



**TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

SCHOOL OF ENGINEERING

Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

**DEVELOPING MODULAR ETHERCAT EMBEDDED  
SYSTEMS FOR MULTI-LOCUS TRANSCRANIAL  
MAGNETIC STIMULATION (MTMS)**

**MODULAARSED ETHERCATI MANUSSÜSTEEMID MITME  
LOOKUSEGA TRANSKRANIAALSE  
MAGNETSTIMULATSIOONIKS (MTMS)**

MASTER'S THESIS

Student: Behzad Mahboubi

Student code: 215003MAHM

Supervisor: Noman Shabbir, PhD  
Kamran Daniel, Early stage researcher

Co-supervisor: Ivan Vujaklija, PhD Assistant Professor,  
Aalto University

Tallinn, 2024  
Espoo, 2024

## Kokkuvõte

TMS-seadmed on muutumas keerukamaks ja keerukamaks, et vastata nõudlikele kliinilistele vajadustele. Alates esimese TMS-seadme tulekust on selle kliinilised rakendused neuroloogiliste ravide ja uuringute jaoks plahvatuslikult kasvanud. TMS-i põhiteooria, mis genereerib magnetvälja loomiseks ja elektrivälja indutseerimiseks ajupiirkonnas suure võimsusega impulsside puhangu, jääb peaaegu puutumatuks. TMS-seadme lihtne koondmudel on seeria RLC, milles R vastab mähiste ja kaablite takistuse väärtusele, L vastab magnetpooli(te) induktiivsusele ja C vastab laadimis- ja impulsspinge kondensaatorile. Toitelülituse efektiivsuse optimeerimiseks töötatakse välja erinevaid meetodeid; IGBT kasutamine koos PWM-iga on üks uusimaid lähenemisviise. Viimased TMS-seadmed ja nende vastavad uuringud jõuavad enamasti vajaduseni "rohkema mähise" järele, mis tähendab "keerulisemat disaini". Ligi nelja aastakümne pikkuse TMS-i ajaloo jooksul on meil selge ja põhimõtteline arusaam aju stimulatsioonist ja selle suhtelistest parameetritest.

Need edusammud lahendavad järgmise kitsaskoha mitme kanaliga TMS-süsteemides: modulaarne disain. Reaalajas süsteem saab käsitleda konkreetseid ajastusi, et luua impulsside katkestusi kavandatud viivituste ja tähtaegade korral. Lisaks tuleks projekteerimisel arvesse võtta kõigi kliiniliste seadmete ohutuselemente, millel on tõrkekindla ja töökindluse analüüsi metoodika. Iga mähis nõuab oma kanalit ja jõuelektroonikat; seetõttu tähendab rohkem mähiseid keerukamaid süsteeme ja nõudlikumat süsteemi töökindluse analüüsi. Selle probleemi lahenduseks on reaalajas modulaarne disainilahendus. Iga mähise kõik olulised osad, välja arvatud vastastikused osad, nagu kõrgepingeallikas, saab konstrueerida ühes kompaktses moodulis. Sellest modulaarsest disainist on kasu ka selle alamsüsteemidele. Määratakse kindlaks kriitilised alamsüsteemid, mis kõik on seatud funktsionaalsust ja ohutust arvestades spetsiifiliste nõuetega. Alamsüsteemide siseside peaks olema ka reaalajas sideprotokolli standardvorm. EtherCAT on arenenud protokoll, mis käsitleb keerukate süsteemide modulaarsust ja reaalajas teostatavust. Tänu EtherCAT Technology Groupi jõulisele toetusele leidlikule projekteerimisdokumentatsioonile ja pidevalt kasvavale EtherCATi ökosüsteemile tundub EtherCAT-toega võrgu arendamine praktiline ja mTMS-seadme jaoks rakendatav.

