

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
БАЊА ЛУКА
Број: 215
Датум: 06.03.2017.

ИЗВЈЕШТАЈ
о оцјени урађене докторске дисертације

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

На основу одлуке бр. 20/3.31-54/17 коју је донијело Наставно-научно вијеће Електротехничког факултета у Бањој Луци дана 31.01.2017. године, именована је Комисија за оцјену урађене докторске дисертације у сљедећем саставу:

1. **Др Предраг Петковић, редовни професор**, ужа научна област Електроника, Универзитет у Нишу, Електронски факултет, **предсједник**
2. **Др Бранко Докић, редовни професор**, ужа научна област Електроника и електронски системи, Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет, **ментор и члан**
3. **Др Бранко Блануша, ванредни професор**, ужа научна област Електроника и електронски системи, Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет, **члан**
4. **Др Гордана Гардашевић, ванредни професор**, ужа научна област Телекомуникације, Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет, **члан**
5. **Др Игор Крчмар, доцент**, ужа научна област Аутоматика и роботика, Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет, **члан**

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

МЛАДЕН (Бранко) КНЕЖИЋ

Рођен 24.07.1981. године у Јајцу, Босна и Херцеговина.

Послиједипломске студије је завршио на Електротехничком факултету, Универзитета у Бањој Луци.

Магистарску тезу под називом *Прилог анализи перформанси EtherCAT система на бази времена комуникационог циклуса* из уже научне области Електроника и електронски системи, одбранио је 16.12.2010. године на Електротехничком факултету, Универзитета у Бањој Луци и тиме стекао звање магистра електротехничких наука.

III УВОДНИ ДИО ОЦЈЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов докторске дисертације мр Младена Кнежића је

ОПТИМИЗАЦИЈА ВРЕМЕНА ОДЗИВА ИНДУСТРИЈСКИХ КОМУНИКАЦИОНИХ МРЕЖА

Израду дисертације је одобрио Сенат Универзитета у Бањој Луци Одлуком бр. 02/04-3.75-56/13 од 31.01.2013. године.¹⁾

Садржај докторске дисертације изложен је у следећим поглављима:

1. Увод (стр. 1-6),
2. Индустриски комуникациони системи (стр. 7-43),
3. Метрике у индустриским комуникационим системима (стр. 44-60),
4. Моделовање индустриских комуникационих система (стр. 61-118),
5. Механизми оптимизације времена одзива (стр. 119-157) и
6. Закључак (стр. 158-161).

Свако поглавље садржи више одјељака који су нумерисани у складу са уваженим стандардима писања научних радова. Осим општег закључка на крају рада (поглавље 6), свако поглавље се завршава одговарајућим закључком са јасно издвојеним резултатима истраживања тог поглавља. На крају рада, дат је списак коришћене литературе са 100 референци. Дисертација је написана на 161 страници текста (укупно 172 стране са литературом) и садржи 6 поглавља, 93 слике и 18 табела.

¹⁾ Сенат је одобрио тезу под радним називом *Оптимизација времена одзива код индустриских комуникационих мрежа*. Након прегледа радне верзије дисертације, неки чланови Комисије су указали да је ријеч "код" сувишина, што је кандидат прихватио.

IV УВОД И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

IV.1. Предмет, циљ и хипотезе истраживања

Предмет истраживања ове дисертације подразумијева теоријску и експерименталну анализу индустриских комуникационих система из категорије која омогућава највише перформансе и висок ниво синхронизације свих компонената система. Основну метрику за квантитативну процјену перформанси представља вријеме одзива система. Ова метрика се обично користи у комбинацији са осталим релевантним метрикама, које на објективан начин описују могућности индустриских комуникационих система. Спроведена анализа и експериментална евалуација омогућавају увођење одговарајућих механизама чији је основни циљ оптимизација времена одзива. Ови механизми подразумијевају промјену тополошке структуре мреже, оптимизацију временски критичне комуникације протокола и прецизно планирање слања порука како би се избегла временена чекања услед заузета ресурса у мрежним компонентама.

Основни циљ докторске дисертације је да се, на основу резултата добијених симулацијом помоћу развијених аналитичких модела разматраних индустриских комуникационих система, добије одговор на питање да ли је одговарајућим планирањем топологије мреже и/или распореда слања порука могуће оптимизовати постојеће комуникационе механизме тако да се минимизује вријеме одзива индустриског комуникационог система, што је била и основна претпоставка (радна хипотеза) докторске дисертације.

IV.2. Преглед претходних истраживања

Модерни системи индустријске аутоматизације су све више оријентисани ка конвергенцији различитих технологија у циљу остварења концепта који је познат под називом *интелигентна фабрика* (енгл. *Smart Factory*) у оквиру *Индустрија 4.0* (енгл. *Industrie 4.0*) иницијативе [1] која подразумијева повезивање свих нивоа производње у јединствену виртуелну мрежу у склопу IoT (енгл. *Internet of Things*) парадигме [2, 3]. Најновије прогнозе показују да ће чак и ригидни системи аутоматизације у скоријој будућности бити базирани на сервисно оријентисаној парадигми која подразумијева концепт производње као услуге. То значи да ће будући производни системи морати да буду реконфигурабилни и адаптивни у смислу промјене процеса производње како би се на брз и ефикасан начин прилагодили захтјевима клијената [4]. У ту сврху, значајан напор се улаже у омогућавање концепта аутоматске конфигурације система приликом додавања нових уређаја по тзв. *Plug and Produce* принципу који је инспирисан сличним концептом (енгл. *Plug and Play*) који се већ дugo времена користи у рачунарским системима [5, 6, 7].

