



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЧНО И СИСТЕМНО ИНЖЕНЕРСТВО

КАТЕДРА „АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ПРОИЗВОДСТВОТО”

Маг. инж. Полина Красиминова Кесова

РАЗРАБОТКА НА ИНТЕЛИГЕНТНА СИСТЕМА ЗА ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор”
по научна специалност 5.2. Електротехника, електроника и автоматика
(Системи с изкуствен интелект)

Научен ръководител: проф. д-р инж. Идилия Бачкова

Научно жури:

1. доц. д-р Пламен Василев, ХТМУ - София – председател и рецензент
2. проф. д-р Идилия Бачкова, ХТМУ - София
3. проф. д-тн. Красимира Стоилова, ИИКТ на БАН- рецензент
4. проф. д-р Галина Николчева, ТУ - София
5. доц. д-р Григор Стамболов, ТУ - София

София, 2026

Дисертационният труд е написан на 227 страници, съдържа 65 фигури и 17 таблици. Цитирани са 149 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на разширен Катедрен съвет на научното звено на катедра „Автоматизация на производството”, състояло се на 03.07.2026 година

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 24.09.2026 г. от 10.⁰⁰ часа в зала 301, сграда „А” на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересувашите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности”, стая 406, етаж 4, сграда „А” на ХТМУ.

Благодарност

„Този автореферат и дисертационен труд са резултат от дългогодишни усилия, които нямаше да бъдат възможни без подкрепата на много хора.

Изключително съм благодарна на моя научен ръководител, проф. Идилия Бачкова , която повярва в мен, насочваше ме в трудните моменти и ме научи на научна строгост и прецизност.

Искам да изразя своята дълбока признателност и към проф. Коста Бошнаков. Благодаря Ви за безценната подкрепа.

Изразявам уважение и благодарност и към уважаемите членове на научното жури и рецензентите. Вашето ценно време, обективен поглед и висок професионализъм помогнаха този труд да придобие своя завършен вид.

Накрая, но най-близо до сърцето ми, благодаря на моето семейство и най-близките ми хора. Тяхното разбиране и вяра в мен бяха моята най-голяма мотивация.”

СЪДЪРЖАНИЕ

СПИСЪК НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ СЪКРАЩЕНИЯ И ОЗНАЧЕНИЯ.....	6
УВОД.....	8
ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	9
Актуалност на темата.....	9
Обект и предмет на изследването	10
Цел и задачи на дисертационния труд.....	10
Методи и средства на изследването	11
Структура и обем.....	11
КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	11
ПЪРВА ГЛАВА. ОБЗОР НА СИСТЕМИТЕ ЗА ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ – МЕТОДИ И СРЕДСТВА	11
Стандарти за енергиен мениджмънт и установени ограничения	12
Референтни архитектури, информационни модели и онтологии	12
Изкуствен интелект и Индустриален интернет на нещата	13
Изводи от Първа глава	13
ВТОРА ГЛАВА. ИНТЕЛИГЕНТЕН ПОДХОД ЗА РАЗРАБОТКА НА УМНИ СИСТЕМИ ЗА ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ.....	14
Хибридна семантично-оптимизационна концепция	14
Шестетапна методологична рамка.....	16
Изисквания към интелигентната EnMS.....	17
Представяне на енергията в IEC 62264 и съгласуване със SOSA/SSN	18
Изводи от Втора глава.....	19
ТРЕТА ГЛАВА. СЪЗДАВАНЕ НА ОНТОЛОГИЯ НА СИСТЕМА ЗА ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ, БАЗИРАНА НА ISO 50001	20
Методология за разработка на онтологията.....	20
TBox и ABox на онтологията ontoEnMS	22
Семантично съгласуване с OntoMES и SOSA/SSN	23
Приложение в предприятие за добив на цветни метали.....	23
Валидация на онтологията.....	24
Изводи от Трета глава	24
ЧЕТВЪРТА ГЛАВА. ОНТОЛОГИЧНО БАЗИРАНА СЕМАНТИЧНА АРХИТЕКТУРА ЗА ИНТЕЛИГЕНТЕН ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ	25

Многослойна архитектура	25
Поток на данните и граф от знания	27
Двупосочен OWL ↔ OPC UA междинен софтуер	27
Изводи от Четвърта глава	29
ПЕТА ГЛАВА. ОНТОЛОГИЧНО БАЗИРАН МОНИТОРИНГ И ИНТЕЛИГЕНТЕН АНАЛИЗ.....	30
Архитектура на мониторинга и семантично моделиране.....	30
Мониторинг на показателите за качество на електроенергията	32
Интелигентен анализ и семантично базирано откриване на аномалии	34
Изводи от Пета глава.....	36
ШЕСТА ГЛАВА. ИНТЕЛИГЕНТЕН МЕТОД ЗА ВЗЕМАНЕ НА РЕШЕНИЕ В СИСТЕМИТЕ ЗА ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ	37
Алгоритъм за оптимизация чрез скакалци.....	37
Анализ на реактивната мощност и фактора на мощността	38
Формулиране и решение на оптимизационната задача	41
Изводи от Шеста глава.....	41
ОБЩИ ИЗВОДИ.....	43
ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА	45
I. Научни приноси.....	45
II. Научно-приложни приноси.....	47
III. Приложни приноси.....	48
ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	49
Участие в научни постерни сесии.....	49
АПРОБАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50

СПИСЪК НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ СЪКРАЩЕНИЯ И ОЗНАЧЕНИЯ

Съкращение	Наименование на английски	Наименование на български
ABox	Assertional Box	фактологична част на онтологията (индивиди и факти)
AI	Artificial Intelligence	изкуствен интелект
BI	Business Intelligence	бизнес анализ / бизнес интелигентност
DL	Description Logic	дескриптивна логика
EN	European Standard	европейски стандарт
EnB	Energy Baseline	базова енергийна линия
EnMS	Energy Management System	система за енергиен мениджмънт
EnPI	Energy Performance Indicator	показател за енергийни характеристики
ERP	Enterprise Resource Planning	планиране на ресурсите на предприятието
GOA	Grasshopper Optimization Algorithm	алгоритъм за оптимизация чрез скакалци
IEC	International Electrotechnical Commission	Международна електротехническа комисия
IIoT	Industrial Internet of Things	индустриален интернет на нещата
IIRA	Industrial Internet Reference Architecture	референтна архитектура на индустриалния интернет
IoT	Internet of Things	интернет на нещата
ISA-95	International Society of Automation Standard 95	стандартен модел за интеграция на производствените и бизнес системите
ISO	International Organization for Standardization	Международна организация по стандартизация
KG	Knowledge Graph	граф от знания
KPI	Key Performance Indicator	ключов показател за ефективност
MATLAB	Matrix Laboratory	програмна среда за числени изчисления и моделиране
MES	Manufacturing Execution System	система за оперативно управление на производството
ML	Machine Learning	машинно обучение
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport	протокол за обмен на телеметрични съобщения
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture	унифицирана архитектура за комуникации с отворена платформа
OWL	Web Ontology Language	уеб език за онтологии

PDCA	Plan–Do–Check–Act	планиране–изпълнение– проверка–действие
PLC	Programmable Logic Controller	програмируем логически контролер
RAMI 4.0	Reference Architectural Model Industrie 4.0	референтен архитектурен модел за Индустрия 4.0
RDF	Resource Description Framework	рамка за описание на ресурси
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	супервайзерно управление и събиране на данни
SEU	Significant Energy Use	значимо енергийно потребление
SGAM	Smart Grid Architecture Model	архитектурен модел на интелигентните електроенергийни мрежи
SHACL	Shapes Constraint Language	език за ограничения на RDF графи
SOSA	Sensor, Observation, Sample, and Actuator	онтология за сензори, наблюдения, проби и изпълнителни механизми
SPARQL	SPARQL Protocol and RDF Query Language	протокол и език за заявки към RDF
SSN	Semantic Sensor Network	семантична сензорна мрежа
SWRL	Semantic Web Rule Language	език за правила в семантичната мрежа
SysML	Systems Modeling Language	език за системно моделиране
TBox	Terminological Box	терминологична част на онтологията
THD	Total Harmonic Distortion	общ коефициент на хармонични изкривявания
cos φ	Power factor	фактор на мощността
kV	kilovolt	киловолт
kVAr	kilovolt-ampere reactive	киловолт-ампер реактивен
kW	kilowatt	киловат
kWh	kilowatt-hour	киловатчас
ГПП	—	главна подстанция

УВОД

Съвременната индустрия преминава през дълбока технологична трансформация, свързана с развитието на концепцията Industry 4.0, която интегрира цифрови технологии с физическите производствени системи. Тази парадигма се основава на използването на киберфизически системи, интернет на нещата (Internet of Things – IoT), изкуствен интелект (Artificial Intelligence – AI), анализ на големи данни и съвременни средства за автоматизация. В резултат се създават интелигентни производствени среди, в които машините, устройствата, сензорите и информационните системи са взаимосвързани и обменят данни в реално време. Това позволява непрекъснат мониторинг на производствените процеси, адаптивно управление и вземане на решения, основани на данни.

Следващ етап в развитието на индустриалните технологии се свързва с концепцията Industry 5.0, която допълва принципите на цифровизацията с по-силен акцент върху устойчивостта, гъвкавостта и взаимодействието между човек и машина. Този подход насърчава създаването на интелигентни производствени системи, които съчетават технологичния прогрес с устойчиво използване на ресурсите и повишаване на социалната отговорност на индустрията.

В контекста на тези технологични трансформации енергийният мениджмънт се превръща в ключов фактор за повишаване на ефективността и устойчивостта на индустриалните предприятия. Енергията представлява един от основните производствени ресурси, а нейното ефективно управление оказва пряко влияние върху икономическите резултати на предприятията, тяхната конкурентоспособност и екологичния им отпечатък. Поради това разработването и внедряването на системи за енергиен мениджмънт (Energy Management Systems – EnMS) се утвърждава като важен инструмент за оптимизация на енергопотреблението, намаляване на оперативните разходи и ограничаване на негативното въздействие върху околната среда.

Системите за енергиен мениджмънт представляват интегрирана рамка от организационни, информационни и технически средства, предназначени за системно наблюдение, анализ и управление на енергийните потоци в организацията. Те подпомагат идентифицирането на значимите енергийни потребители, оценката на енергийната ефективност на технологичните процеси и разработването на мерки за подобряване на енергийните характеристики на предприятията. Внедряването на EnMS позволява не само намаляване на енергийните разходи, но и по-добро планиране на производствените процеси, повишаване на надеждността на оборудването и подобряване на устойчивостта на индустриалните системи.

Съвременните системи за енергиен мениджмънт все по-често се основават на използването на технологии от областта на изкуствения интелект, машинното обучение, Интернет на нещата и анализ на големи данни. Тези технологии позволяват автоматизирано събиране и обработка на големи обеми от енергийни данни, прогнозиране на потреблението на енергия, оптимизация на енергийните потоци и интелигентно подпомагане вземането на управленски решения. В резултат се създават

ново поколение интелигентни/умни системи за енергиен мениджмънт, които осигуряват по-висока степен на автоматизация и адаптивност на управлението на енергията.

