



УНАПРЕЂЕЊЕ MODBUS СИМУЛАТОРА ЗА РЕАЛИСТИЧНУ СИМУЛАЦИЈУ УРЕЂАЈА У СИСТЕМИМА ЗА УПРАВЉАЊЕ ЕНЕРГИЈОМ (EMS)

ENHANCEMENT OF A MODBUS SIMULATOR FOR REALISTIC SIMULATION OF DEVICES IN ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS (EMS)

Андреа Мишковић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – РАЧУНАРСКА ТЕХНИКА И РАЧУНАРСКЕ КОМУНИКАЦИЈЕ

Кратак садржај – *Тема овог рада јесте унапређење Modbus симулатора, развијеног у циљу тестирања система за управљање енергијом. Унапређење се огледа у могућности симулације рада уређаја који учествују у системима управљања енергијом, користећи статичке и динамичке симулације. Развијено решење омогућава тестирање функционалности и перформанси система без потребе за физичким уређајима.*

Кључне речи: *Симулатор, Modbus, системи управљања енергијом, симулације*

Abstract – *The topic of this thesis is the improvement of a Modbus simulator, developed for testing energy management systems. The improvement is reflected in the ability to simulate the operation of devices involved in EMS systems, using both static and dynamic simulations. The developed solution enables functionality and performance testing without the need for physical devices.*

Keywords: *Simulator, Modbus, energy management systems (EMS), simulations*

1. УВОД

Концепт симулатора представља кључан алат у развоју и тестирању различитих система. Главни разлог јесте јер омогућава прецизно моделовање и анализу понашања уређаја у контролисаним условима и намерно изазваним околностима. У савременим системима управљања енергијом, рад са уређајима чије је понашање предвидиво представља изазов, имајући у виду ограничену доступност или високу цену [2]. Као одговор на овај изазов, развијен је *Modbus* симулатор који опонаша реалистична понашања уређаја у систему управљања енергијом. Симулатор омогућава истовремено тестирање великог броја уређаја и пружа могућност испитивања различитих сценарија, без потребе за физичким уређајима. У овом раду описан је развој и унапређење наведеног симулатора, чијом имплементацијом је омогућено детаљније праћење и валидација понашања мерних уређаја у системима управљања енергијом.

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је била др Јелена Ковачевић, ред. проф.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

На самом почетку, потребно је упознати се са основним теоријским принципима, у циљу бољег разумевања рада.

2.1. Систем управљања енергијом (EMS)

Energy Management System (EMS) је систем дизајниран за праћење, контролу и оптимизацију производње и потрошње енергије у различитим објектима, мрежама или индустријским постројењима [1]. *EMS* интегрише хардверске и софтверске компоненте како би омогућио ефикасно управљање енергијом и смањење трошкова, док истовремено повећава поузданост и сигурност енергетских система.

Главне функције *EMS* система укључују:

1. Праћење и прикупљање података
2. Анализа и визуелизација
3. Контрола и аутоматизација
4. Оптимизација и предиктивно управљање

EMS функционише тако што прикупља податке са различитих уређаја (нпр. сензори, паметна бројила), обрађује их како би идентификовао обрасце потрошње и неефикасности, визуелизује информације кроз графиконе и дашборде, омогућава аутоматско или полуавтоматско управљање уређајима ради смањења непотребне потрошње и користи алгоритме за предиктивно управљање како би оптимизовао рад система и балансирао коришћење различитих извора енергије.

Примена *EMS*-а се јавља у индустрији, комерцијалним зградама, паметним кућама и електродистрибуцији. Предности се огледају у смањењу трошкова енергије, повећању енергетске ефикасности, смањењу емисије штетних гасова и повећању поузданости система, као и могућности интеграције обновљивих извора енергије са постојећим системом [1,3].

2.2. Уређаји у EMS

EMS интегрише различите уређаје који омогућавају праћење, контролу и оптимизацију енергије [5, 6]:

1. Уређаји за мерење и прикупљање података
2. Комуникациони уређаји
3. Уређаји за складиштење података
4. Управљачки уређаји
5. Кориснички интерфејси
6. Уређаји за заштиту и безбедност

Уређаји за мерење и прикупљање података бележе потрошњу и производњу енергије, као и кључне електричне параметре попут напона, струје и фреквенције, пружајући основу за детаљну анализу система [6]. Комуникациони уређаји омогућавају поуздану размену информација између сензора, актуатора и софтверског дела EMS-а, користећи стандардизоване протоколе и мрежне технологије. Уређаји за складиштење података чувају историјске информације, што омогућава анализу трендова, праћење перформанси и доношење одлука заснованих на дугорочним обрасцима. Управљачки уређаји омогућавају аутоматско и полуавтоматско управљање потрошачима енергије, ради оптимизације потрошње и повећања ефикасности. Кориснички интерфејси пружају оператерима преглед стања система кроз визуализације, олакшавајући праћење и контролу у реалном времену. На крају, уређаји за заштиту и безбедност штите EMS и осигуравају заштиту података и стабилност инфраструктуре, штите комуникацију од сајбер претњи и омогућавају шифровану комуникацију.