Индустријски комуникациони системи засновани на *Ethernet* технологији који подржавају рад у реалном времену, RTE (енгл. *Real-Time Ethernet*) системи, чине основну картику у ланцу који омогућава реализацију претходно описаних концепата. Основна предност коју ови системи имају у односу на традиционалне индустријске комуникационе системе познате под називом *fieldbus* су знатно шири пропусни опсег, који се све више захтијева у надолазећим апликацијама, као и инхерентна подршка за вертикалну интеграцију мрежа, које се користе у аутоматизацији на нивоу процеса производње (енгл. *field level*) са класичним рачунарским мрежама на нивоу предузећа (енгл. *enterprise level*), као што је описано у [8]. Посљедња карактеристика омогућава повезивање сектора производње са сектором управе предузећа, чиме се повећава ефикасност пословања и максимизује искоришћење постојећих ресурса [9]. Осим тога, ове мреже типично подразумијевају смањење трошкова који се односе на каблирање, дијагностиковање грешака и одржавање система.

Основни недостатак стандардне *Ethernet* технологије огледа се у томе што алгоритам за арбитрирање приступа заједничком медијуму није детерминистички, па стога није погодан за системе који захтијевају рад у реалном времену [10]. Тренутно постоји велики број различитих RTE приступа који омогућавају прилагођавање *Ethernet* технологије, тако да се омогући комуникација у реалном времену, од којих је већина дио међународних стандарда као што је описано у [8, 11, 12]. Сваки од приступа нуди одређени ниво компатibilности са стандардним *Ethernet* протоколом. Генерално, рјешења која користе стандардне *Ethernet* компоненте имају лошије перформансе у односу на рјешења која подразумијевају одређене модификације. Одабир исправне технологије генерално зависи од примјене. Ниједан од тренутно доступних RTE приступа не може да покрије све могуће сценарије уз истовремено задовољење темпоралних ограничења које намеће апликација [13]. Стога се очекује да будући комуникациони системи у дистрибуираним системима аутоматизације буду изразито хетерогени како би могли да се носе са све већом комплексношћу ових система [14].

У [15, 16], RTE протоколи су класификовани у три различите категорије, у зависности од нивоа перформанси које протокол може да обезбиједи. Протоколи из категорије 3, као што су нпр. *Profinet IRT*, *Ethernet Powerlink* и *EtherCAT*, обезбеђују највиши ниво перформанси које захтијевају одређене апликације (нпр. апликације за

контролу кретања или *motion control*). Међутим, да би постигли захтијевани ниво перформанси, наведена рјешења уводе модификације на слоју података *Ethernet* протокола, који омогућавају механизме за побољшање детерминизма у комуникационом систему. То неминовно доводи до смањења компатибилности са стандардним компонентама, што у одређеној мјери може да утиче на цијену, али и на могућност интеграције комуникационог рјешења са класичним рачунарским мрежама.

У посљедњих неколико година, објављен је низ студија у којима су анализиране могућности различитих индустриских комуникационих система и предложене модификације у циљу побољшања њиховог рада, у контексту примјене у дистрибуираним системима аутоматизације. У већини радова, анализа је базирана на аналитичким моделима који су изведени за различите сценарије преузете из стварних система. Тако су, на пример, у [17, 18, 19] аутори теоријски анализирали побољшање перформанси различитих RTE система при повећању битске брзине са 100 Mb/s на 1 Gb/s. Други аутори су увели додатна ограничења приликом теоријске анализе како би боље анализирали ефекте стварних апликација [20, 21, 22]. У [23, 24, 25, 26], описаны су приступи за примјену различитих техника симулације и формалне верификације индустриских комуникационих система. Такође, да би се карактеризовали временски параметри развијених аналитичких и симулационих модела, спроведен је низ студија које су за крајњи циљ имале експерименталну анализу мрежних компонената индустриских комуникационих система [27, 28, 29, 30, 31].

Осим теоријске анализе, у литератури су предложени различити приступи за побољшање постојећих комуникационих механизама наведених RTE система. Тако је, на пример, у [28] и [32] анализирана интерна архитектура *Profinet IO* контролера у циљу побољшања временских карактеристика система. У раду [33], предложен је DFP (енгл. *Dynamic Frame Packing*) механизам за побољшање перформанси код *Profinet IO* протокола. Други приступи (нпр. [34, 35, 36, 37]) дефинишу различите стратегије распоређивања слања порука како би се оптимизовале перформансе мреже у случају када се користе топологије којима се обично реализују стварни системима аутоматизације. Такође, у неким студијама анализиран је сличан проблем, али код примјене претходно поменутог DFP механизма [38, 39]. С обзиром да код *Profinet IO* система план слања порука треба поново да се генерише сваки пут када се промијени структура мреже, аутори су у [40] предложили модификацију DFP механизма, који су назвали APM (енгл. *Automatic Packing Mechanism*). APM механизам не захтијева временско распоређивање порука, чиме се унапређује флексибилност система уз истовремено побољшање перформанси. Међутим, наведени приступи су реализовани и тестирали само на нивоу прототипа и још увијек нису доступни у комерцијалној изведби, тако да није могуће предвидјети понашање предложених рјешења у стварним инсталацијама.