Lõputöös tutvustasime EtherCAT-i kui tõestatud lahendust sideprotokollide asendamiseks praeguse põlvkonna mTMS-seadmetes. Välja töötatud neljast erinevast alamseadmest koosnev reaalajas EtherCAT-võrk ja sisseehitatud EtherCAT-i ülemseade tutvustavad teostatavat raamistikku rohkemate mähiste probleemideta rakendamiseks mTMS-i disainides. Modulaarse disaini põhiidee on orjade arengu tuum. Universaalne alamarenduskontseptsioon arvestab, kus iga alam saab SDO kaudu konfigurereida, et

kohaneda nõutavate funktsioonidega. I/O, ADC, PWM, UART, SPI ja muutuva ruumi põhiplokid on välja töötatud selleks, et võimaldada põhifunktsiooni orja- ja EtherCAT-võrgus. Sisseehitatud EtherCAT master on loodud demonstreerima, kui praktiline on B-klassi masteri juurutamine barebone STM32F767ZI mikrokontrollerile. Kavandatav EtherCAT master töötab reaajas MBed OS6 platvormil. Kaks lõime on määratletud, et võimaldada EtherCAT-kaadri käsitlemist SOEM-koodi teisendusega, et kohaneda manustatud süsteemidega. Tehakse paar mõõtmist, et teha kindlaks mikrokontrolleri kasutus, mis käitab põhiseadmes EtherCATi töötlemislõime. Latentsusmõõtmised tehakse selleks, et tuvastada viivitus alamseadmete vahel sünkroniseerimisega ja ilma. Mõõdetud tulemused näitavad olulist latentsusalane vähenemist EtherCAT-kaadrit alalisvoolu kasutades töötavates orjades 78  $\mu$ s-lt 3  $\mu$ s-le. Lisaks uuritakse ja mõõdetakse EtherCAT-i tsüklit ja töötlemisaega, et tuvastada mikroprotsessori kasutustasemeid. Tänu mõõtmistulemustele ja arendusmeetodile saab manustatud EtherCAT muuta praeguse mTMS-i disaini EtherCAT-toega süsteemiks minimaalsete arendus- ja tootmiskuludega, suurendades tulevaste mTMS-seadmete modulaarsust ja mastaapsust.

## **Tulevane töö**

EtherCATi ohutus on järgmise põlvkonna EtherCATi meditsiinisüsteemide intrigeeriv, kuid võib-olla ülioluline omadus. Orjad on välja töötatud erinevate tarnijate ESC-de ja nende vastavate arenduskomplektide põhjal. See aitab näidata võimalust kasutada ühes võrgus erinevaid orjade arhitektuuri. Järgmiseks orjariistvara kavandamise etapiks tuleb ESC lõplik kandidaat siiski targalt valida, et võtta arvesse vajadusi ja arvestada arendaja toe taset, saadaolevaid IDE-sid, kiibi saadavust ja funktsioone. Praegust alamraamistikku saab laiendada CAN-liidese ja erinevate protokollide laiemale toele. Funktsioon File over EtherCAT on kasulik ka mis tahes alamseadmete püsivara lihtsa ja pideva värskendamise hõlbustamiseks, ilma et see kahjustaks võrgu teiste alamseadmete olekut.

Sisseehitatud ülemseadmes võib välise Etherneti kontrolleri lisamine vähendada EtherCAT-i protsessitsükli aega ülemseadmes, kuna eraldatakse suurem osa Etherneti pakettide käsitlemisest. Samuti võimaldab see ühe sammu võrra edasi rakendada põhiplaadis kahte Etherneti füüsilist kihti.

Põhitarkvaraarenduses saab reaajas OS-i valida ressursside tõhusamaks haldamiseks ja kasutamiseks. Manussüsteemide piiratud ressursside tõttu on protsessori kasutamine ja mälu juhtimine olulised. Ressursinäljaste ülesannetega tegelemine või EtherCATi lõimedega erinevate lõimede käitamine võib turvalise reaajas manustatud süsteemi jaoks olla keeruline. Seega on kasulik välja töötada võrdlusuuringute raamistik

tööülesannete jõuliseks jaotamiseks orjade ja ülemate vahel. Mõningaid ülesandeid, mis nõuavad rohkem mälu või madalama prioriteediga ressursse, saab kõik-ühes ülemseadme käitamise asemel üle kanda alamseadmetesse. Hübridjaotust tuleb uurida.

EtherCATi töökindluse hindamiseks erinevates stsenaariumides tuleb läbi viia rohkem mõõtmisprofiile ja tõrkekindlaid teste. Alalisvoolu tagasiside regulaatori optimeerimist tuleb põhjalikult uurida, et rahuldada kriitilisi raskeid reaajas süsteeme.