2.3. Modbus протокол

Modbus је комуникациони протокол који се широко користи у индустрији за повезивање електронских уређаја и сензора, посебно у системима за аутоматизацију и управљање енергијом. Протокол омогућава различитим уређајима као што су контролери, сензори и мерни уређаји, да размењују податке на једноставан и стандардан начин.

Modbus функционише по принципу клијент-сервер (раније познатом као *master-slave*) архитектуре. Клијент је обично уређај или софтверска апликација која иницира комуникацију, док је сервер уређај који прима захтеве и враћа одговоре, и то су уређаји као што су паметно бројило, сензор и слични [4].

Постоји више варијанти Modbus протокола, а у оквиру овог рада коришћене су:

1. *Modbus RTU* – користи серијску комуникацију и погодан је за индустријска окружења због једноставности, поузданости и ниских трошкова. Идеалан је за повезивање великог броја уређаја.
2. *Modbus TCP/IP* – ради преко мрежа заснованих на *Ethernet* протоколу, омогућава бржу и лакшу интеграцију у савремене мрежне системе.

Modbus протокол је једноставан, поуздан и лак за имплементацију, што је довело до тога да данас буде један од најчешће коришћених протокола за повезивање индустријских уређаја. Омогућава EMS системима да прецизно и стабилно прикупљају податке о потрошњи, производњи и другим параметрима, што је кључно за праћење и оптимизацију система.

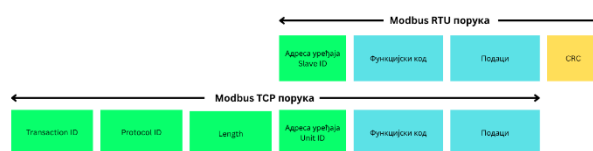
2.3.1. Modbus поруке

Свака Modbus порука има унапред дефинисану структуру. Пример структуре у RTU формату:

- Адреса уређаја
- Функцијски код
- Подаци
- Контрола интегритета података (CRC или LRC)

У Modbus TCP формату, структура поруке укључује MBAP (eng. *Modbus Application Protocol*) заглавље:

- *Transaction ID*
- *Protocol ID*
- *Length*
- *Unit ID*



Слика 1 - Структура Modbus порука

3. ОПИС РЕШЕЊА

У оквиру овог рада фокус је био на унапређењу симулатора, имплементираног да буде главни алат приликом тестирања система за управљање енергијом. Главни циљ унапређења јесте могућност тестирања понашања читавог система у реалним условима без потребе за физичким уређајима.

3.1. Архитектура система



Слика 2. Архитектура система

На слици је приказана архитектура система који се састоји из четири основне компоненте:

1. **Централна компонента** – представља кључни елемент архитектуре система и делује као посредник између свих осталих компоненти. Њена улога је да у реалном времену прима и обрађује телеметријске податке, врши њихову валидацију и упис, као и да прослеђује одређене захтеве.
2. **База података**
3. **Мобилна/веб апликација** – представља директну везу корисника са системом. Служи као визуелни и контролни слој који омогућава надзор, анализу и управљање уређајима.

Корисници имају јасно представљен преглед потрошње и производње у реалном времену, као и историјске податке у виду графикона и табела.

4. **Симулатор уређаја** – опонаша рад реалних уређаја (паметна бројила, *PV* инвертери, батеријски системи, *EV* пуњачи и други) и тако омогућава реалистично тестирање система без потребе за физичким уређајима [7, 8]. Имплементиран је у програмском језику *Python*, коришћењем *Pymodbus* библиотеке.

3.2. *Pymodbus* библиотека

Pymodbus је *open-source Python* библиотека која представља имплементацију *Modbus* протокола [13]. Потпуно је написана у *Python*-у и омогућава једноставно креирање *Modbus* клијента и сервера, што је чини погодном за развој симулатора и тестирање индустријских система.

У оквиру овог рада коришћена је за:

1. Имплементацију *Modbus* сервера у симулатору који емитује податке који потичу од стварних уређаја
2. Дефинисање регистара у којима се чувају симулиране вредности
3. Обраду захтева клијента

3.3. Симулације

Симулације представљају контролисано, намерно и поновљиво извођење сценарија рада уређаја у циљу тестирања, мерења, оптимизације и верификације њиховог понашања. У оквиру овог рада, проширење симулатора је извршено додавањем симулација понашања стварних уређаја током 24 сата. Симулације могу бити статичке или динамичке, у зависности од начина генерисања мерних података.