Въпреки значителния напредък в тази област, разработването на ефективни интелигентни системи за енергиен мениджмънт в индустриална среда остава предизвикателство. Основните трудности са свързани с интеграцията на разнородни информационни системи, обработката на големи обеми данни, осигуряването на оперативна съвместимост между различните технологични платформи и разработването на интелигентни алгоритми за оптимизация на енергийните процеси.

В този контекст предмет на изследване в настоящия дисертационен труд са актуални научни и приложни проблеми, свързани с разработката на интелигентни/умни системи за енергиен мениджмънт в индустриални предприятия. Особено внимание се отделя на използването на съвременни информационни технологии, онтологични модели, методи на изкуствения интелект и индустриалния интернет на нещата за изграждане на интелигентни архитектури за управление на енергията.

Разработването на такива системи има съществено значение за повишаване на енергийната ефективност на индустриалните предприятия, за намаляване на производствените разходи и за постигане на устойчиво индустриално развитие.

Разработката се фокусира върху индустриалните системи за енергиен мениджмънт, при които е необходимо едновременно да се обхванат организационните изисквания на ISO 50001, производственият контекст, измервателната инфраструктура, качеството на електроенергията и интелигентното подпомагане на решенията. Основната идея е енергийните данни да бъдат превърнати от отделни числови записи в свързано, контекстно и машинно интерпретируемо знание.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на темата

Актуалността на дисертационния труд се определя от нарастващата роля на енергийната ефективност, устойчивостта и цифровата трансформация в индустриалните предприятия. Съвременните EnMS трябва не само да измерват и визуализират потреблението, а да свързват енергийните характеристики с производствените процеси, оборудването, технологичните режими и управленските цели. Това изисква интеграция на стандарти, IoT, индустриални комуникации, онтологии, графи от знания и методи на изкуствения интелект.

Съществуващите стандарти от серията ISO 50000 предоставят надеждна методологична рамка за управление, измерване и подобряване на енергийните характеристики, но не определят формален семантичен модел, механизми за логически извод и средства за AI-базирана оптимизация. В индустриалната практика допълнителен проблем е хетерогенността на SCADA, MES, EnMS, електромери, анализатори, PLC и корпоративни информационни системи. Поради това оперативната съвместимост на синтактично ниво не е достатъчна; необходима е и семантична съвместимост.

Избраната приложна област – предприятие за добив и преработка на цветни метали – се характеризира с висока енергийна интензивност, сложна производствена структура и значими реактивни товари. Тя предоставя подходяща среда за валидация на онтологичните, архитектурните, аналитичните и оптимизационните решения.

Обект и предмет на изследването

Обект на изследването са енергийните процеси, производствената и измервателната инфраструктура и информационните потоци в индустриални предприятия.

Предмет на изследването са методите, моделите, онтологиите, архитектурните решения и интелигентните алгоритми за разработване на семантично интегрирана система за енергиен мениджмънт, която осигурява мониторинг, анализ, диагностика и оптимизация.

Цел и задачи на дисертационния труд

Основната цел на настоящия дисертационен труд е разработването на интелигентен семантично ориентиран подход и хибридна AI-базирана архитектура 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.

Предложеният подход е насочен към 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 Industry 5.0.

1. Да се извърши анализ на съществуващите системи за енергиен мениджмънт, приложимите стандарти, референтни архитектури, онтологични модели, AI методи и IIoT технологии с цел идентифициране на техните предимства, ограничения и възможности за интелигентна интеграция.
2. Да се разработи методологична рамка за изграждане на интелигентна система за енергиен мениджмънт, базирана на семантични технологии, стандартизация и AI-базиран анализ.
3. Да се разработи унифициран семантичен модел на система за енергиен мениджмънт под формата на OWL онтология, базирана на ISO 50001, IEC 62264 и онтологиите SOSA/SSN.
4. Да се реализира семантично съгласуване и интеграция между енергийните, производствените и измервателните данни чрез използване на онтологии, технологии на графа от знания и механизми за оперативна съвместимост.
5. Да се разработи онтологично базирана IIoT архитектура за интелигентен енергиен мениджмънт, интегрираща OPC UA, OWL модели, графи от знания и индустриални информационни системи.

6. Да се разработят методи за онтологично базиран мониторинг и интелигентен анализ на енергийни данни, включително анализ на EnPI, мониторинг на качеството на електроенергията, семантично откриване на аномалии и използване на SWRL правила и граф от знания.
7. Да се разработи интелигентен метод за подпомагане на вземането на решения и оптимизация на енергийните процеси чрез използване на методи на изчислителен интелект и алгоритми, базирани на интелигентността на рояците.
8. Да се реализира експериментална апробация и валидация на предложения подход в индустриално предприятие с цел оценка на приложимостта, оперативната съвместимост и ефективността на разработената интелигентна система за енергиен мениджмънт.

Методи и средства на изследването

Използвани са 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; метавристична 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.

Структура и обем

Дисертационният труд съдържа въведение, шест глави, общи изводи, приноси, списък на публикациите и библиография. Първа глава определя научния контекст и изследователския дефицит. Втора глава разработва хибридна семантично-оптимизационна концепция и шестетапния метод. Трета глава създава ISO 50001-базирана онтология и я прилага към индустриален казус. Четвърта глава изгражда многослойната семантична архитектура и двупосочния OWL ↔ OPC UA междинен софтуер. Пета глава разработва онтологично базиран мониторинг, интелигентен анализ и откриване на аномалии. Шеста глава предлага GOA-базиран метод за оптимизация на реактивната мощност и компенсацията на cos φ.

КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ПЪРВА ГЛАВА. ОБЗОР НА СИСТЕМИТЕ ЗА ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ – МЕТОДИ И СРЕДСТВА

В Първа глава е извършен обзор на индустриалните системи за енергиен мениджмънт, нормативните стандарти, референтните архитектури, онтологиите, методите на изкуствения интелект и IIoT технологиите. Анализът проследява прехода от

традиционни системи за отчитане и мониторинг към интелигентни платформи, способни да извършват контекстно-зависим анализ, прогнозиране и оптимизация.

Стандарти за енергиен мениджмънт и установени ограничения

ISO 50001 дефинира системна рамка за енергийна политика, планиране, изпълнение, проверка и непрекъснато подобрене чрез цикъла PDCA. ISO 50006 регламентира енергийните базови линии и показателите за енергийна ефективност; ISO 50015 – измерването и верификацията; ISO 50047 – определянето на енергийни спестявания. EN 50160 и IEC 61000-4-30 задават съответно характеристиките и методите за измерване на качеството на електроенергията. Съпоставката между обхвата на стандартите и установените ограничения е представена в Таблица 1.

Таблица 1. Сравнителен анализ на основните стандарти и ограниченията им

Стандарт	Основен фокус	Ключово ограничение за интелигентна EnMS
ISO 50001	Рамка за EnMS	Не дефинира семантична оперативна съвместимост
ISO 50006	EnPI и EnB	Не включва AI анализ и логически извод
ISO 50015	Измерване и верификация	Не моделира контекста и знанията
EN 50160	Характеристики на напрежението	Не осигурява семантична интеграция
IEC 61000-4-30	Методи за измерване	Не дефинира AI-базирана диагностика

Установено е, 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. Оттук произтича необходимостта от онтологично представяне и граф от знания.

Референтни архитектури, информационни модели и онтологии

Анализирани са SGAM, RAMI 4.0, IIRA, OPC UA и референтният модел ISA-95/IEC 62264. Общата тенденция е към многослойна интеграция на физически устройства, комуникационни услуги, информационни модели, аналитични приложения и корпоративно управление. IEC 62264 е особено важен за свързване на енергийния и производствения контекст, тъй като дефинира модели на оборудване, материали, операции, способности и производствена ефективност.

Онтологиите се разглеждат като основен инструмент на символния изкуствен интелект. Те формализират класове, свойства, ограничения и правила и позволяват автоматизирана проверка на съгласуваността и извеждане на нови знания. За сензорните наблюдения са

анализирани SOSA/SSN, а за производствените структури – OntoMES и моделите на IEC 62264.

Изкуствен интелект и Индустриален интернет на нещата

Методите на AI и ML в EnMS се използват за прогнозиране на потреблението, откриване на аномалии, диагностика, класификация на режими и оптимизация. Анализът на алгоритмите от областта на интелигентността на рояците показва, че те са подходящи за нелинейни и многокритериални задачи с дискретни ограничения. ПоТ осигурява потока от данни в реално време, а OPC UA – стандартизирана комуникация и информационно моделиране.

Основният изследователски дефицит е липсата на цялостен подход, който едновременно да интегрира ISO 50001, производствените модели, измервателния контекст, онтологиите, графите от знания, индустриалната комуникация и оптимизационните алгоритми. Това определя насоката на дисертационната разработка.

Изводи от Първа глава

1. Анализът показва, че съвременните системи за енергиен мениджмънт се развиват в посока към изграждане на интелигентни, свързани и адаптивни платформи, използващи технологии от областта на IoT, изкуствения интелект, анализа на големи данни и облачните изчисления. Основна тенденция е интеграцията на енергийния мониторинг с производствените информационни системи, SCADA, MES и ПоТ платформи с цел реализиране на интелигентен анализ и оптимизация на енергийните процеси.
2. Извършеният обзор на стандартите от семейството ISO 50000 показва, че съществуващите подходи осигуряват методологична основа за мониторинг, измерване, анализ и непрекъснато подобряване на енергийните характеристики. Въпреки това стандартите са ориентирани предимно към организационни и измервателни аспекти на енергийния мениджмънт и не предоставят механизми за семантична оперативна съвместимост, онтологично моделиране, интеграция на графа от знания и AI-базиран интелигентен анализ на енергийни данни.
3. Анализът на съществуващите референтни архитектури и информационни модели показва наличие на значителна хетерогенност при представянето и обmena на енергийни данни, както и ограничена възможност за семантична интеграция между индустриални системи, измервателна инфраструктура и интелигентни аналитични приложения.
4. Изследването на прилагането на онтологиите в системите за енергиен мениджмънт показва, че онтологичните модели предоставят ефективен механизъм за формализиране на знания, семантично описание на енергийните процеси и реализиране на оперативна съвместимост между хетерогенни системи. Особено перспективни са подходите, базирани на OWL онтологии, графи от знания и семантични технологии.

5. Анализът на методите на изкуствения интелект показва, че съвременните EnMS все по-често използват AI-базирани подходи за прогнозиране, диагностика, откриване на аномалии и оптимизация на енергийните характеристики. Наред с това методите на изчислителния интелект и интелигентността на рояците предоставят възможност за реализиране на адаптивни оптимизационни алгоритми при управление на енергийните процеси.
6. Това определя насоката на настоящия дисертационен труд, свързана с разработването на хибридна семантично-оптимизационна AI архитектура за интелигентен енергиен мениджмънт в индустриална среда.

ВТОРА ГЛАВА. ИНТЕЛИГЕНТЕН ПОДХОД ЗА РАЗРАБОТКА НА УМНИ СИСТЕМИ ЗА ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ

Хибридна семантично-оптимизационна концепция

Предложеният подход за интелигентен енергиен мениджмънт се основава на хибридна AI концепция, илюстрирана на фиг.1. Тя интегрира символен изкуствен интелект, семантични технологии, онтологично моделиране, графи от знания и методи на изчислителния интелект в единна архитектура за анализ, диагностика и оптимизация на енергийните процеси в индустриална среда.