У случају *EtherCAT* приступа, један дио истраживања је усмјерен на оптимизацију дужине оквира с обзиром на топологију мреже, која се обавља приликом конфигурације мреже. Према томе, структура мреже као и сва физичка и просторна ограничења морају да буду унапријед позната да би се постигла оптимална конфигурација чворова. Друга истраживања, на пример [41, 42], оријентисана су ка различitim стратегијама базираним на хардверски подржаним архитектурама надређеног уређаја како би се обезбиједило веома кратко вријеме комуникационог циклуса, испод 100 μs. С обзиром да на ефикасност *EtherCAT* комуникације значајно утиче одабрана мрежна топологија, аутори [43] предложили су рјешење базирано на адаптацији топологије с циљем смањења укупног пропагационог кашњења мреже.

Такође, студије [44, 45, 46] обезбеђују различите механизме за побољшање ефикасности размјене асинхроних порука како би се омогућила подршка за комуникацију у реалном времену, у случају апликација које обрађују непериодичне и спорадичне догађаје, као што су временски критични аларми.

Што се *Ethernet Powerlink* протокола тиче, аутори различитих студија бавили су се анализом перформанси овог приступа у индустријским окружењима. Тако, на примјер, у [47] аутори су спровели теоретску анализу и студију базирале на симулацијама за различите мрежне конфигурације како би истражили могућности и ограничења *Ethernet Powerlink* протокола приликом размјене цикличних и ациклиничких података. Такође, у истом раду, аутори су предложили модификацију протокола како би побољшали његово понашање приликом опслуживања ациклиничких података у реалном времену (нпр. алармних порука). У раду [48] је дата опширенја анализа различитих метрика, које су дефинисане у оквиру IEC 61784-2 стандарда, за сценарије који подразумијева координисану контролу покрета. Оба претходно наведена рада анализирају понашање система у идејним радним условима, као и у присуству грешака насталих при преносу порука. Могућности проширења *Ethernet Powerlink* протокола на примјену у бежичним мрежама, базираним на IEEE 802.11 стандарду, анализиране су у радовима [49] и [50]. Анализа понашања у бежичним примјенама проширења је експерименталним резултатима у радовима [50] и [51], при чему су мјерења обављена на прототипу стварне бежичне мреже која је реализована коришћењем комерцијално доступних компонената.

Коначно, један дио претходних истраживања (нпр. [52, 53, 54]) оријентисан је ка истраживању могућности побољшања енергетске ефикасности мрежних компонената, када се оне налазе у неактивном стању у складу са IEEE 802.3az стандардом [55].

Анализа перформанси било којег RTE система подразумијева дефинисање различитих метрика које омогућавају квантитативан опис могућности различитих решења. Неке од ових метрика су прописане одговарајућим стандардима [56], док су друге специфично дефинисане како би описале циклично понашање система [57, 58].

Најчешћа коришћена метрика за опис цикличног понашања RTE система је минимално вријеме комуникационог циклуса. Међутим, ова метрика не узима у обзир друге аспекте који се обично захтијевају у дистрибуираним системима аутоматизације, попут синхронизације, пропусног опсега резервисаног за NRT саобраћај, или времена потребног за обраду података у контролеру и/или дистрибуираним уређајима. Из наведеног разлога, дефинишу се метрике које боље описују карактеристике система, или се поменута метрика користи у комбинацији са другим метрикама.

Вријеме одзива представља објективну мјеру могућности система по питању брзине реаговања на промјене. Ова метрика обједињује више аспеката који су потенцијално занемарени код минималног времена комуникационог циклуса. Евалуација индустријских комуникационих система у значајном броју студија користи вријеме одзива као метрику за квантитативну процјену могућности система. У [27, 23, 59] је анализирано вријеме одзива за *Profinet IO* систем са несинхронизованом класом саобраћаја, док су у [60, 61, 62] презентовани теоријски и експериментални резултати за примјер генеричког RTE система. У студији [63] разматран је утицај синхронизације уређаја на перформансе система, у смислу минималног одступања времена одзива.

Литература цитирана у IV.2

- [1] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, "Design principles for industrie 4.0 Scenarios," in *Proc. 49th Hawaii Int. Conf. System Sciences (HICSS)*, Jan. 2016, pp. 3928–3937.
- [2] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The internet of things: A survey," *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, oct 2010.
- [3] Y.-C. Li, S. H. Hong, X. Huang, G. Chen, and X. Liang, "Implementation of a powerlink-wirelesshart gateway for industrial automation," in *Proc. Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) 2016 13th Int. Conf. Electrical Engineering/Electronics, Computer*, Jun. 2016, pp. 1–6.
- [4] L. Wisniewski, S. Chahar, and J. Jasperneite, "Seamless reconfiguration of time triggered ethernet based protocols," in *Proc. IEEE World Conf. Factory Communication Systems (WFCS)*, May 2015, pp. 1–4.
- [5] G. Reinhart, S. Krug, S. Hüttner, Z. Mari, F. Riedelbauch, and M. Schlägel, "Automatic configuration (plug & produce) of industrial ethernet networks," in *Proc. 9th IEEE/IAS Int. Conf. Industry Applications - INDUSCON 2010*, Nov. 2010, pp. 1–6.
- [6] L. Duerkop, H. Trsek, J. Jasperneite, and L. Wisniewski, "Towards autoconfiguration of industrial automation systems: A case study using profinet IO," in *Proc. IEEE 17th Int. Conf. Emerging Technologies Factory Automation (ETFA 2012)*, Sep. 2012, pp. 1–8.
- [7] L. Dürkop, J. Jasperneite, and A. Fay, "An analysis of real-time ethernets with regard to their automatic configuration," in *Proc. IEEE World Conf. Factory Communication Systems (WFCS)*, May 2015, pp. 1–8.
- [8] T. Sauter, "The three generations of field-level networks — evolution and compatibility issues," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 11, pp. 3585–3595, Nov. 2010.
- [9] T. Sauter, "The continuing evolution of integration in manufacturing automation," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 10–19, 2007.
- [10] J. D. Decotignie, "Ethernet-based real-time and industrial communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 6, pp. 1102–1117, Jun. 2005.
- [11] M. Felser, "Real-time ethernet - industry prospective," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 6, pp. 1118–1129, Jun. 2005.
- [12] M. Felser and T. Sauter, "Standardization of industrial ethernet - the next battlefield?" in *Proc. IEEE Int. Workshop Factory Communication Systems*, Sep. 2004, pp. 413–420.
- [13] L. Zhang, H. Gao, and O. Kaynak, "Network-induced constraints in networked control systems – a survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 403–416, feb 2013.
- [14] P. Gaj, J. Jasperneite, and M. Felser, "Computer communication within industrial distributed environment —a survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 182–189, Feb. 2013.
- [15] J. Jasperneite, J. Imtiaz, M. Schumacher, and K. Weber, "A proposal for a generic real-time ethernet system," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 5, no. 2, pp. 75–85, May 2009.
- [16] P. Neumann, "Communication in industrial automationwhat is going on?" *Control Engineering Practice*, vol. 15, no. 11, pp. 1332–1347, nov 2007.
- [17] J. Jasperneite, M. Schumacher, and K. Weber, "Limits of increasing the performance