3.3.1. Статичке симулације

Статичке симулације се заснивају на низу унапред дефинисаних података, који су прикупљени са стварног уређаја током 24 сата. Мерне вредности су снимане сваке секунде како би се обезбедила висока временска резолуција података. Приликом симулације, снимљени подаци се шаљу у истом редоследу централној компоненти система, чиме се обезбеђује верна репродукција рада уређаја у реалним условима.

Предност овог приступа јесте веродостојност генерисаних вредности, док је ограничење у томе што сценарио остаје непромењив и не може подржати нове или неочекиване услове рада. Због тога се статичке симулације често користе за тестирање рада уређаја у идеалним условима, што је корисно за верификацију основних функционалности система.

3.3.2. Динамичке симулације

Динамичке симулације представљају напреднији приступ у тестирању и верификацији рада уређаја и *EMS* система, јер омогућавају генерисање података у складу са дефинисаним сценаријима и условима рада, а не само репродукцију већ постојећих података.

Основна идеја динамичке симулације је да се користи конфигурациона датотека у *JSON* формату, у којој су прецизно дефинисани временски интервали и одговарајуће вредности активне снаге (*P*) за сваки интервал током једног дана. Овај *JSON* фајл служи као улаз за симулатор, који затим, на основу вредности активне снаге у датом интервалу, применом одговарајућих физичких формула израчунава остале релевантне величине као што су: напон (*U*), струја (*I*), реактивна снага (*Q*), привидна снага (*S*), фреквенција (*f*), укупно утрошена или произведена енергија (*E*).

Пример формуле за израчунавање напона:

$$U_{t+1} = \begin{cases} U_t + \Delta^+, \text{ ако је } d_t = 1 \\ U_t - \Delta^-, \text{ ако је } d_t = -1 \end{cases} \quad (1)$$

$$d_t = \begin{cases} -1, \text{ ако } U_{t+1} \geq 240V \\ 1, \text{ ако } U_{t+1} \leq 228V \end{cases}$$

Где је:

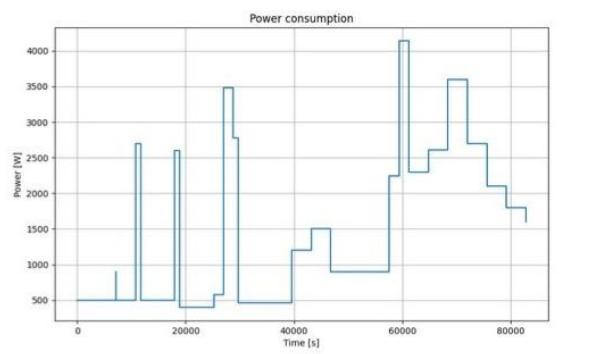
- U_t – вредност напона у тренутном кораку t
- d_t – правац промене
- Δ^+ – корак повећања који износи 0,2V
- Δ^- – корак смањења који износи 0,15V

Пример формуле за израчунавање струје:

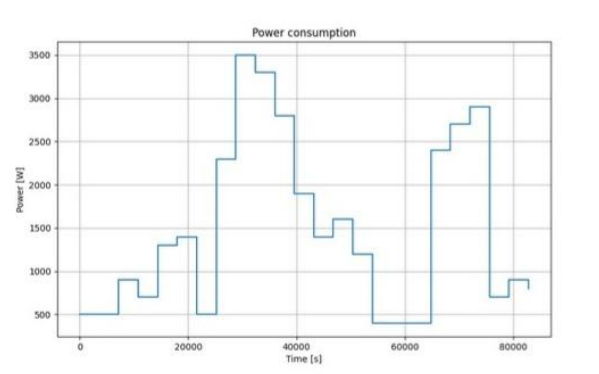
$$I_t = \frac{P_t}{U_t \cdot \cos \varphi} \quad (2)$$

Где је:

- P_t – активна снага у тренутку t
- U_t – напон у тренутку t
- $\cos \varphi$ – фактор снаге (варира између 0,92 и 0,95 у зависности од доба дана)



Слика 3. Пример симулације током 24 сата



Слика 4. Пример симулације током 24 сата

4. ТЕСТИРАЊЕ

Тестирање је спроведено са циљем да се провери тачност, поузданост и скалабилност развијеног симулатора. За анализу су коришћени унапред дефинисани сценарији који обухватају нормалан рад, рад при повећаном оптерећењу, као и услове у којима долази до поремећаја у комуникацији. Тестирање је подељено у две групе – функционално и тестирање перформанси.

