

Рецензия

на дисертационния труд на

Полина Красимирова Кесова

на тема **„Разработка на интелигентна система за енергиен мениджмънт“**

представена за получаване на образователна и научна степен „доктор“ по научната специалност 5.2. Електротехника, електроника и автоматика (Системи с изкуствен интелект)

от катедра **„Автоматизация на производството“**,

Факултет по химично и системно инженерство

Химико-технологичен и металургичен университет– София

1. Кратки биографични данни и характеристика на научните интереси на кандидата

Магистър инж. Полина Кесова е бакалавър по специалността „Автоматизация и информационни технологии“ в ХТМУ от 2010 г. и магистър по „Индустриален мениджмънт“ в ХТМУ от 2012 г. От 2011 г. до сега работи на различни длъжности в Елаците Мед АД. На 01.03.2014 г. е зачислена за редовен докторант със срок на обучение три години по специалност 5.2. Електротехника, електроника и автоматика (Системи с изкуствен интелект) в катедра „Автоматизация на производството“. Докторантката успешно полага всички изпити, определени в индивидуалния учебен план в изпълнение на чл.10 (1) съгласно приложените документи. Отчислена е с право на защита на 22.02.2018 г.

Докторантката е представила всички необходими документи за защита на дисертационния труд в изпълнение на чл.14 (1) от Правилника за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности (ППНСЗАД) в ХТМУ.

Основните интереси на докторантката са анализ на данни в системите за енергиен мениджмънт, подобряване на ефективността на системите за енергиен мениджмънт чрез анализиране и оптимизиране на енергийното потребление, чрез използване на Индустриалния интернет на нещата, оптимизация на реактивната мощност, нови функционалности на системите за енергиен мениджмънт, заложи в Индустриалния Интернет на нещата.

2. Преглед на дисертационния труд и анализ на резултатите

Дисертацията има актуална тематика, определена от важността и вниманието, което се отделя на енергийната ефективност в индустрията във връзка с повишаване на ефективността и устойчивостта на индустриалните предприятия. В тази връзка се разработват и внедряват системи за енергиен мениджмънт за оптимизация на енергопотреблението, намаляване на оперативните разходи и ограничаване на отрицателното въздействие върху околната среда. Затова е необходимо интегриране на енергийните характеристики с производствените процеси, оборудване, технологични режими и управление. Тук основен проблем е хетерогентността на различните подсистеми - SCADA (супервайзерно управление и събиране на данни), MES система за оперативно управление на производството), EnMS (системата за енергиен

мениджмънт), електромери, анализатори, PLC (програмируемите логически контролери) и корпоративни информационни системи. Това обуславя стандартизиране на тези процеси, оборудване, знания, индустриални комуникации и технологии. Направен е извод, че оперативната съвместимост на синтактично ниво не е достатъчна, необходима е и семантична съвместимост. Предмет на изследване в дисертационния труд са научни и приложни проблеми, за разработване на интелигентни/умни системи за енергиен мениджмънт в индустриални предприятия с използване на съвременни информационни технологии, онтологични модели, методи на изкуствения интелект и индустриалния интернет на нещата за изграждане на интелигентни архитектури за управление на енергията.

Основната цел на дисертацията е разработване на интелигентен семантично ориентиран подход и хибридна архитектура, базирана на изкуствен интелект (AI) за енергиен мениджмънт в индустриално предприятие, осигуряващи семантична интеграция, интелигентен мониторинг, анализ, диагностика и оптимизация на енергийните процеси чрез използване на онтологии, графи от знания, технологии на Индустриалния интернет на нещата (IIoT), символен AI и методи на изчислителен интелект. За постигане на поставената цел на изследване са формулирани 8 задачи, успешно решени в дисертацията.

Дисертацията съдържа увод, 6 глави, общи изводи, приноси на дисертацията, публикации по дисертационния труд, апробация на резултатите и заключение. Приложен е списък на използваните съкращения и означения. Дисертационният труд е изложен на 227 страници и съдържа 65 фигури и 17 таблици. Цитирани са 149 източника.