- of industrial ethernet protocols,” in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA 2007)*, Sep. 2007, pp. 17–24.
- [18] G. Prytz, “A performance analysis of ethercat and profinet irt,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation*, Sep. 2008, pp. 408–415.
- [19] J. Robert, J.-P. Georges, E. Rondeau, and T. Divoux, “Minimum cycle time analysis of ethernet-based real-time protocols,” *International Journal of Computers Communications & Control*, vol. 7, no. 4, p. 744, sep 2014.
- [20] M. Sung, I. Kim, and T. Kim, “Toward a holistic delay analysis of EtherCAT synchronized control processes,” *International Journal of Computers Communications & Control*, vol. 8, no. 4, p. 608, aug 2013.
- [21] R. Schlesinger, A. Springer, and T. Sauter, “New approach for improvements and comparison of high performance real-time ethernet networks,” in *Proc. IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2014, pp. 1–4.
- [22] A. Soury, M. Charfi, D. Genon-Catalot, and J. M. Thiriet, “Performance analysis of ethernet powerlink protocol: Application to a new lift system generation,” in *Proc. IEEE 20th Conf. Emerging Technologies Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2015, pp. 1–6.
- [23] P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli, A. Taroni, and F. Venturini, “New simulation models to evaluate performance of profinet IO class 1 Systems,” in *Proc. 5th IEEE Int. Conf. Industrial Informatics*, vol. 1, Jun. 2007, pp. 237–242.
- [24] L. Seno and S. Vitturi, “A simulation study of ethernet powerlink networks,” in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA 2007)*, Sep. 2007, pp. 740–743.
- [25] S. Limal, S. Potier, B. Denis, and J. J. Lesage, “Formal verification of redundant media extension of ethernet powerlink,” in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA 2007)*, Sep. 2007, pp. 1045–1052.
- [26] L. Seno and C. Zunino, “A simulation approach to a real-time ethernet protocol: Ethercat,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation*, Sep. 2008, pp. 440–443.
- [27] P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli, A. Taroni, and F. Venturini, “Experimental analysis to estimate jitter in profinet IO class 1 networks,” in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies and Factory Automation*, Sep. 2006, pp. 429–432.
- [28] P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli, A. Taroni, and F. Venturini, “Evaluation of timing characteristics of a prototype system based on profinet IO RT_class 3,” in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA 2007)*, Sep. 2007, pp. 1254–1261.
- [29] P. Ferrari, A. Flammini, F. Venturini, and A. Augelli, “Large profinet IO RT networks for factory automation: A case study,” in *Proc. ETFA2011*, Sep. 2011, pp. 1–4.
- [30] M. Cereia, I. C. Bertolotti, and S. Scanzio, “Performance of a real-time ethercat master under linux,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 679–687, Nov. 2011.
- [31] K. Erwinski, M. Paprocki, L. M. Grzesiak, K. Karwowski, and A. Wawrzak, “Application of ethernet powerlink for communication in a linux rtai open cnc system,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 2, pp. 628–636, Feb. 2013.
- [32] C. Felser, M. Felser, and H. Kaghazchi, “Improved architecture for profinet irt devices,” in *Proc. IEEE 17th Int. Conf. Emerging Technologies Factory Automation*