Необходимостта от хибриден AI подход произтича от факта, 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.

Хибридната концепция комбинира няколко взаимно допълващи се парадигми. Символният AI осигурява формално представяне чрез онтологии, ограничения и правила. Семантичните технологии създават оперативна съвместимост, графите от знания свързват енергийните, производствените и измервателните обекти, а изчислителният интелект подпомага оптимизацията и избора на решения.

В предложения подход взаимодействат три основни слоя: семантичен слой, слой на графа от знания и интелигентен AI слой. Те осигуряват онтологично описание на понятията, съхранение на контекстна информация и използване на SWRL правила, логически извод и AI оптимизация за диагностика, откриване на аномалии и анализ на енергийните показатели.

Основно предимство е свързването на семантичния логически извод с AI оптимизацията. Онтологичният модел предоставя контекст, ограничения и цели, които насочват оптимизационните алгоритми и правят резултатите по-обясними и приложими в реална индустриална среда.

Така концепцията позволява изграждане на адаптивна и обяснима система за енергиен мениджмънт, която обединява анализ, базиран на знания, семантична оперативна съвместимост и оптимизационна интелигентност.

Основните компоненти на хибридната AI концепция и тяхната роля са обобщени в Таблица 2.

Ориентирана към знание основа (Symbolic AI). Онтологии, семантични модели и SWRL правила формализират знанията за енергийни, производствени и измервателни процеси и подпомагат логическия извод.

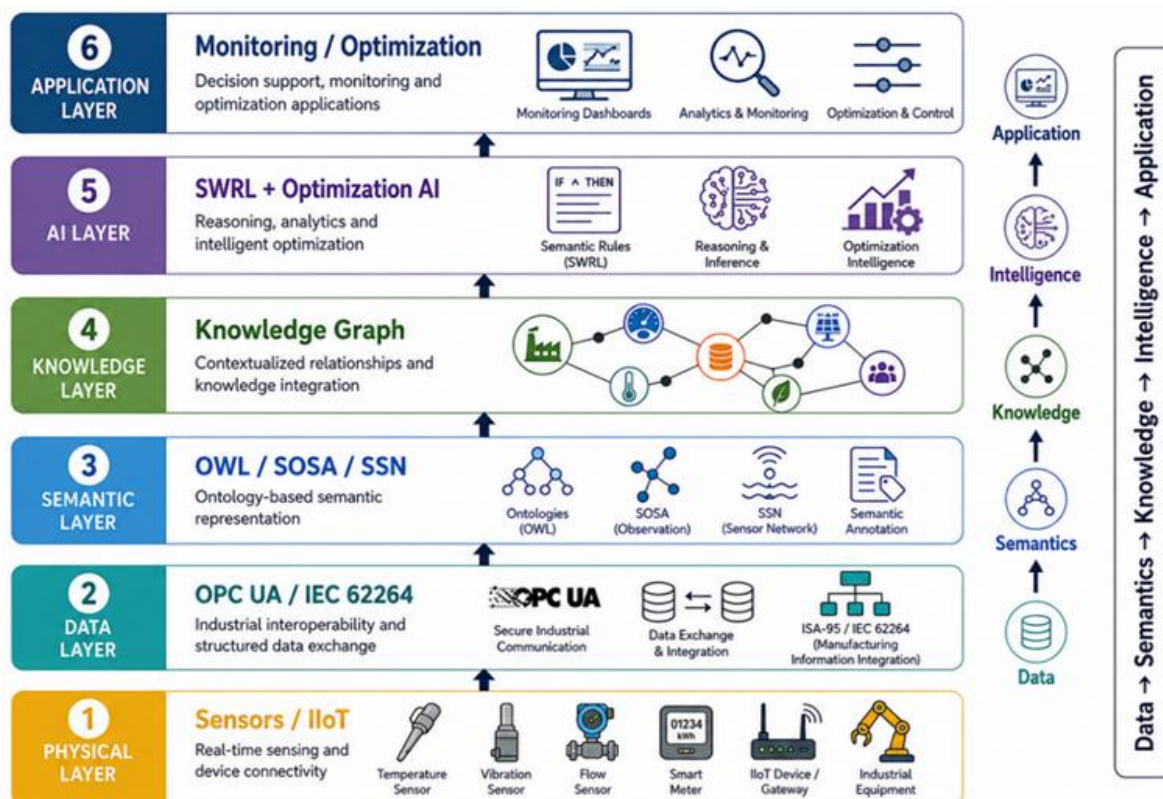
Семантична интелигентност (Semantic AI). Съгласуването на ISO 50001, IEC 62264 и SOSA/SSN осигурява контекстно разбиране и унифицирано представяне на данните.

Граф от знания. Свързва оборудване, процеси, ресурси, измервателни устройства, EnPI и наблюдения, което позволява контекстни заявки и анализ на зависимости.

Изчислителен интелект. Алгоритми като Grasshopper Optimization Algorithm (GOA) се използват за оптимизация на реактивната мощност, минимизиране на загуби и повишаване на енергийната ефективност.

Интеграция между AI компонентите. Семантичният слой предоставя контекст и ограничения на оптимизационните алгоритми, а резултатите се връщат към графа от знания.

Интелигентна обратна връзка. Данните в реално време и историческите данни се използват за актуализиране на знанията, правилата и оптимизационните модели.



Фиг.1. Хибридна семантично-оптимизационна рамка с изкуствен интелект

Таблица 2. Роля на основните компоненти на предложения подход

Компонент	Роля	Резултат
Семантични технологии	Унифицирано описание и обмен	Семантична оперативна съвместимост
Онтологично моделиране	Формализира понятия и ограничения	Структурирано знание
Граф от знания	Свързва енергийни, производствени и измервателни обекти	Контекстен анализ
Символен AI	OWL/SWRL логически извод	Обяснима диагностика
Изчислителен интелект	Оптимизационни и роякови алгоритми	Адаптивни решения
ПoT	Данни от физическите процеси	Мониторинг в реално време

Шестетапна методологична рамка

Предложеният метод структурира разработването на интелигентната EnMS като последователност от шест взаимосвързани етапа. Всеки етап има определени входни данни, методи, резултати и критерии за проверка. Така се преодолява фрагментарното внедряване на отделни технологии и се осигурява проследим път от изискванията към реалната интеграция и валидация. Общата логика на метода е представена на фиг.2, а основните входове, обработки и резултати за отделните етапи са систематизирани в Таблица 3.



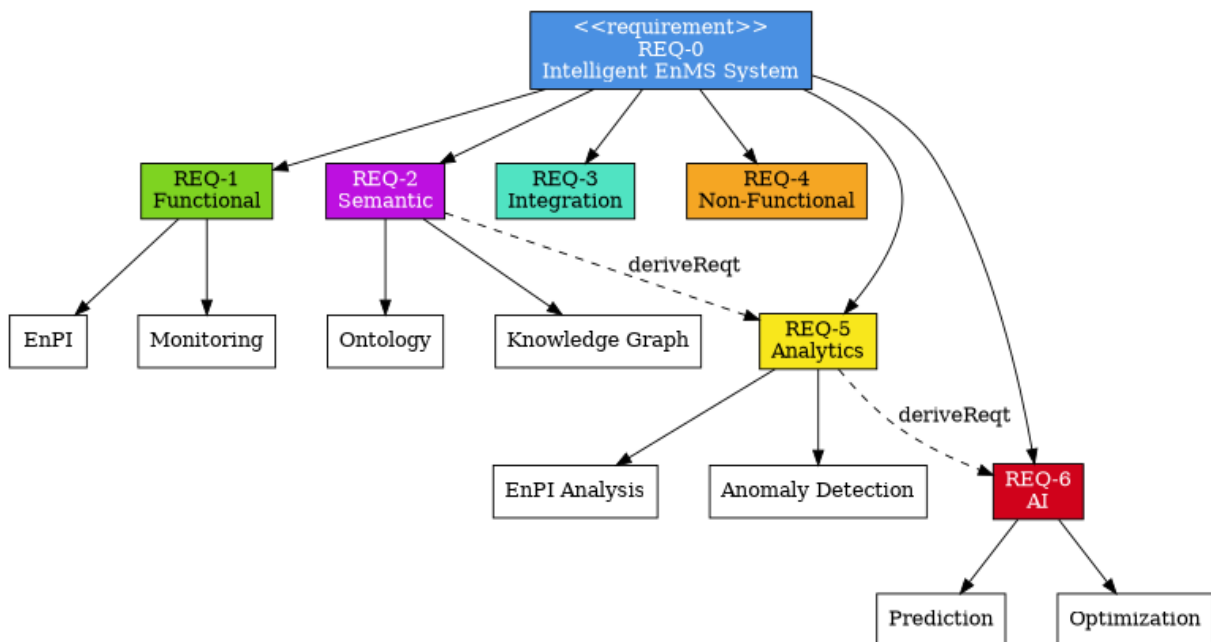
Фиг.2. Методологична рамка за разработка на интелигентна система за енергиен мениджмънт

Таблица 3. Етапи на предложения метод

Етап	Основен вход	Основна обработка	Резултат
1. Планиране	Енергопотребление, структура, цели	Анализ на обхвата и изискванията	Формализирани изисквания
2. Моделиране	Оборудване, процеси, ресурси	IEC 62264 и домейн модел	Структуриран модел
3. Семантична интеграция	Модели и данни	OWL/RDF, съгласуване	Унифициран семантичен модел
4. Системна интеграция	EnMS, MES, SCADA, IoT	OPC UA и преобразуване на данни	Свързана информационна среда
5. Анализ и AI	Текущи и исторически данни	Логически извод, анализ, оптимизация	Препоръки и решения
6. Валидация	Модели и резултати	Синтактична, логическа и експериментална проверка	Потвърдена приложимост

Изисквания към интелигентната EnMS

Изискванията са групирани като функционални, семантични, интеграционни, нефункционални, аналитични и AI изисквания. Функционалните изисквания включват мониторинг, изчисляване на EnPI, управление на EnB и SEU, аларми и отчети. Семантичните изисквания определят еднозначно представяне на обектите и отношенията. Интеграционните изисквания обхващат IEC 62264, OPC UA, MES/ERP и измервателната инфраструктура. Аналитичните и AI изисквания включват диагностика, откриване на аномалии, прогнозиране и оптимизация. Групирането на изискванията е показано на фиг.3, а съответствието между тях и използваните технологични решения е обобщено в Таблица 4.