Първа глава обуславя необходимостта от интелигентен подход за разработване на умни системи за енергиен мениджмънт, който да обединява семантични модели, онтологии, графи от знания, стандарти за енергиен и производствен мениджмънт, индустриални комуникационни технологии и методи на изкуствения интелект. По този начин енергийните данни се превръщат от изолирани измервания в контекстуализирани знания, използваеми за анализ и подпомагане на решения. Направен е обзор на съществуващите индустриални системи за енергиен мениджмънт. Анализирани са основни референтни архитектури, информационни модели и онтологии, изкуствен интелект и индустриален мениджмънт на нещата (IIoT). В резултат на сравнителен анализ на основните стандарти за енергиен мениджмънт е установено, че стандартите осигуряват нормативната и методологичната основа, но не предоставят единен формален модел за свързване на енергийните показатели с оборудването, производствените процеси и измервателните системи. От тук произтича необходимостта от разработване на хибридна семантично-оптимизационна AI архитектура за интелигентен енергиен мениджмънт в индустриална среда (цел на дисертацията).

Във Втора глава е разработена методологична рамка за изграждане на интелигентна система за енергиен мениджмънт, базирана на семантични технологии, стандартизация и AI-базиран анализ. Необходимостта от хибриден AI подход произтича от това, че индустриалните енергийни данни се генерират от различни източници и описват едновременно производствени процеси, измервателна инфраструктура, енергийни показатели, оборудване и организационни цели. Самостоятелното използване само на правила или само на модели, базирани на данни, не е достатъчно за надеждна семантична интерпретация и адаптивна оптимизация. Хибридният подход комбинира няколко взаимно допълващи се парадигми. Изкуственият интелект осигурява формално представяне чрез онтологии, ограничения и правила. Семантичните технологии създават

оперативна съвместимост. Графите от знания свързват енергийните, производствените и измервателните обекти. Оптимизацията подпомага избора на решения.

В Трета глава е представена методология за разработка на онтология с приложение в предприятие за добив на цветни метали, базирана на ISO 50001 (дефинира системна рамка за енергийна политика, планиране, изпълнение, проверка и непрекъснато подобрене), IEC 62264 (свързване на енергийния и производствения контекст; дефинира модели на оборудване, материали, операции, способности и производствена ефективност) и онтологиите SOSA/SSN (онтология за сензори, наблюдения, проби и изпълнителни механизми/семантична сензорна мрежа). Съгласуването на ISO 50001, IEC 62264 и SOSA/SSN осигурява контекстно разбиране и унифицирано представяне на данните.

Четвърта глава описва онтологично базирана семантична архитектура за интелигентен енергиен мениджмънт, интегрираща OPC UA (унифицирана архитектура за комуникации с отворена платформа), OWL (Web език за онтологии) модели, графи от знания и индустриални информационни системи.

Пета глава е посветена на онтологично базиран мониторинг със съответна архитектура на показателите за качество на електроенергията и интелигентен анализ със семантично базирано откриване на аномалии и прилагане на SWRL (език за правила в семантичната мрежа) правила и граф от знания.

Шеста глава представя интелигентен метод за вземане на решение в системите за енергиен мениджмънт на базата на алгоритъм за оптимизация, базиран на интелигентността на рояците скакалци, анализ на реактивната мощност и фактора на мощността и формулиране и решение на оптимизационната задача.

Докторантката демонстрира отлично познаване на широк набор от методи на изследване като системен и сравнителен анализ; моделиране съгласно ISO 50001 и IEC 62264; методи на онтологичното инженерство; OWL/RDF представяне; семантично съгласуване с SOSA/SSN; SPARQL заявки, SWRL правила и логически извод; архитектурно моделиране на IIoT и OPC UA среди; статистически анализ и обработка на времеви редове; анализ на качеството на електроенергията; метаввристична оптимизация чрез алгоритъма на скакалците. За реализация и проверка са използвани Protégé, онтологични хранилища и графи от знания, OPC UA, MATLAB и данни от реална промишлена измервателна инфраструктура. Правилният им избор и умело приложение и интеграция е позволило успешно решаване на поставените задачи за изпълнение на целта на дисертацията.

