge Monitoring of Power Transformers Using UHF Sensors. Part 1: Sensors and Signal Interpretation. Lehtiartikkeli. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, No. 2, March/April 2005, pp. 5–14.
- (Judd, 2005B) Judd M. D., Li Yang, and Hunter I. B. B., Partial Discharge Monitoring of Power Transformers Using UHF Sensors. Part 2: Field Experience. Lehtiartikkeli. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, No. 3, May/June 2005, pp. 5– 13.
- (Muetze 2006) Muetze, A., Binder, A., 2006. Don' Lose Your Bearings – Mitigation Techniques for Bearing Currents in Inverter-supplied Drive Systems. Lehtiartikkeli. IEEE Magazine on Industry Applications.
- (SKF 2008) Humbert, S., 2008. Detection of electrical discharges in bearings. SKF White Paper.
- (Särkimäki 2009) Särkimäki, V., 2009. Radio Frequency Method for Detecting Bearing Currents in Induction Motors. Väitöskirja. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto.

- (Xilinx 2006) Chapman, K., Xilinx Ltd 2006. Frequency Counter for Spartan-3E Starter Kit. Saatavilla: http://www.xilinx.com/products/boards/s3estarter/files/s3esk_frequency_counter.pdf. Viitattu 21.1.09
- (Xilinx 2008) Xilinx. 2008. Spartan-3E FPGA Family: Complete Data Sheet. Datalehti. Saatavilla: http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds312.pdf. Viitattu 21.1.09
- (Xilinx 2008b) Xilinx. 2008. Spartan-3E FPGA Starter Kit Board User Guide. Käyttöohje.