Табела 1 - Функционални тестови

Тест случај	Очекивани резултат	Статус
Генерисање динамичких података	Подаци прате дефинисани JSON сценарио	✓
Генерисање статичких података	Подаци одговарају снимљеним вредностима	✓
Читање података из регистра	Исправно очитане вредности	✓
Писање вредности у регистар	Исправно уписана вредност	✓
Симулација прекида рада уређаја	Систем пријављује грешку и не емитује податке	✓
Брзо мењање вредности регистара	Систем успешно бележи све промене без губитака података	✓

Табела 2. Тестови перформанси

Број уређаја	Просечно време одзива [ms]	Максимална латенција [ms]	CPU оптерећење [%]
10	15	40	12
50	28	75	27
100	45	120	46
200	92	210	78

Спроведени тестови потврђују да развијени симулатор испуњава циљеве постављене у раду. Он омогућава верну репродукцију рада уређаја, стабилан пренос података, скалабилност већег броја уређаја и отпорност на грешке.

5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду представљен је развој и унапређење *Modbus* симулатора са могућношћу реалистичног опонашања рада уређаја у оквиру система за управљање енергијом (*EMS*). Развијени симулатор успешно омогућава тестирање и валидацију функционалности без употребе физичких уређаја,

чиме се значајно смањују трошкови, убрзава развој и повећава безбедност тестирања.

Имплементација је заснована на програмском језику *Python* и *Pymodbus* библиотеци, што је омогућило флексибилну конфигурацију понашања симулираних уређаја и подршку за велики број паралелних инстанци. Унапређење се огледа у два могућа типа рада симулатора – статичке и динамичке симулације. Статичке симулације омогућавају репродукцију унапред дефинисаних скупова података, прикупљених са реалних уређаја, погодних за тестирање у идеалним условима. Динамичке симулације нуде већу флексибилност, јер омогућавају конфигуравање сценарија у *JSON* формату и динамичко израчунавање релевантних електроенергетских параметара према физичким формулама, што је посебно корисно за тестирање система у променљивим или екстремним условима. Резултати имплементације показују да овако развијен симулатор може верно да опонаша рад великог броја уређаја, генерише реалистичне податке и омогући тестирање кључних *EMS* функционалности.

4. ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. R. Al-Ali, I. A. Zualkernan, M. Rashid, R. Gupta, and M. AliKarar, "A Smart Home Energy Management System Using IoT and Big Data Analytics Approach," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 63, no. 4, pp. 426–434, Nov. 2017.
- [2] Magnusson, P. S., Christensson, M., Eskilson, J., Forsgren, D., Hallberg, G., Hogberg, J., Larsson F., Moestedt A., Werner, B. Simics: A full system simulation platform. *Computer*, 2002: 35(2), 50–58.
- [3] V. K. Barai, S. R. Mohanty, and N. Kishor, "A review on modeling and simulation of energy management systems," *International Journal of Energy Research*, vol. 39, no. 10, pp. 1311–1323, Aug. 2015.
- [4] "Modbus Application Protocol Specification V1.1b3," Modbus Organization, 2012. [Online]. Available: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf
- [5] F. C. Schweppe, *Energy Management Systems for Electric Utilities*. Springer, 2013.
- [6] A. S. Bouhouras, P. M. Georgilakis, and D. P. Labridis, "A comprehensive review of energy management systems for microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 122, pp. 159–168, May 2015.
- [7] Park, S., Kim, H., Moon, H., Heo, J., and Yoon, S. Concurrent simulation platform for energy-aware smart metering systems. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010: 56(3), 1918–1926.
- [8] Cen, Z. Modeling and Simulation for an 8 kW Three-Phase Grid-Connected Photo-Voltaic Power System. *Open Physics*, 2017: 15(1), 603–612
- [9] Jovanović, B., Filipović, J., & Bakić, V. (2017). Energy management system implementation in Serbian manufacturing – Plan–Do–Check–Act cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1144–1156.
- [10] Alahakoon, D., & Yu, X. (2016). Smart electricity meter data intelligence for future energy systems: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(1), 425–436.

- [11] S. K. Rathor and D. Saxena, "Energy management system for smart grid: An overview and key issues," *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 6, pp. 4067–4109, 2020.
- [12] S. K. Khaitan and J. D. McCalley, "Design Techniques and Applications of Cyber-Physical Systems: A Survey," *IEEE Systems Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 350–365, Jun. 2015.
- [13] GitHub – *Pymodbus Documentation*. Available: <https://github.com/pymodbus-dev/pymodbus>

Кратка биографија:



Андреа Мишковић рођена је у Шапцу 1999. године. Основне студије завршила је на Факултету техничких наука 2022. године. Мастер рад на тему „Унапређење *Modbus* симулатора за реалистичну симулацију уређаја у системима за управљање енергијом“ одбранила је 2025. године.