3. Оценка на съответствието между автореферата и дисертационния труд

Авторефератът отразява основните методи, подходи, модели, алгоритми и приноси от дисертацията.

4. Характеристика и оценка на приносите в дисертационния труд

1. Разработена е методологична рамка за изграждане на интелигентна система за енергиен мениджмънт, интегрираща семантични технологии, графи от знания,

стандартизирани индустриални модели и методи на изкуствения интелект (AI) (Глава 2). Методологията съдържа шест етапа: планиране, моделиране, семантична интеграция, системна интеграция, анализ и AI и валидация. Методологията създава предпоставки за последващо изграждане на онтологичния модел, семантичната архитектура и интелигентните аналитични функции.

2. Разработен е унифициран семантичен модел на система за енергиен мениджмънт под формата на OWL онтология (Web език за онтологии), съгласно изискванията на стандартите ISO 50001, IEC 62264 и онтологиите SOSA/SSN (онтология за сензори, наблюдения, проби и изпълнителни механизми/семантична сензорна мрежа) (3 глава).

Разработен е TBox модел, включващ класове, обектни свойства, свойства тип данни и логически ограничения. Той осигурява семантична основа за проверка на съгласуваността, автоматизиран логически извод и структурирано представяне на връзките между управленските, производствените и измервателните елементи на системата.

Разработен е ABox модел, който показва как концептуалният модел се свързва с конкретни данни за реално предприятие (конкретни производствени комплекси, цехове, оборудване, електромери, трансформатори, базови линии, EnPI стойности и измервания), което превръща онтологията от теоретичен модел в оперативен семантичен слой.

Извършеното съгласуване с онтологията OntoMES, SOSA/SSN и IEC 62264 позволява обединяване на производствената структура, измервателната инфраструктура и системата за енергиен мениджмънт в единен граф от знания. Това създава предпоставки за семантично търсене, проследимост, автоматизирано откриване на отклонения и анализ на енергийната резултатност.

3. Разработеният в 3 глава модел е надграден до многослойна семантична архитектура, която осигурява интеграция между индустриални устройства, IIoT, OPC UA, IEC 62264, ISO 50001, RDF/OWL технологии на графа от знания и разработените онтологии OntoMES и OntoEnMS (4 глава). Моделът включва: слой на устройствата (IIoT Edge Devices and Sensors), комуникационен слой (OPC UA Middleware Layer), слой за оперативно и енергийно управление (MES/EnMS Layer), слой за семантична интеграция (Semantic Integration Layer), слой на графа от знания (Knowledge Graph Layer) и корпоративен аналитичен слой (Enterprise & Analytics Layer). Всеки слой изпълнява специфични функционалности, свързани със: събиране на данни, комуникация, семантична интеграция, логическо извеждане, анализи, AI-базирано управление, оперативна оптимизация. Съществен елемент от тази архитектура е разработеният комуникационния междинен софтуер (middleware) за автоматизирано преобразуване между OWL онтологии и OPC UA информационни модели. OPC UA middleware осигурява техническо свързване и стандартизиран обмен на данни; семантичният слой извършва аотиране, RDF/OWL преобразуване и съгласуване с онтологиите; графът от знания съхранява семантично обогатените данни, връзките и извлечените знания за SPARQL заявки, логически извод и интелигентен анализ. Междинният софтуер реализира двупосочна трансформация, синхронизация и семантично съгласуване между индустриалните данни и инфраструктурата на графа от знания. Предложеният OPC UA слой на междинния софтуер изпълнява изискванията за изграждане на семантично интегрирана Industry 4.0 инфраструктура, позволяваща оперативна съвместимост, мониторинг в реално време, онтологично базирано логическо извеждане, AI-базиран анализ и интелигентно управление на производствени и енергийни процеси.
4. Разработеният подход е приложен към предприятие за добив на цветни метали като е

потвърдена практическата приложимост на предложения подход. Избрани са базови енергийни линии и индикатори по комплекси и цехове. Тези стойности осигуряват количествена основа за оценяване на енергийните характеристики, сравнение с референтни стойности и идентифициране на значими енергийни разходи. Физическите измервателни устройства, електромерите, трансформаторите, производствените единици и цеховете, моделирани в ABox слоя, се разглеждат като източници на оперативни, енергийни и измервателни данни. Чрез архитектурните слоеве тези данни се трансформират от първични измервания и OPC UA информационни обекти в семантично анотирани RDF/OWL представяния и впоследствие в граф от знания, използван за анализ на енергийните показатели и подпомагане на вземането на решения.