- (ETFA 2012), Sep. 2012, pp. 1–8.
- [33] D. Gunzinger, C. Kuenzle, A. Schwarz, H. D. Doran, and K. Weber, “Optimising profinet irt for fast cycle times: A proof of concept,” in *Proc. IEEE Int Workshop Factory Communication Systems*, May 2010, pp. 35–42.
- [34] O. Graeser and O. Niggemann, “Planning of time triggered communication schedules,” in *Software-intensive verteilte Echtzeitsysteme*. Springer Nature, 2009, pp. 21–30.
- [35] Z. Hanzalek, P. Burget, and P. Sucha, “Profinet IO irt message scheduling with temporal constraints,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 6, no. 3, pp. 369–380, Aug. 2010.
- [36] L. Wisniewski, M. Schumacher, J. Jasperneite, and C. Diedrich, “Increasing flexibility of time triggered ethernet based systems by optimal greedy scheduling approach,” in *Proc. IEEE 20th Conf. Emerging Technologies Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2015, pp. 1–6.
- [37] L. Wisniewski, V. Wendt, J. Jasperneite, and C. Diedrich, “Scheduling of profinet irt communication in redundant network topologies,” in *Proc. IEEE World Conf. Factory Communication Systems (WFCS)*, May 2016, pp. 1–4.
- [38] L. Wisniewski, M. Schumacher, J. Jasperneite, and S. Schriegel, “Fast and simple scheduling algorithm for profinet irt networks,” in *Proc. 9th IEEE Int. Workshop Factory Communication Systems*, May 2012, pp. 141–144.
- [39] L. Wisniewski, J. Jasperneite, and C. Diedrich, “Effective and fast approach to schedule communication in profinet irt networks,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics*, May 2013, pp. 1–6.
- [40] R. Schlesinger, A. Springer, and T. Sauter, “Automatic packing mechanism for simplification of the scheduling in profinet irt,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 5, pp. 1822–1831, Oct. 2016.
- [41] T. Maruyama and T. Yamada, “Hardware acceleration architecture for ethercat master controller,” in *Proc. 9th IEEE Int Factory Communication Systems (WFCS) Workshop*, May 2012, pp. 223–232.
- [42] D. Orfanus, R. Indergaard, G. Prytz, and T. Wien, “Ethercat-based platform for distributed control in high-performance industrial applications,” in *Proc. IEEE 18th Conf. Emerging Technologies Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2013, pp. 1–8.
- [43] G. Cena, S. Scanzio, A. Valenzano, and C. Zunino, “A distribute-merge switch for ethercat networks,” in *Proc. 8th IEEE Int Factory Communication Systems (WFCS) Workshop*, May 2010, pp. 121–130.
- [44] G. Cena, A. Valenzano, and C. Zunino, “An arbitration-based access scheme for ethercat networks,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation*, Sep. 2008, pp. 416–423.
- [45] G. Cena, I. C. Bertolotti, A. Valenzano, and C. Zunino, “A high-performance can-like arbitration scheme for ethercat,” in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies Factory Automation*, Sep. 2009, pp. 1–8.
- [46] L. L. Bello, E. Bini, and G. Patti, “Priority-driven swapping-based scheduling of aperiodic real-time messages over ethercat networks,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 3, pp. 741–751, Jun. 2015.
- [47] G. Cena, L. Seno, A. Valenzano, and S. Vitturi, “Performance analysis of ethernet powerlink networks for distributed control and automation systems,” *Computer Standards & Interfaces*, vol. 31, no. 3, pp. 566–572, mar 2009.
- [48] S. Vitturi, L. Peretti, L. Seno, M. Zigliotto, and C. Zunino, “Real-time ethernet

- networks for motion control," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 33, no. 5, pp. 465–476, sep 2011.
- [49] L. Seno, S. Vitturi, and C. Zunino, "Analysis of ethernet powerlink wireless extensions based on the IEEE 802.11 WLAN," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 5, no. 2, pp. 86–98, May 2009.
- [50] G. Gamba, L. Seno, and S. Vitturi, "Theoretical and experimental evaluation of polling times for wireless industrial networks using commercially available components," in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2010, pp. 1–8.
- [51] L. Seno, F. Tramarin, and S. Vitturi, "Performance of industrial communication systems: Real application contexts," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 27–37, jun 2012.
- [52] J. A. Maestro and P. Reviriego, "Energy efficiency in industrial ethernet: The case of powerlink," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2896–2903, Aug. 2010.
- [53] F. Tramarin and S. Vitturi, "Energy efficient ethernet for the industrial communication scenario," in *Proc. IEEE 18th Conf. Emerging Technologies Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2013, pp. 1–8.
- [54] F. Tramarin and S. Vitturi, "Strategies and services for energy efficiency in real-time ethernet networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 3, pp. 841–852, Jun. 2015.
- [55] "IEEE Std. 802.3az-2009, Energy Efficient Ethernet Standard Draft 1.2.1," 2009.
- [56] "IEC 61784, Digital data communications for measurement and control, Part 2: Additional profiles for ISO/IEC 8802-3 based communication networks in real-time applications," 2007.
- [57] L. Seno, S. Vitturi, and C. Zunino, "Real time ethernet networks evaluation using performance indicators," in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies Factory Automation*, Sep. 2009, pp. 1–8.
- [58] G. Gamba, L. Seno, and S. Vitturi, "Performance indicators for wireless industrial communication networks," in *Proc. 8th IEEE Int Factory Communication Systems (WFCS) Workshop*, May 2010, pp. 3–12.
- [59] P. Ferrari, A. Flammini, and S. Vitturi, "Response times evaluation of profinet networks," in *Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics ISIE 2005*, vol. 4, Jun. 2005, pp. 1371–1376.
- [60] G. Marsal, B. Denis, J. M. Faure, and G. Frey, "Evaluation of response time in ethernet-based automation systems," in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies and Factory Automation*, Sep. 2006, pp. 380–387.
- [61] B. Denis, S. Ruel, J. M. Faure, G. Frey, and G. Marsal, "Measuring the impact of vertical integration on response times in ethernet fieldbuses," in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2007)*, Sep. 2007, pp. 532–539.
- [62] B. Addad, S. Amari, and J. J. Lesage, "Analytic calculus of response time in networked automation systems," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 858–869, Oct. 2010.
- [63] M. Felser, "Fieldbus based isochronous automation application," in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies Factory Automation*, Sep. 2009, pp. 1–7.