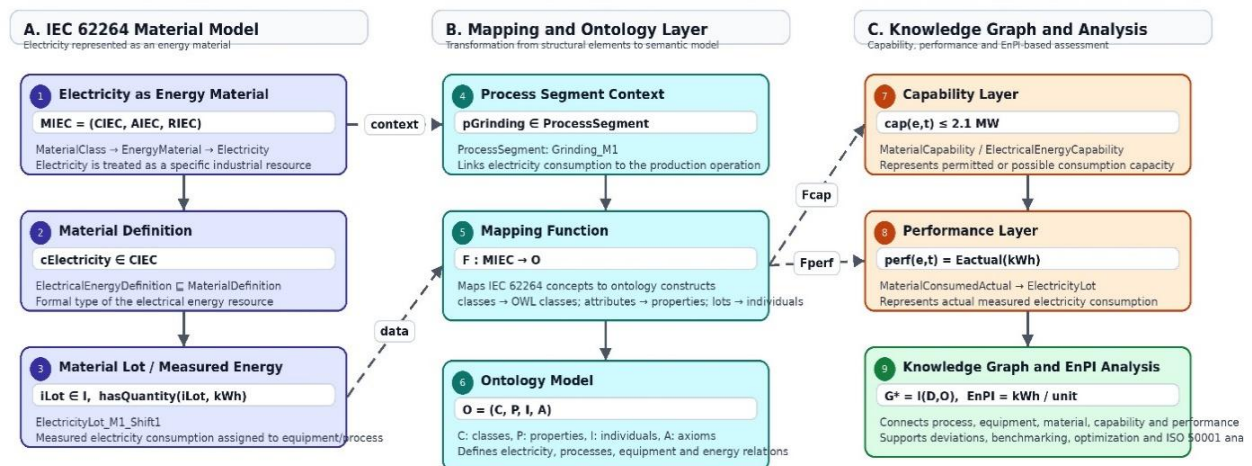
Фиг.3. SysML представяне на изискванията към интелигентната EnMS

Таблица 4. Съответствие между изискванията и технологичните решения

Изискване	Технология или стандарт	Очакван резултат
Мониторинг в реално време	ПоТ, OPC UA, MQTT	Актуални измервателни данни
Семантична интеграция	OWL, RDF, SOSA/SSN	Унифицирано знание
Връзка с производството	IEC 62264, MES/ERP	Производствен контекст
Анализ на EnPI и SEU	ISO 50001, граф от знания	Оценка на ефективността
Откриване на аномалии	SWRL, SHACL, AI	Ранно откриване на отклонения
Прогнозиране и оптимизация	ML и изчислителен интелект	Подпомагане на решенията
Сигурност и мащабируемост	OPC UA Security, edge/cloud	Надеждна експлоатация

Представяне на енергията в IEC 62264 и съгласуване със SOSA/SSN

За интеграцията с производствените системи е предложено енергията да се моделира като специализиран производствен ресурс в рамките на модела на материалите по IEC 62264. Енергийният запис може да бъде представен като MaterialLot с времеви интервал, количество и връзка към оборудване и процесен сегмент. Същият запис се моделира и като sosa:Observation, извършено от конкретен сензор върху наблюдавано свойство. Така едно измерване едновременно принадлежи към производствения, енергийния и измервателния контекст. Формалната последователност за представяне на електроенергията е показана на фиг.4.



Фиг.4. Формален алгоритъм за представяне на електроенергията в IEC 62264

Семантичното съгласуване между IEC 62264, ontoEnMS и SOSA/SSN създава единен граф от знания. Той позволява заявки от типа: коя производствена единица е генерирала измерването; към кой SEU принадлежи; как се съпоставя с EnB; и дали наблюдаваното отклонение изисква управленско действие.

Изводи от Втора глава

1. Във Втора глава е разработена методологична основа за изграждане на интелигентна система за енергиен мениджмънт в индустриална среда. Обоснована е необходимостта от интеграция между семантични технологии, графи от знания, стандартизирани индустриални модели и AI методи.
2. Показано е, че съвременните EnMS трябва да надхвърлят мониторинга и визуализацията, като осигуряват семантична оперативна съвместимост, контекстно описание на данните, логически извод и интелигентна оптимизация.
3. Предложена е хибридна семантично-оптимизационна AI концепция, която обединява символен AI, онтологии, граф от знания, SWRL правила, reasoning и изчислителен интелект.
4. Разработена е шестетапна методологична рамка: планиране, моделиране, семантична интеграция, системна интеграция, анализ и AI, и валидация.
5. Формулирани са основните групи изисквания към интелигентната EnMS — функционални, семантични, интеграционни, нефункционални, аналитични и AI изисквания.
6. Показано е, че ISO 50001 осигурява методологичната основа за енергиен мениджмънт, но за интелигентна реализация е необходимо допълване със стандарти за производствена интеграция, измервания и семантично моделиране.
7. Обосновано е използването на IEC 62264 като основа за свързване на EnMS с производствените системи чрез модели на оборудване, материали, процесни сегменти, capability и performance данни.
8. Аргументирано е семантичното съгласуване между IEC 62264 и SOSA/SSN, чрез което енергийният запис може да се разглежда едновременно като MaterialLot и Observation.
9. Показана е ролята на графа от знания за обединяване на производствени, енергийни и измервателни данни в единна семантична среда.
10. Изведена е необходимостта от интеграция между семантичния и AI слоя, при която онтологиите предоставят контекст и ограничения за анализ, диагностика и оптимизация.
11. Разработената методологична рамка създава предпоставки за последващо изграждане на онтологичния модел, семантичната архитектура и интелигентните аналитични функции.

ТРЕТА ГЛАВА. СЪЗДАВАНЕ НА ОНТОЛОГИЯ НА СИСТЕМА ЗА ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ, БАЗИРАНА НА ISO 50001

Методология за разработка на онтологията

Разработването на онтологията на системата за енергиен мениджмънт е извършено чрез систематизиран подход на онтологичния инженеринг, адаптиран към изискванията на ISO 50001 и към спецификата на индустриалните енергийни данни. Целта е формално представяне на понятията, зависимостите и контролните механизми в EnMS, както и осигуряване на семантична оперативна съвместимост между измервателна инфраструктура, производствени системи и аналитични модули.

Използван е хибриден подход, който комбинира принципи на METHONTOLOGY и NeOn. Подходът е приложен поетапно - от анализ и концептуализация до формализация, съгласуване, валидация и подготовка за повторно използване на модела (фиг.5).



Фиг.5. Методология за разработка на онтологията ontoEnMS

Процесът на разработка на онтологията включва следните основни етапи:

Етап 1: Анализ на предметната област

На този етап е извършен анализ на предметната област, свързана със системите за енергиен мениджмънт, стандартите ISO 50001, ISO 50006, ISO 50015, IEC 62264 и моделите SOSA/SSN. Анализирани са основните процеси, обекти, измервателни величини и зависимости, използвани в управлението на енергията в индустриална среда. Идентифицирани са следните основни понятия: Energy Review, Energy Use, Significant Energy Use (SEU), Energy Performance Indicator (EnPI), Energy Baseline (EnB),

Energy Objective, Energy Target, Metering Point, Energy Measurement, Operational Control, Corrective Action, Continual Improvement.

Етап 2. Концептуализация

На базата на извършения анализ е разработен концептуален модел на онтологията, включващ: класове, йерархии, отношения, свойства, ограничения, семантични зависимости. Концептуализацията е реализирана чрез разделяне между TBox (концептуално ниво) и ABox (ниво на индивидите и данните). TBox моделът описва общите понятия и логически зависимости, докато ABox съдържа конкретни производствени обекти, измервания и енергийни данни.

Етап 3. Формализация

След концептуализацията е извършена формализация на онтологията чрез езика OWL 2 (Web Ontology Language). Формализацията включва дефиниране на: класове, обектни свойства, свойства тип данни, логически ограничения, аксиоми, ограничения върху кардиналността на свойствата, семантични правила.

За представяне на формалната семантика са използвани средства на дескриптивната логика (Description Logic - DL), които позволяват реализиране на автоматизиран логически извод и проверка за семантична съгласуваност. Пример за формално представяне:

`SignificantEnergyUse  $\sqsubseteq$  EnergyUse`

`Class: SignificantEnergyUse`

`SubClassOf: EnergyUse`

Етап 4. Семантично съгласуване и интеграция

За осигуряване на оперативна съвместимост е реализирано съгласуване (alignment) на разработената онтология с OntoMES (IEC 62264) и SOSA/SSN,. Използвани са механизми за семантично съгласуване (semantic mapping), отношения на еквивалентност (equivalence relations), откриване на онтологично съответствие (ontology matching), многократно използване на общи речници. Това позволява интеграция между производствени системи, IoT инфраструктура и системи за енергиен мониторинг.

Етап 5. Валидация на онтологията

Валидацията на онтологията е реализирана чрез проверка за логическа съгласуваност, проверка на класовите зависимости, анализ на ограниченията, тестови семантични заявки, проверка чрез механизми за логически извод. За тази цел могат да бъдат използвани системи за логически извод, като HermiT, Pellet, FaCT++. Валидацията гарантира отсъствие на логически противоречия и коректност на семантичния модел.

Етап 6. Разширяемост и повторно използване

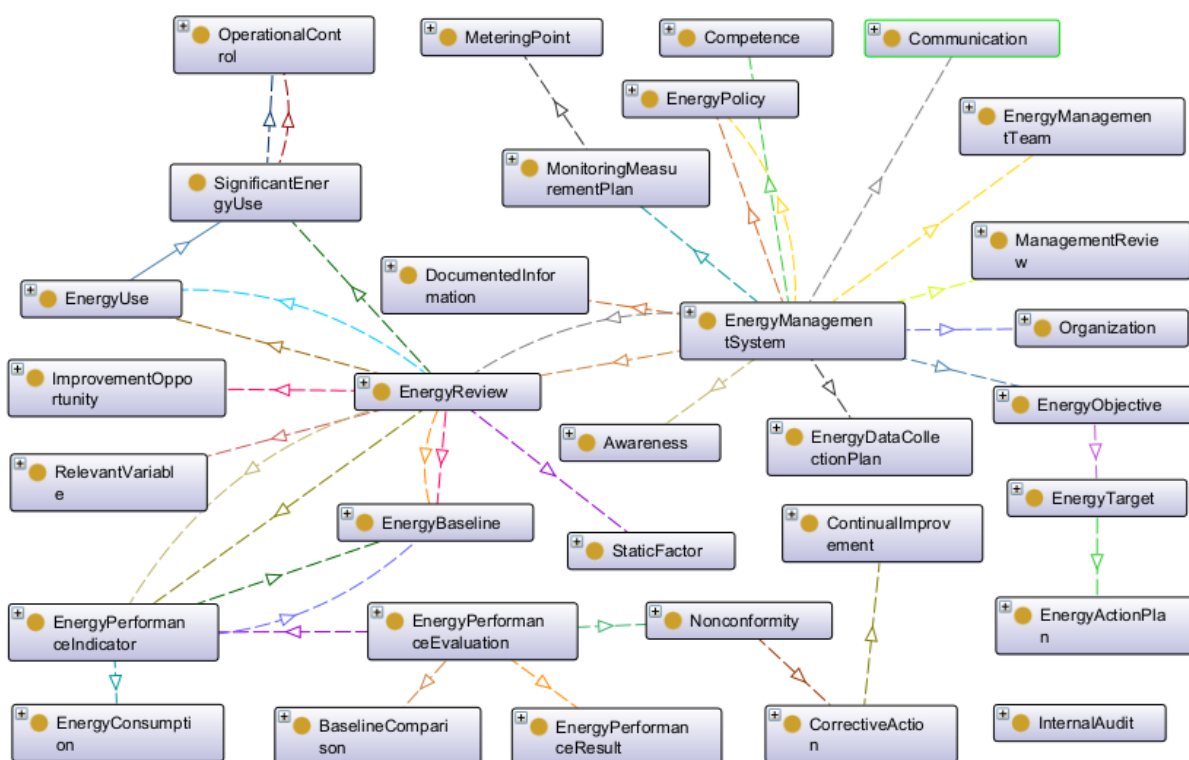
Разработената онтология е проектирана като модулна, разширяема, повторно използваема. Това позволява бъдещо добавяне на AI модули, графи от знания, цифрови двойници, SWRL правила, механизми за откриване на аномалии, предсказващ анализ. Използването на стандартизирани семантични технологии осигурява възможност за

интеграция с интелигентни системи за индустриален енергиен мениджмънт в контекста на Industry 4.0 и Industry 5.0.