5. Предложени са методи за онтологично базиран мониторинг, който надгражда семантичната архитектура с оперативни функции за събиране, контекстуализиране, анализ и визуализация на енергийни данни в индустриални предприятия, включително анализ на EnPI (показател за енергийни характеристики), мониторинг на качеството на електроенергията, хибридни методи за откриване на аномалии, семантично откриване на аномалии и използване на SWRL правила (език за правила в семантичната мрежа) и граф от знания (5 глава). Тези методи позволяват мониторинг в реално време на основните показатели за качеството на електроенергията: напрежение, ток, честота, активна и реактивна мощност, фактор на мощността $\cos \phi$, хармонични изкривявания (THD-Total Harmonic Distortion), прекъсвания, бързи преходни процеси, товарови графици и EnPI (показател за енергийни характеристики). Интеграцията между измервателната инфраструктура и онтологичния модел осигурява автоматизирано откриване на отклонения, контекстна интерпретация и генериране на препоръки.
6. Разработен е интелигентен подход за подпомагане на вземането на решения при управление на реактивната мощност и оптимизация на енергийните процеси. Установено е, че е необходимо адаптивно управление с отчитане на текущата активна и реактивна мощност, фактора на мощността и допустимите граници на работа. Това обуславя използването на метаевристичен оптимизационен алгоритъм, базиран на интелигентността на рояците (6 глава). Предложено е прилагане на GOA (Grasshopper Optimization Algorithm) - алгоритъм за оптимизация, който моделира колективното поведение на скакалците при търсене на храна като използва взаимодействия между индивидите в популацията и постепенно насочване към най-доброто намерено решение. Алгоритъмът позволява търсене на близки до оптималните решения при наличие на много променливи и ограничения. Резултатът от това управление е поддържане на $\cos \phi$ в допустим диапазон, намаляване на преноса на реактивна мощност, ограничаване на загубите в кабелните линии и избягване на нежелани режими на свръхкомпенсация. Получените от експерименталния анализ стойности – намаляване на загубите от пренос с около 83,4 MWh годишно и собствени загуби в кондензаторните уредби около 43,8 MWh годишно показват, че режимът на управление има съществено значение за енергийния и икономически ефект на конкретното предприятие.

В дисертацията е изпълнена поставената цел за реализиране на оперативна съвместимост между системите за енергиен мениджмънт, индустриалните информационни системи и измервателната инфраструктура в съответствие със стандартите ISO 50001, IEC 62264 и съвременните концепции на Industry 4.0 и 5.0.

Получените резултати показват, че предложеният подход създава цялостна методологична, семантична, архитектурна и алгоритмична основа за разработване на интелигентна система за енергиен мениджмънт. Той осигурява преход от традиционен

мониторинг на енергопотреблението към интелигентно, контекстно ориентирано и оптимизационно подпомагано управление на енергийните процеси.

Дисертационният труд съдържа научни и научно-приложни резултати, които представляват оригинален принос в науката. Кандидатът притежава задълбочени теоретични знания по специалността „Системи с изкуствен интелект“ и способност за самостоятелни изследвания в изпълнение на чл.11 (1) от Правилника за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в ХТМУ.