IV.3. Очекивани доприноси

У пријави дисертације, кандидат је навео сљедеће очекиване резултате:

1. преглед стања научног истраживања у предметној области,
2. постављање теоретске основе за анализу параметара индустриских комуникационих мрежа,
3. модели којима се описује понашање различитих типова индустриских комуникационих мрежа,
4. нови алгоритми и методе за оптимизацију времена одзива индустриских комуникационих мрежа и
5. софтвер за конфигурацију индустриских комуникационих мрежа.

Као што ће бити показано, сви су у потпуности остварени.

IV.4. Остварени доприноси

Прегледом докторске дисертације кандидата, Комисија је установила да су остварени сљедећи резултати и доприноси:

1. Кандидат је у уводном поглављу дао опсежан преглед актуелног научног истраживања у предметној области.
2. У дисертацији су дате теоретске основе разматраних индустриских комуникационих мрежа и детаљно описане метрике које карактеризују ове системе.
3. На основу презентованих теоретских основа, кандидат је развио оригиналне аналитичке моделе који описују понашање претходно поменутих индустриских комуникационих система. Параметри модела су добијени мјерењем на експерименталним поставкама које је кандидат реализовао посебно за ову намјену. Упоредном анализом разматрана три протокола, показано је да *EtherCAT* постиже за око 30% краће вријеме комуникационог циклуса у односу на *Profinet IO*, док је у случају *Ethernet Powerlink* протокола ова разлика још већа (око 68% у случају стандардног и око 60% у случају уланчаног начина рада).
4. Кандидат је предложио нове алгоритме и методе за оптимизацију времена одзива индустриских комуникационих мрежа. Добијени резултати показују да се, примјеном предложених алгоритама, величина *EtherCAT* оквира (а самим тим и вријеме одзива) може смањити и до 20%, у односу на комерцијално доступне конфигурационе алате. Такође, унапређени механизам уланчавања PRes оквира код *Ethernet Powerlink* протокола (ET-PRC), који је кандидат предложио и експериментално верификовао, омогућава побољшање перформанси од око 10% у односу на рјешења других аутора.
5. Како би могао тестирати предложене алгоритме, кандидат је реализовао специфичан софтвер који омогућава аутоматизовану конфигурацију мреже са оптималном тополошком структуром.

V МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

V.1. Материјал и критеријуми

Фокус истраживања, обрађен у дисертацији, јесте оптимизација времена одзива индустриских комуникационих мрежа.

Оптимизација комуникационе ефикасности индустриских комуникационих система, нарочито у погледу објективних метрика, као што је вријеме одзива, веома је актуелна, како у области академског истраживања, тако и у области примјене. Вријеме одзива представља једну од најзначајнијих метрика у индустриским комуникационим системима. Оно директно одређује ефикасност производног процеса, што даље утиче на цијену и квалитет крањег производа. Код протокола највиших перформанси, који су предмет истраживања ове дисертације, вријеме одзива зависи од времена комуникационог циклуса које се може постићи у систему јер је остварена прецизна синхронизација свих компонената система.

V.2. Метод и актуелност истраживања

Кандидат у уводном поглављу указује на актуелност области истраживања. Затим прелази на појединости које нису довољно истражене из чега произилазе садржаји који су научни допринос његове докторске дисертације.

С обзиром да се постављени циљ дисертације односи на оптимизацију времена одзива индустриских комуникационих система, кандидат је прво указао на потребу за прецизним аналитичким моделима. На основу предложених модела, представљени су резултати симулације и компаративне анализе три разматрана RTE комуникациона система. Ови резултати омогућавају идентификацију простора за побољшање комуникационих механизама протокола који ће као резултат довести до побољшања времена одзива система.

На основу претходног произишли су оригинални приједлози техника и механизама који омогућавају оптимизацију времена одзива система. Кандидат предлаже три механизма за оптимизацију комуникације у *EtherCAT* и *Ethernet Powerlink* систему. Анализира њихове предности, недостатке и ограничења.

Теоретске поставке пројектоване су рачунарским симулацијама и мјерењима на прототипима мрежа које је кандидат реализовао посебно за ове потребе. Експерименталне поставке укључују три разматрана комуникациона протокола. Резултати симулације и мјерења су представљени табеларно и одговарајућим дијаграмима. На основу тога кандидат извлачи одговарајуће закључке и препоруке. Дакле, кандидат је користио савремене научне методе и технике држећи се плана истраживања дефинисаног у пријави докторске дисертације.

Осим што је проблематика актуелна, примјењена методологија и технике решавања дефинисаног задатка су научно и методолошки савремени.

VI РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА

VI.1. Резултати истраживања

Поређењем са резултатима других аутора, Комисија закључује да су у раду остварени сљедећи научни доприноси:

Моделовање индустријских комуникационих система. Предложени су оригинални аналитички модели који на одговарајући начин описују понашање поменутих комуникационих протокола узимајући у обзир специфичност конфигурације оваквих система. Временски параметри поменутих модела одређени су експериментално. Теоријска анализа обухвата различите сценарије, а резултати анализе су презентовани с обзиром на број уређаја у мрежи и величину процесних података који се размјењују.

Додатном упоредном анализом поменута три протокола, показано је да, у смислу поменутих метрика, најбоље перформансе постиже *EtherCAT* систем, при чему је разматран сценарио једног типичног дистрибуираног система аутоматизације који може да се нађе у стварним инсталацијама. Приликом анализе, узете су у обзир реалне карактеристике компонената система, као и специфичности конфигурације које утичу на величину и редослијед слања оквира којима се размјењују временски критични подаци. Добијени резултати показују да *EtherCAT* постиже за око 30% краће вријеме комуникационог циклуса у односу на *Profinet IO*, док је у случају *Ethernet Powerlink* протокола ова разлика још већа (око 68% у случају стандардног и око 60% у случају уланчаног начина рада). С обзиром да је код анализираних система, због могућности остваривања потпуне синхронизације, вријеме одзива доминантно одређено временом комуникационог циклуса, претходно закључивање се може примјенити и на вријеме одзива.