ТBox и АBox на онтологията ontoEnMS

ТBox формализира общите понятия и правила на домейна. Основните класове представят организацията, енергийната политика, енергийния преглед, енергийните цели, значимите енергийни употреби, базовите енергийни линии, показателите EnPI, плановете за действие, измерванията, оборудването и процесите. Обектните свойства описват причинните и структурните връзки, а свойствата тип данни задават числови стойности, единици, времеви интервали и статуси.

Логическите ограничения включват домейни и диапазони, кардиналности, еквивалентни и несъвместими класове, ограничения на стойности и аксиоми за последователност. Те позволяват автоматична проверка на модела и извеждане на нови класификации. Например измерване, свързано с наблюдавано енергийно свойство, измервателно устройство и времеви интервал, може автоматично да бъде интерпретирано като енергийно наблюдение. Основните класове и връзките в ТBox са визуализирани на фиг.6.



Фиг.6. Онтограф на ТBox на ISO 50001-базираната онтология

АBox съдържа индивиди от реалното предприятие: производствени комплекси, цехове, машини, трансформатори, електромери, измервателни точки, енергийни базови линии, EnPI стойности и значими енергийни употреби. Разделянето между ТBox и АBox осигурява повторно използване на общата онтология и адаптиране към различни предприятия чрез промяна на конкретните индивиди и данни. Примерното съпоставяне на ключови класове при семантичната интеграция е представено в таблица 5.

Семантично съгласуване с OntoMES и SOSA/SSN

Таблица 5. Примерно съпоставяне на основни класове

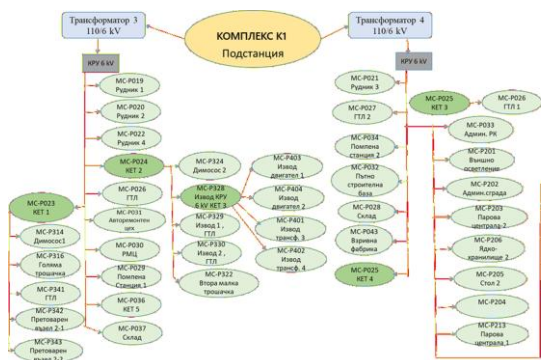
ontoEnMS / ISO 50001	OntoMES / IEC 62264	SOSA/SSN
EnergyMeasurement	Measurement	sosa:Observation
MeteringPoint	Equipment	sosa:Sensor
EnergyUse	ProcessSegment	—
SignificantEnergyUse	Equipment	—
EnergyPerformanceIndicator	KPI	sosa:ObservableProperty
EnergyBaseline	ProductionBaseline	—
OperationalControl	ControlActivity	—

Съгласуването не се ограничава до еквивалентност на имена, а отчита ролята на понятията в различните модели. Производственото оборудване е едновременно енергиен потребител, част от йерархията на предприятието и обект, върху който се извършват наблюдения. Чрез mappings, подкласови зависимости и правила се изграждат връзки между енергийната политика, производствените операции и измерванията.

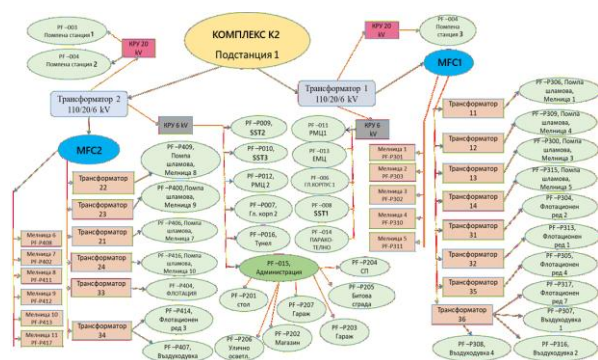
Приложение в предприятие за добив на цветни метали

Индустриалният казус включва два основни производствени комплекса, множество цехове, подстанции, трансформатори, производствено оборудване и измервателни точки. Съществуващата система събира значителен обем данни, но те са организирани в разнородни източници и не са свързани с единен семантичен контекст. OntoEnMS се използва за моделиране на физическата структура, електрозахранването, измервателната инфраструктура, базовите линии и значимите енергийни употреби. Производствената структура на комплексите K1 и K2 е показана съответно на фиг.7 и фиг.8, а избраните базови енергийни линии са обобщени в таблица 6.

Базовите линии позволяват сравнение на текущите режими с референтни стойности, идентифициране на отклонения и оценка на енергийната резултатност. Чрез онтологичния модел всяка стойност е свързана с конкретен процес, производствена зона, времеви период, единица и източник на данни.



Фиг.7. Производствен комплекс K1



Фиг.8. Производствен комплекс K2

Таблица 6. Избрани енергийни базови линии на предприятието

Зона/цех	Процес	Базова линия	Единица
K2-B	Преработка на руда	17,92	kWh/t
K2-A	Натрошаване на руда	2,59	kWh/t
K2-C/K2-V	Преработка и водно-хвостово стопанство	1,77	kWh/t
K1-A	Добив на минна маса	1,38	kWh/m ³
K1-B	Натрошаване на руда	0,74	специфична енергия
K1-C	Превозване на руда	0,30	специфична енергия

Валидация на онтологията

Валидацията е изпълнена на няколко нива: синтактична проверка на OWL/RDF представянето; логическа проверка с reasoner; семантична проверка на дефинициите; въпроси за компетентност; SPARQL заявки върху ABox; проверка на логически извод и оперативна съвместимост. Въпросите за компетентност обхващат идентифициране на SEU, свързване на измервания с оборудване, сравнение с EnB, откриване на отклонения и извличане на управленски действия.

Изводи от Трета глава

1. В Трета глава е разработена OWL онтология ontoEnMS за система за енергиен мениджмънт, базирана на логиката и изискванията на ISO 50001. Чрез нея са формализирани основните понятия на EnMS, включително енергиен преглед, значими енергийни употреби, енергийни базови линии, EnPI показатели, цели, планове за действие, мониторинг, оценяване и непрекъснато подобрене.
2. Създаденият TBox модел включва 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.

3. Разработеният ABox показва как концептуалният модел се свързва с конкретни данни за индустриално предприятие. В него са представени производствени комплекси, цехове, оборудване, електромери, трансформатори, базови линии, EnPI стойности и измервания, което превръща онтологията от теоретичен модел в оперативен семантичен слой.
4. Извършеното съгласуване с 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.
5. Подходът е приложен към предприятие за добив на цветни метали, като са избрани 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 употреби.
6. Валидацията на онтологията чрез синтактична, логическа и семантична проверка, въпроси за компетентност, SPARQL заявки и механизми за логически извод потвърждава приложимостта на разработения модел. Получените резултати формират основата за последващо изграждане на интелигентна система за енергиен мениджмънт с възможности за семантично аотиране, мониторинг, откриване на аномалии и подпомагане на управленски решения.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА. ОНТОЛОГИЧНО БАЗИРАНА СЕМАНТИЧНА АРХИТЕКТУРА ЗА ИНТЕЛИГЕНТЕН ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ

Многослойна архитектура

Архитектурата свързва физическите измервателни устройства и производствените системи с онтологичния модел, графа от знания и аналитичните AI модули. Тя е организирана в шест слоя: устройства; комуникация; управление на данни и оперативни системи; семантична интеграция; граф от знания; корпоративен и аналитичен слой. Между слоевете се реализират както вертикални потоци от измерване към решение, така и обратни потоци за конфигуриране, препоръки и управляващи въздействия. Общият вид на архитектурата е представен на фиг.9, а входовете, обработката и изходите на отделните слоеве са систематизирани в Таблица 7.

ОНТОЛОГИЧНО БАЗИРАНА СЕМАНТИЧНА АРХИТЕКТУРА ЗА ИНТЕЛИГЕНТЕН ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ

Интеграция на IIoT, OPC UA, EnMS/MES, семантични модели, граф от знания и аналитични AI модули



Фиг. 9. Онтологично базирана семантична архитектура за интелигентен енергиен мениджмънт

Таблица 7. Входи, обработка и изходи на архитектурните слоеве

Слой	Вход	Обработка	Изход
Устройства	Сигнали и измервания	Събиране и предварителна обработка	OPC UA променливи и събития
Комуникация	Данни от устройства	Стандартизиран обмен	OPC UA информационен модел
MES/EnMS	Производствени и енергийни данни	Агрегация и контекст	KPI, EnPI и състояния
Семантична интеграция	OPC UA/MES/EnMS	RDF/OWL трансформация и mappings	Семантично анотирани данни
Граф от знания	RDF триплети и онтологии	SPARQL и логически извод	Изведени знания
Аналитичен слой	Контекст от графа	AI, правила, прогноза и оптимизация	Аларми, препоръки и решения

Поток на данните и граф от знания

Първичните измервания се получават от електромери, анализатори, PLC и IoT устройства. OPC UA ги представя като структурирани възли с атрибути, типове и връзки. Семантичният слой преобразува възлите в RDF/OWL, съгласува ги с класовете на ontoEnMS, OntoMES и SOSA/SSN и ги записва като индивиди и наблюдения в графа от знания. Аналитичните модули използват графа за заявки, правила, диагностика и оптимизация. Последователността на преобразуване от измерването към интелигентното решение е илюстрирана на фиг.10.