5. Мнение за публикациите на дисертанта по темата на дисертационния труд

Съгласно чл.11 (4) от ППНСЗАД в ХТМУ дисертационният труд трябва да се основава най-малко на 1 научна публикация с импакт фактор или на две научни публикации в специализирани научни издания без импакт фактор или на 3 научни публикации в доклади на международни научни форуми, отпечатани в пълен текст в сборници с редактор. Докторантката изпълнява това изискване на Правилника като представя 4 научни публикации, публикувани в нереферирани сборници с редактор. Три от публикациите са в съавторство с научния ръководител и една е самостоятелна (№4). Всички публикации са изнесени доклади на международни и национални конференции/симпозиуми в България, с което се обсъждат и популяризират изследванията в дисертацията извън ХТМУ. Списъкът публикации съдържа 4 публикации, от които отчитам три (от №2 до №4 от списъка публикации). Публикация №1 не е представена с пълен текст и не я приемам.

Публикация №2 от списъка с публикации е посветена на подобряване на системите за енергиен мениджмънт с използване на индустриален интернет на нещата. Обобщени са основните предимства от използването на нова рамка и технологии, базирани на индустриалния интернет на нещата, които са свързани с фиксиране и редуциране на източниците за енергийни загуби, подобряване на планирането на енергийните разходи и намаляване на тяхната цена. Докладът представя резултати от Глави 5 и 6 от дисертацията

Публикация №3 от списъка с публикации представя подход за мониторинг и за анализ на данни за качество на потребяваната електроенергия в предприятие от цветната металургия с цел оптимално управление на реактивната мощност. Докладът представя резултати от Глава 5 от дисертацията.

В публикация №4 от списъка с публикации е представена система за мониторинг, която е основна структура в системите за енергиен мениджмънт като специално внимание е отделено на измерваните и анализирани величини (Глава 5 от дисертацията). Представен е анализ на основни показатели на потребявана електроенергия на голямо предприятие, свързани с оптимизиране на реактивната енергия и повишаване на енергийната ефективност. Статията е отличена с първа награда на XX национална младежка научно-практическа конференция 2023, организирана от ФНТС.

Всички публикации отразяват резултати от изследвания по дисертацията, с което се изпълнява чл.11 (4) от ППНСЗАД в ХТМУ.

6. Критични бележки и коментари

Списъкът публикации съдържа 4 публикации, докато приложените пълни текстове на публикации са шест. Публикация №1 не е представена с пълен текст, поради което не я

отчитам. С трите публикации докторантката удовлетворява изискванията на чл.11 (4) от ППНСЗД в ХТМУ. Би трябвало да се представят пълните текстове на докладите от списъка с публикации, а в отделна директория, например „Други публикации, свързани с дисертацията“ може да се поместят допълнителни публикации, извън тези, участващи в процедурата.

Структурирането на дисертацията, стилът, оформлението и илюстрациите са добре представени и улесняват рецензирането, но изложението би трябвало да се съкрати.

Формулираните от докторантката приноси би трябвало да се обобщат.

Има липси на описание на съкращения (ПИПД, стр.29; DAC, стр.50; OT, RFID стр.51, SWRL стр.62 и др.)

Препоръката към докторантката е да продължи изследванията в избраната посока и да публикува резултатите в престижни издания.

Направените бележки не омаловажават получените резултати от изследванията по дисертацията.

7. Лични впечатления за дисертанта

Не познавам докторантката преди запознаването с материалите по процедурата. Считам, че работата е много добра в теоретично и приложно направление.

8. Заключение

Дисертацията на маг. Полина Красиминова Кесова отговаря на условията на ЗРАСРБ и ППЗРАСРБ. Дисертационният труд съдържа научни, научно-приложни и приложни резултати с иновативен характер. Те имат оригинален принос в науката, които **оценявам положително**. Поставената цел на дисертационната работа е изпълнена. Кандидатката притежава задълбочени знания по изследваната тематика. Тя демонстрира способност за самостоятелни изследвания и успешно изпълнение на решаваните проблеми. **Убедено препоръчвам на Уважаемото научно жури присъждане на образователната и научна степен „доктор“ на маг. Полина Красиминова Кесова** в област на висше образование 5. Технически науки, професионално направление 5.2. Електротехника, електроника и автоматика, докторска програма „Системи с изкуствен интелект“.

Дата: 02.09.2026

Изготвил:

/проф. дтн. Красимира Стоилова/

Институт по информационни и комуникационни технологии - БАН