Технике и механизми за оптимизацију времена одзива. У случају *EtherCAT* протокола предложена су два приступа. Први приступ представља модификацију линијске топологије са великим бројем уређаја на начин да садржи више мањих линијских сегмената, чиме се смањује кашњење услед пропагације оквира кроз мрежу. У ту сврху искоришћена је топологија звијезде која се базира на мрежном преспојнику са VLAN ознакама. Теоријском анализом је показано да се може постићи вријеме циклуса које је за више од 30% краће у односу на класичну линијску топологију. Такође, потврђено је да избор броја портова преспојника одређује ефикасност примјењеног метода. У разматраним случајевима утврђено је да се оптималан избор своди на број који се добија приликом изједначавања пропагационог кашњења линијског огранка мреже (укључујући кашњење мрежног преспојника) са укупним временом потребним за слање оквира свим огранцима.

Други приступ подразумијева примјену алгоритма којим се може оптимизовати дужина сумационог оквира. Наиме, у ову сврху је искоришћена карактеристика *EtherCAT* протокола да може у оквиру једног телеграма двосмјерно размјењивати податке. Правилном конфигурацијом могуће је значајно смањити укупну величину оквира, нарочито ако је остварена одређена симетрија величине процесних података у систему. Предложена модификација алгоритма укључује два концепта груписања уређаја у:

- физичке групе, како би се уважила постојећа ограничења које уводи сам производни процес и

- логичке групе или домене, како би се побољшала дијагностика система.

Алгоритам је примјењен за различите сценарије који подразумијевају стварне мрежне конфигурације. Исправност рада концепта је демонстрирана на прототипу мреже мање величине. Добијени резултати показују да се у стварним условима величина оквира може смањити и до 20%, у односу на комерцијално доступне конфигурационе алате. Такође, аутор закључује да се, у случају комплекснијих мрежних структура, постижу бољи резултати.

Код *Ethernet Powerlink* приступа предложена је модификација оригиналног приступа са уланчавањем PRes оквира (PRC начин рада), код којег се чворови активирају коришћењем временски-инициране парадигме (TT-PRC). Уведена модификација подразумијева уланчавање PRes оквира контролисано догађајима (ET-PRC). Овај начин рада захтијева незннатне софтверске модификације доступних имплементација *Ethernet Powerlink* комуникационог стека. Предложено решење је експериментално верификовано на прототипу мреже за различите топологије, а добијени резултати су упоређени са стандардним и TT-PRC начином рада. У циљу евалуације ET-PRC механизма за комплексније мрежне структуре, кандидат је развио симулациони модел за OMNeT++ симулатор. Симулационим анализама, кандидат је показао да ET-PRC има предност од око 10% у односу на TT-PRC приступ.

У случају *Profinet IO* протокола анализиран је механизам динамичког паковања оквира, који је недавно предложен, с циљем побољшања перформанси система. Поменути механизам је детаљно описан, а затим је спроведена теоријска анализа за двије тополошка структуре. Резултати анализе показују да примјењени механизам омогућава и до 35% краћу дужину трајања изохроног интервала у односу на стандардни начин рада. Такође, при величини процесних података испод 12 бајтова, топологија звијезде постиже боље резултате у односу на линијску топологију без обзира на број уређаја који се користи у мрежи. Међутим, за веће процесне податке, линијска топологија има предност због динамичке промјене величине оквира.

Кандидат је објавио девет радова који су директно везани са дисертацијом, а који су у дисертацији презентовани у цјелини или дјелимично. Један рад је објављен у часопису са SCI-Е листе и фактором утицаја 4.708, један рад је објављен у часопису националног значаја, пет радова је презентовано на међународним конференцијама, док су три рада презентована на националним конференцијама, од којих је један проглашен за најбољи рад младог аутора у секцији Електроника. У свим овим радовима кандидат је први аутор. Такође, дисертација представља наставак истраживања започет у магистарском раду кандидата.

Хронолошки списак кандидатових публикација из области дисертације је сљедећи:

- [1] M. Knezic, B. Dokic, and Z. Ivanovic, "Topology aspects in ethercat networks," in Proc. 14th Int. Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE/PEMC), Sep. 2010, pp. T1–1–T1–6.
- [2] M. Knezic, B. Dokic, and Z. Ivanovic, "Influence of the ethercat frame transmission time on network efficiency in case of asymmetric traffic," in Proc. 54th ETRAN Conf., June 2010, pp. 1–4.
- [3] M. Knezic, B. Dokic, and Z. Ivanovic, "Increasing ethercat performance using frame size optimization algorithm," in Proc. IEEE 16th Conf. Emerging Technologies Factory Automation (ETFA), Sep. 2011, pp. 1–4.