Фиг.10. Примерен поток на данни от измерването към интелигентното решение

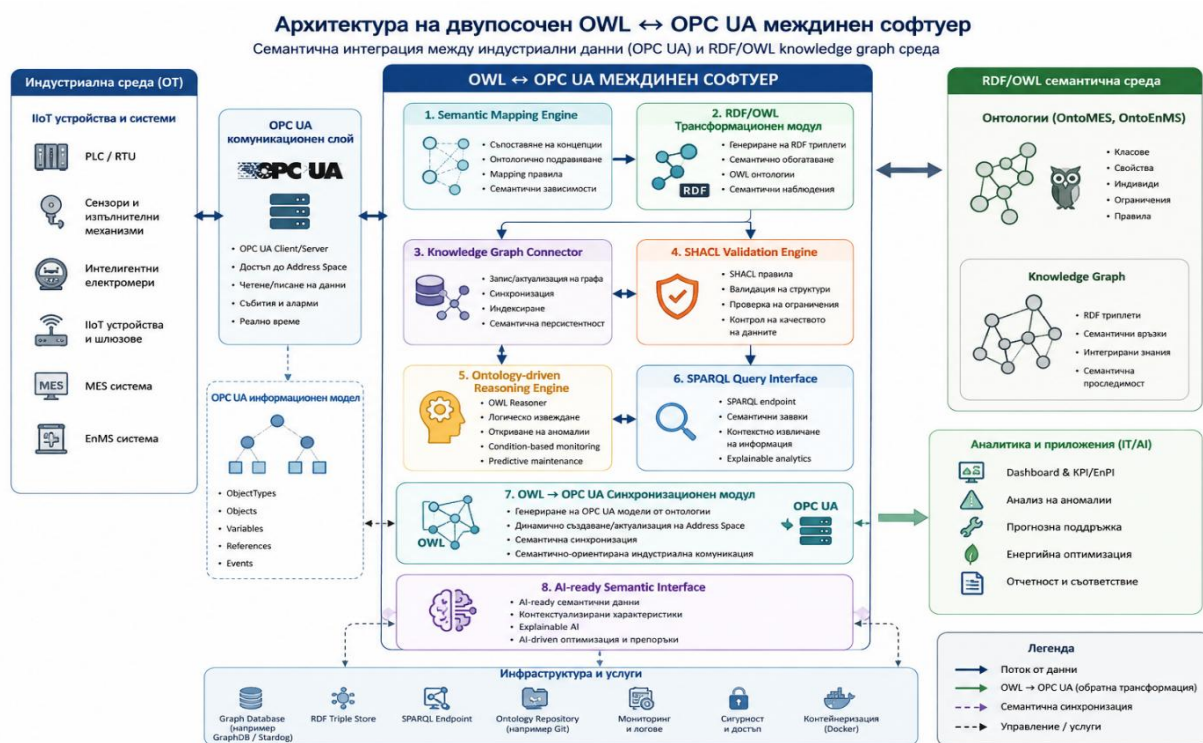
Разграничени са функциите на комуникационния междинен софтуер, слоя за семантична интеграция и графа от знания. OPC UA осигурява достъп и обмен; семантичният слой извършва преобразуването и съгласуването; графът от знания съхранява контекста и поддържа заявки и извод. Това разделение подобрява модулността и позволява независима еволюция на отделните компоненти.

Двупосочен OWL ↔ OPC UA междинен софтуер

Разработеният междинен софтуер реализира две основни посоки. При OPC UA → OWL се извличат възли, типове, референции, стойности, времеви печати и качества, след което се създават RDF ресурси и онтологични индивиди. При OWL → OPC UA онтологичните класове, свойства и ограничения могат да се използват за генериране или обогатяване на OPC UA типове, обекти, променливи и референции. Регистърът на mappings управлява съответствията и версиите. Архитектурата на двупосочния междинен софтуер е представена на фиг.11.

Трансформацията запазва произхода на данните, идентификатора на OPC UA възела, времевия печат, качеството и единицата. При промяна на онтологията mappings могат да бъдат актуализирани без промяна на устройствата. Обратната посока позволява семантични ограничения и конфигурационни знания да бъдат предоставени на

индустриалните приложения. Критериите за оценка на предложената архитектура са обобщени в Таблица 8.



Фиг.11. Архитектура на двупосочния OWL ↔ OPC UA междинен софтуер

Таблица 8. Критерии за оценка на предложената архитектура

Критерий	Съдържание	Очакван резултат
Семантична оперативна съвместимост	Съгласуване на различни домейни	Единен контекст
Проследимост	Връзка измерване–оборудване–EnPI–EnB	Пълна история на данните
OPC UA ↔ OWL	Двупосочно преобразуване	Интеграция на комуникационния и семантичния модел
Модулност	Добавяне на устройства, онтологии и AI модули	Мащабируема архитектура
Логически извод	SPARQL, SWRL и reasoner	Нови знания и откриване на несъответствия
AI интеграция	Контекст за анализ и оптимизация	Интелигентно подпомагане на решения
Близко до реално време	Навременна обработка	Аларми и препоръки

Изводи от Четвърта глава

1. В Четвърта глава е разработена онтологично базирана семантична архитектура за интелигентна система за енергиен мениджмънт, която осигурява интеграция между физическата измервателна инфраструктура, индустриалната комуникационна среда, системите за оперативно и енергийно управление, онтологичните модели, графа от знания и аналитичните AI модули.
2. Предложената архитектура е организирана като многослоен модел, включващ: слой на устройствата, комуникационен слой, слой за оперативно и енергийно управление, слой за семантична интеграция, слой на графа от знания и корпоративен аналитичен слой. Чрез тази структура се осигурява последователна трансформация на данните — от първични измервания и оперативни сигнали до семантично обогатени знания и аналитични резултати.
3. Слойът на устройствата осигурява първичното събиране на енергийни, електрически и технологични данни от сензори, електромери, контролери, машини и IoT устройства. Този слой формира физическата основа на архитектурата и осигурява връзката между реалните производствени процеси и цифровото представяне на енергийните данни.
4. Комуникационният слой, базиран на OPC UA, осигурява стандартизирано предаване, структуриране и обмен на индустриални данни между устройствата, производствените системи и по-високите информационни слоеве. По този начин OPC UA изпълнява ролята на технологичен мост между физическата инфраструктура и семантичното представяне на данните.
5. Слойът за оперативно и енергийно управление интегрира данни от MES и EnMS системи и осигурява оперативен мониторинг, управление на енергийни показатели, проследяване на производствени състояния и поддръжка на процесите по енергиен мениджмънт. Този слой свързва измерените стойности с производствения и управленския контекст на предприятието.
6. Слойът за семантична интеграция реализира преобразуване и обогатяване на данните чрез RDF/OWL представяне, онтологични модели и механизми за семантично съгласуване. Чрез него се осигурява свързване между производствени, енергийни и измервателни понятия, дефинирани в моделите, базирани на IEC 62264, ISO 50001 и SOSA/SSN.
7. Разработеният двупосочен OWL ↔ OPC UA междинен софтуер е ключов компонент на предложената архитектура. Той позволява трансформация на OPC UA информационни модели и оперативни данни към RDF/OWL представяне, както и използване на онтологично знание за обратно обогатяване, структуриране или конфигуриране на индустриални информационни модели.
8. Интеграцията със слоя на графа от знания осигурява възможност за съхранение, свързване и анализ на семантично анотирани данни под формата на RDF триплети, онтологии, ABox индивиди, наблюдения и контекстуални връзки. В главата е показано, че процесът на интеграция може да бъде представен чрез

последователността $OPC\ UA \rightarrow RDF/OWL \rightarrow KG$, която свързва индустриалните информационни модели със средата на графа от знания.

9. Графът от знания създава основа за SPARQL заявки, логически извод, проследимост и контекстуализиран анализ на енергийните данни. Чрез него отделните измервания могат да бъдат свързани с конкретни устройства, оборудване, производствени единици, енергийни базови линии, EnPI показатели и управленски решения.
10. Корпоративният аналитичен слой осигурява основа за интегриране на BI/AI анализ, прогнозиране, откриване на аномалии, подпомагане на решения и оптимизация на енергийни и производствени процеси. Така архитектурата създава предпоставки за преминаване от конвенционален мониторинг към интелигентно, контекстно и семантично подпомогнато управление.
11. Предложената архитектура осигурява семантична оперативна съвместимост между разнородни индустриални системи, проследимост на данните от измервателното устройство до аналитичния резултат, модулност, разширяемост и възможност за интеграция с AI модули. Това я прави приложима за интелигентни системи за енергиен мениджмънт в условията на Industry 4.0 и Industry 5.0.
12. Получените резултати от Четвърта глава формират архитектурната основа за разработването на онтологично базиран мониторинг и интелигентен анализ на енергийни данни, разгледани в следващата глава. По този начин главата изпълнява ролята на преход между разработения в Трета глава семантичен модел и практическите механизми за мониторинг, анализ, откриване на аномалии и подпомагане на решения в Пета глава.

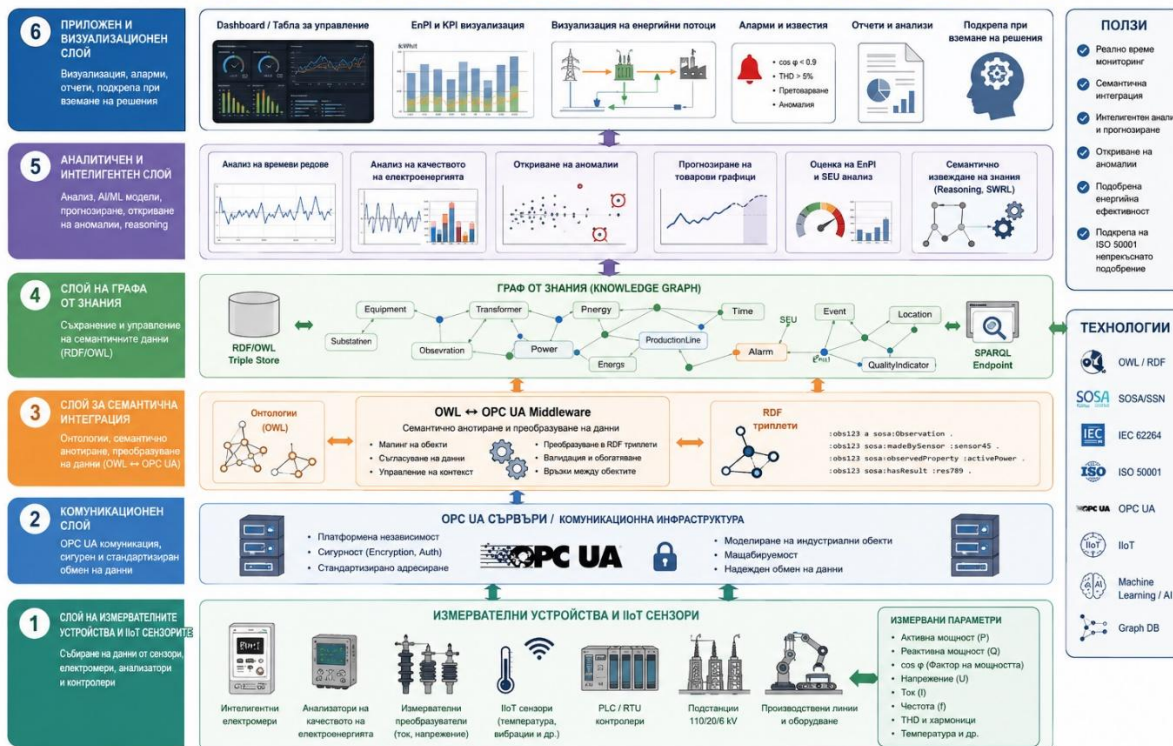
ПЕТА ГЛАВА. ОНТОЛОГИЧНО БАЗИРАН МОНИТОРИНГ И ИНТЕЛИГЕНТЕН АНАЛИЗ

Архитектура на мониторинга и семантично моделиране

Онтологично базираният мониторинг надгражда семантичната архитектура с оперативни функции за събиране, контекстуализиране, анализ и визуализация. Измерванията се свързват с конкретни сензори, активи, процеси, производствени режими, EnPI и нормативни граници. Така стойността не се интерпретира изолирано, а в контекста на мястото, времето, оборудването и целта на измерването. Основните компоненти и връзки на мониторинговата архитектура са представени на фиг.12.

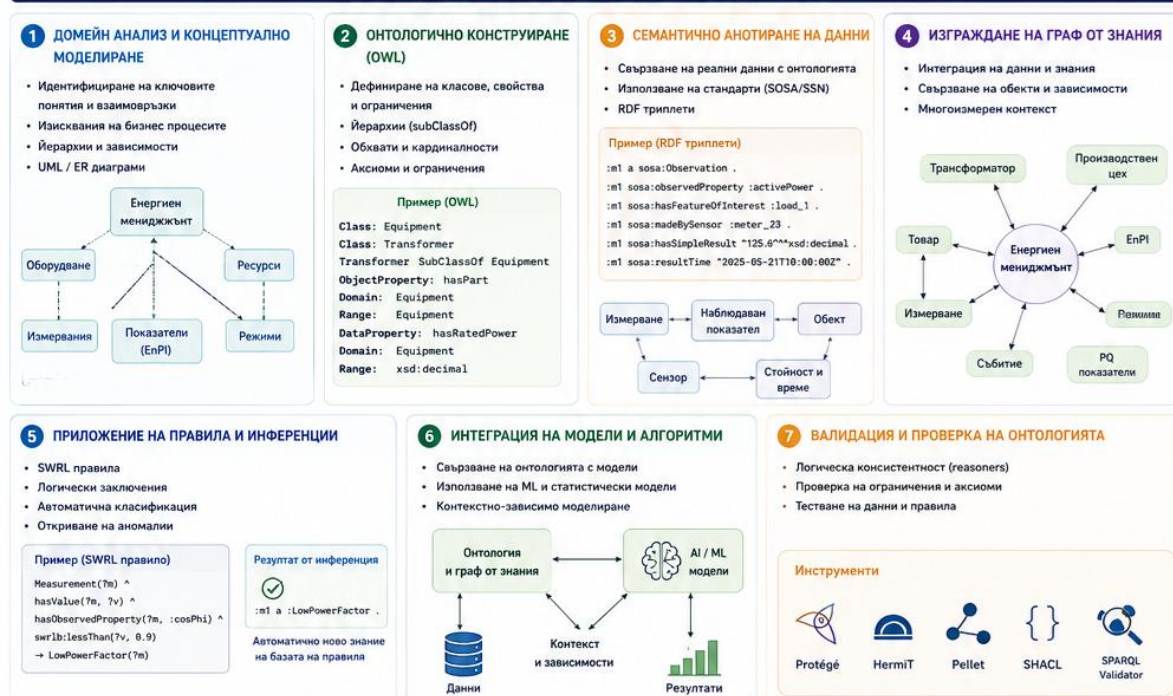
Процесът включва домейн анализ, OWL конструиране, семантично аотиране, изграждане на граф от знания, приложение на правила и изводи, интеграция на аналитични модели, валидация и управление на еволюцията на онтологията. Предвидена е проследимост на версиите и произхода на данните. Използваните методи за семантично моделиране са обобщени на фиг.13.

АРХИТЕКТУРА НА ОНТОЛОГИЧНО БАЗИРАН МОНИТОРИНГ И ИНТЕЛИГЕНТЕН АНАЛИЗ



Фиг.12. Архитектура за онтологично базиран мониторинг и интелигентен анализ

ОСНОВНИ МЕТОДИ ЗА ОНТОЛОГИЧНО МОДЕЛИРАНЕ



Фиг.13. Методи за семантично моделиране на енергийния мениджмънт

Мониторинг на показателите за качество на електроенергията

Качеството на електроенергията се оценява чрез напрежение, честота, активна и реактивна мощност, фактор на мощността, хармонични изкривявания, небаланс и събития. Комбиниран е нормативен контрол спрямо EN 50160 и IEC 61000-4-30 със семантично описание на наблюдаваните свойства, местата на измерване, методите, единиците и допустимите граници. Основните показатели и използваните методи за мониторинг са систематизирани съответно на фиг.14 и фиг.15. Измерените стойности на линейното напрежение са обобщени в Таблица 9, а експерименталните зависимости на напрежението и активната и реактивната мощност са показани на фиг.16 и фиг.17.



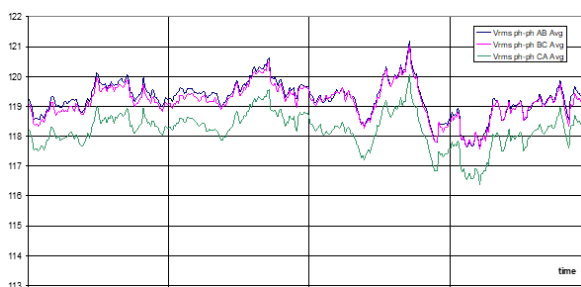
Фиг.14. Основни показатели на качеството на електроенергията



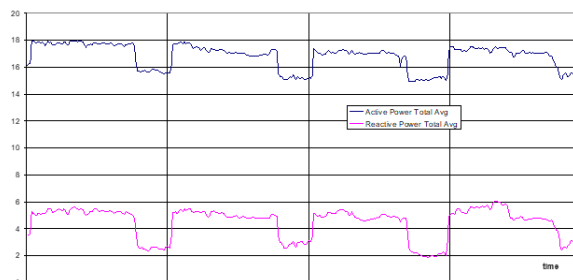
Фиг.15. Методи за мониторинг и анализ

Таблица 9. Измерени стойности на линейното напрежение на страна 110 kV

Стойност	Фаза А-В, V	Фаза В-С, V	Фаза С-А, V
Минимална	117 623	117 557	116 369
Средна	119 263	119 149	118 203
Максимална	121 187	121 044	120 065



Фиг.16. Изменение на напрежението на страна 110 kV



Фиг.17. Активна и реактивна мощност на трансформатор

Измерените линейни напрежения са близки по средна стойност и показват относително стабилен режим. Семантичният модел свързва всяка времева серия с трансформатора, страната на напрежение, фазовата двойка, измервателния метод и нормативния интервал. Това позволява автоматизирано оценяване и генериране на обосновани аларми. Сравнението на измерените хармоници с допустимите стойности е представено в Таблица 10, а изменението на отделните хармоници и общия коефициент THD е показано на фиг.18.

Таблица 10. Сравнение на измерените хармоници с допустимите стойности

Хармоник	Допустима стойност, %	Измерена стойност, %
3	2,25	0,55
5	2,25	0,54
7	1,50	0,20
11	1,50	0,18
13	1,05	0,15
THD	3,00	0,80

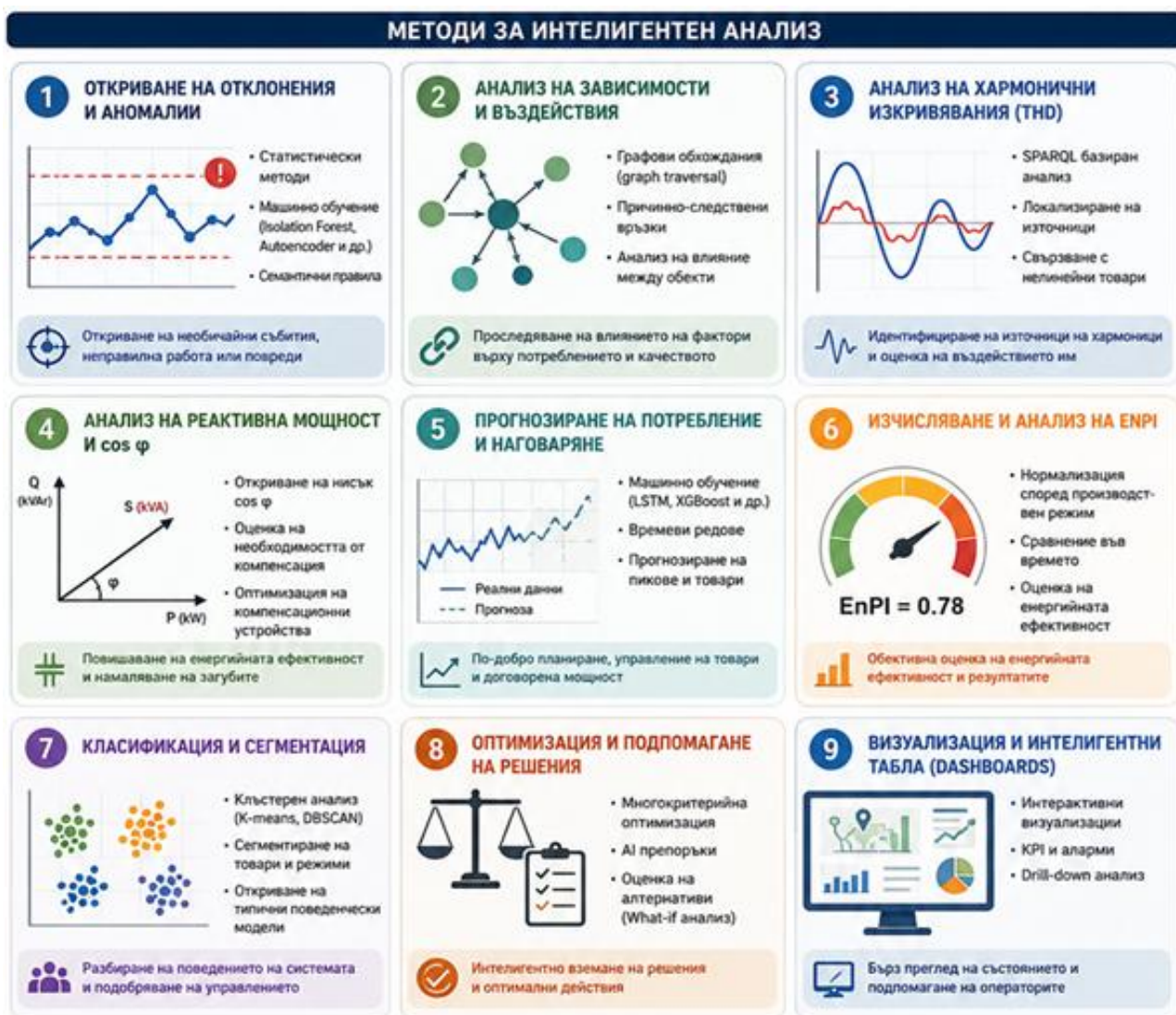


Фиг.18. Изменение на висшите хармоници и общия коефициент THD

Получените стойности на отделните хармоници и THD са под зададените граници. По-важният резултат е разработената структура за автоматично интерпретиране: измерването се свързва с фазата, хармоничния ред, стандарта, допустимата стойност, производствения режим и предходните наблюдения. Това позволява различаване на единично отклонение от устойчив проблем.