- [4] M. Knezic and B. Dokic, "Performance aspects of the Switched EtherCAT networks," in Proc. 55th ETRAN Conf., June 2011, pp. 1–4 (проглашен за најбољи рад младог аутора у секцији Електроника).
- [5] M. Knezic, B. Dokic, and Z. Ivanovic, "Performance evaluation of the switched EtherCAT networks with VLAN tagging," Serbian Journal of Electrical Engineering, vol. 9, no. 1, pp. 33–42, 2012.
- [6] M. Knezic, B. Dokic, and Z. Ivanovic, "A software tool for efficient configuration of ethercat networks," in Proc. IEEE 17th Int. Conf. Emerging Technologies Factory Automation (ETFA 2012), Sep. 2012, pp. 1–4.
- [7] M. Knezic and Z. Ivanovic, "Evaluation of ethernet over ethercat protocol efficiency," in Proc. INFOTEH-JAHORINA, vol. 12, Mar. 2013, pp. 455–459.
- [8] M. Knezic, B. Dokic, and Z. Ivanovic, "Performance analysis of the ethernet powerlink pollresponse chaining mechanism," in Proc. IEEE World Conf. Factory Communication Systems (WFCS), May 2015, pp. 1–4.
- [9] M. Knezic, B. Dokic, and Z. Ivanovic, "Theoretical and experimental evaluation of ethernet powerlink pollresponse chaining mechanism," IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016.

VI.2. Критичност и коректност тумачења резултата

Комисија оцењује да је кандидат добијене резултате правилно, логично и јасно тумачио, испољавајући при томе доволно критичности. Он прецизно идентификује проблеме из предметне области који нису решени или су недовољно истражени од стране других аутора. Кандидат коректно пореди резултате сопственог истраживања са резултатима других аутора.

VI.3. Нови истраживачки задаци

Кандидат у својој дисертацији истиче даљи правац истраживања у смјеру проширења предложених рјешења у циљу отклањања уочених недостатака. Тако, на пример, он уочава да код *EtherCAT* протокола постоји простор за оптимизацију у случајевима када величина процесних података превазилази опсег једног *Ethernet* оквира максималне дужине. Такође, кандидат истиче да се оптималан избор броја портова мрежног преспојника, код приступа којим се смањује пропагационо кашњење *EtherCAT* мреже, може аналитички одредити на начин изложен у дисертацији само у случају хомогене мреже, код које сви уређаји имају исте карактеристике и исту величину процесних података. У том смислу, он предлаже да се, у будућем раду, формализује алгоритам који узима у обзир ефекте асиметрије у структури мреже и да се као резултат добије оптимална мрежна структура.

У случају *Ethernet Powerlink* протокола, кандидат указује да се ET-PRC механизам може унаприједити тако да омогући исправан рад и у случају губитка оквира, на начин да управљачки уређај континуално надзира комуникацију и обезбеђује одговарајуће сигналне поруке које омогућавају наставак комуникације у случају грешке.

Код *Profinet IO* комуникације, кандидат примјењује да постоји простор за унапређење алгоритама који креирају временски план слања порука како у стандардном, тако и у начину рада са динамичким паковањем оквира. У том смислу, он указује на потребу анализирања постојећих алгоритама како би се идентификовала простор за евентуална унапређења.

VII ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ

Докторска дисертација мр Младена Кнежића под називом

ОПТИМИЗАЦИЈА ВРЕМЕНА ОДЗИВА ИНДУСТРИЈСКИХ КОМУНИКАЦИОНИХ МРЕЖА

садржи више оригиналних научних доприноса у овој области. Главни научни допринос се односи на моделовање и технике оптимизације времена одзива у индустриским комуникационим системима. Материја је обрађена на веома коректан научно утемељен начин. Предложени аналитички модели су пројвјерени рачунарским симулацијама и мјерењима. Теоретске поставке су експериментално потврђене. Реализовани су прототипови разматраних индустриских комуникационих мрежа. Резултати симулације и мјерења су представљени табелама и дијаграмима. Кандидат указује на ограничења предложених рјешења, као и на даље правце истраживања. Већи дио резултата истраживања већ је био изложен научној критичкој јавности. Прво, ова дисертација представља наставак магистарског рада, кандидат је први аутор седам објављених радова из ове области. Један од тих радова је објављен у међународном часопису са SCI-E листе са фактором утицаја 4.708. Један рад презентован на националној Конференцији ЕТРАН, проглашен је за најбољи рад младог аутора у секцији Електроника.

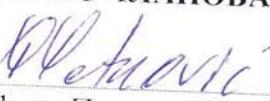
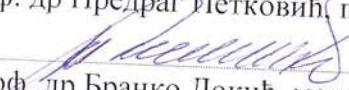
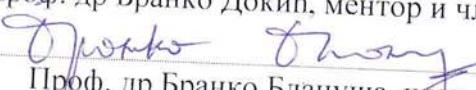
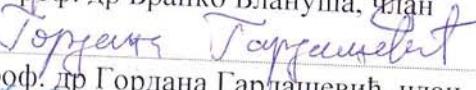
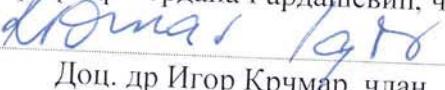
С обзиром на све што је изложено у овом Извештају, Комисија са великим задовољством

ПРЕДЛАЖЕ

Наставно-научном вијећу Електротехничког факултета и Сенату Универзитета у Бањој Луци да прихвати докторску дисертацију ОПТИМИЗАЦИЈА ВРЕМЕНА ОДЗИВА ИНДУСТРИЈСКИХ КОМУНИКАЦИОНИХ МРЕЖА мр Младена Кнежића и кандидату одобри јавну усмену одбрану.

Бања Лука, 04.03.2017. године

ПОТПИС ЧЛНОВА КОМИСИЈЕ

1. 
Проф. др Предраг Петковић, предсједник
2. 
Проф. др Бранко Докић, ментор и члан
3. 
Проф. др Бранко Блануша, члан
4. 
Проф. др Гордана Гарашићевић, члан
5. 
Доц. др Игор Крчмар, члан