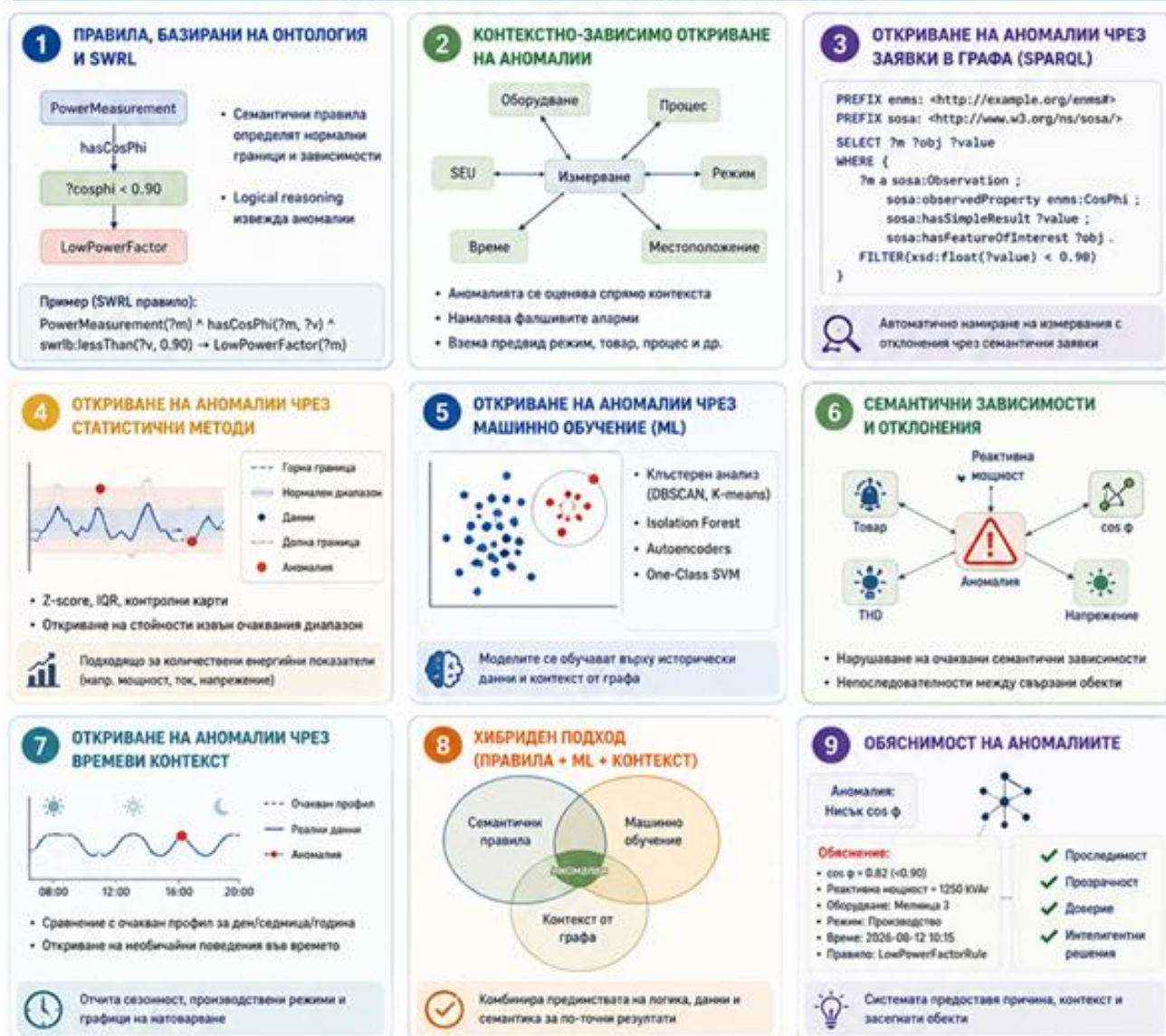
Интелигентен анализ и семантично базирано откриване на аномалии

Интелигентният анализ съчетава описателни и диагностични методи, статистика, анализ на времеви редове, машинно обучение, онтологичен логически извод и анализ на графа от знания. EnPI се изчисляват в контекста на обем на продукцията, режим, зона и базова линия. SWRL правилата формализират експертни зависимости, например нисък $\cos \varphi$ при висока реактивна мощност, превишен THD, отклонение от EnV или необичайно потребление при престой. Основните методи за интелигентен анализ и семантично базирано откриване на аномалии са представени съответно на фиг.19 и фиг.20.



Фиг.19. Методи за интелигентен анализ на енергийни данни

МЕТОДИ ЗА СЕМАНТИЧНО ОТКРИВАНЕ НА АНОМАЛИИ



Фиг.20. Методи за семантично базирано откриване на аномалии

Аномалиите са класифицирани като точкови, контекстни, колективни, сезонни, структурни и комбинирани. Семантичният слой определя дали отклонението е допустимо за конкретния режим и дали има причинна връзка с производствено събитие. Комбинацията от правила и модели намалява фалшивите аларми и подпомага локализирането на причината.

Графът от знания осигурява обяснимост: към алармата могат да бъдат извлечени измерването, използваната граница, засегнатото оборудване, текущият режим, EnPI, сходни събития и препоръчано действие. По този начин системата не само сигнализира, а представя логиката на заключението.

Изводи от Пета глава

1. В настоящата глава е разработен онтологично базиран подход за мониторинг, интелигентен анализ и прогнозиране в системите за енергиен мениджмънт, предназначен за индустриални предприятия с висока енергийна интензивност. Подходът интегрира IoT технологии, OPC UA комуникации, онтологии, граф от знания, семантичен логически извод, SWRL правила и AI аналитични модели.
2. Разработена е многослойна архитектура за онтологично базиран мониторинг, която интегрира измервателни устройства, OPC UA комуникационна инфраструктура, граф от знания и интелигентни аналитични модули. Тя осигурява семантично интегрирана среда за енергиен мониторинг, контекстуализиране на измерванията и автоматизирано подпомагане на решенията.
3. Реализирано е онтологично моделиране на енергийните измервания чрез OWL/RDF технологии, SOSA/SSN и модели, базирани на IEC 62264 и ISO 50001. Това позволява стандартизирано представяне на енергийни ресурси, производствени процеси, измервания, товари, EnPI и SEU в единна семантична структура.
4. Разработеният граф от знания осигурява семантично представяне на взаимовръзките между оборудване, производствени процеси, енергийни показатели, товари, аномалии и технологични режими. По този начин се създава основа за контекстно-зависим анализ, SPARQL заявки и семантичен логически извод.
5. Предложеният подход позволява мониторинг в реално време на основните показатели за качеството на електроенергията: активна и реактивна мощност, cos ϕ , THD, напрежение, ток, товарови графици и EnPI. Интеграцията между измервателната инфраструктура и онтологичния модел осигурява автоматизирано откриване на отклонения, контекстна интерпретация и генериране на препоръки.
6. Реализиран е интелигентен анализ на енергийните данни чрез анализ на времеви редове, машинно обучение, статистически анализ, онтологичен логически извод и анализ на графа от знания. Това позволява откриване на зависимости между енергопотребление, производствени режими, реактивна мощност, качество на електроенергията и EnPI.
7. Разработен е семантично базиран подход за откриване на аномалии, който позволява автоматизирана идентификация на нисък cos ϕ , свръхкомпенсация, повишена реактивна мощност, претоварване, аномално електропотребление, повишен THD и отклонения от EnPI и EnB.
8. Интеграцията между онтологичен логически извод, SWRL правила и машинно обучение позволява интелигентна диагностика и контекстно-зависим анализ. Това намалява вероятността от фалшиви аларми и повишава точността при локализиране на проблемите.

9. Разработен е семантично подпомогнат AI анализ, при който алгоритмите използват контекстна информация от графа от знания и онтологичния слой. Това осигурява обяснимост на резултатите, контекстно-зависима интерпретация и по-надеждно автоматизирано подпомагане на решенията.
10. Предложена е архитектура за визуализация и интелигентни табла за управление, която интегрира мониторинг в реално време, AI анализ, визуализация на графа от знания, KPI/EnPI табла, визуализация на аномалии и семантична навигация. Тези средства подпомагат операторите и енергийните мениджъри при анализ и вземане на решения.
11. Практическото приложение на разработения подход в предприятие за добив на цветни метали потвърждава приложимостта му в реална индустриална среда. Получените резултати показват възможност за повишаване на енергийната ефективност, намаляване на загубите, оптимизация на реактивната мощност и по-добро управление на енергийните режими.
12. Разработената система създава основа за изграждане на адаптивни, интелигентни и семантично интегрирани системи за енергиен мениджмънт, съвместими с концепциите на Industry 4.0 и Industry 5.0.

ШЕСТА ГЛАВА. ИНТЕЛИГЕНТЕН МЕТОД ЗА ВЗЕМАНЕ НА РЕШЕНИЕ В СИСТЕМИТЕ ЗА ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ

Алгоритъм за оптимизация чрез скакалци

Алгоритъмът за оптимизация на скакалците (GOA) е метаевристичен оптимизационен алгоритъм, базиран на интелигентността на рояците и предложен от Saremi и др. [SarML-17]. Той моделира колективното поведение на скакалците при търсене на храна, като използва взаимодействия между индивидите в популацията и постепенно насочване към най-доброто намерено решение.

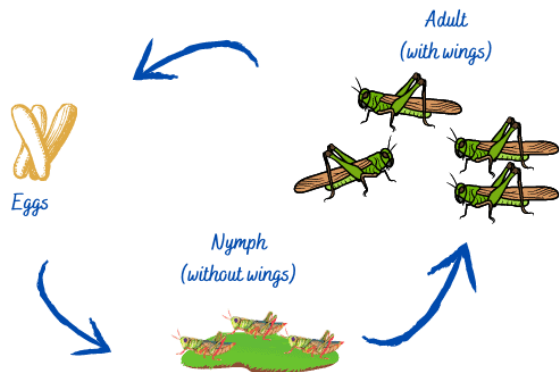
В природата поведението на скакалците се характеризира с две основни фази – бавно локално движение във фаза „нимфа“ и бързо придвижване на дълги разстояния във фаза „възрастен“ (фиг.21). Тази особеност е използвана като аналогия за двете основни фази на оптимизационния процес: изследване на пространството на решенията (exploration) и локално уточняване на обещаващи решения (exploitation).

В контекста на оптимизацията всеки скакалец представлява кандидат-решение. Позицията му в пространството на търсене кодира стойностите на управляемите променливи. При задачата за реактивна мощност това могат да бъдат състоянията на кондензаторните батерии, мощността на компенсация по секции или допустимите режими на комутация. Популацията от скакалци изследва различни комбинации, а най-доброто решение се избира според предварително дефинирана целева функция.

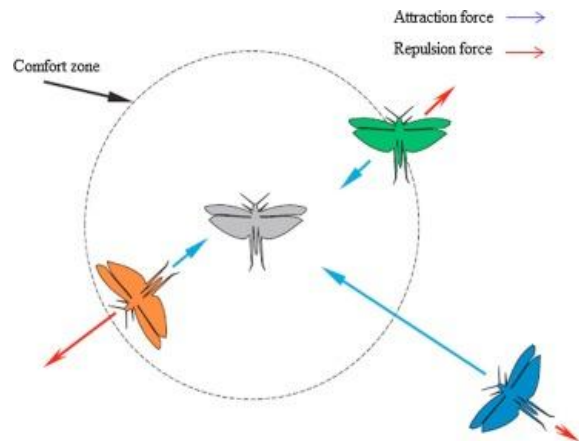
В началните итерации алгоритъмът поддържа по-голямо разнообразие на решенията, което позволява обхождане на по-широка област от пространството на търсене. В

следващите итерации влиянието на най-доброто намерено решение се засилва, а стъпката на търсене намалява. По този начин GOA постига баланс между глобално търсене и локално подобряване на решението (фиг.22).

За приложението в EnMS е важно алгоритъмът да се разглежда не само като обща метаевристика, а като инструмент за избор на режим на управление при конкретни технически и нормативни ограничения. Това изисква ясно дефиниране на променливите, целевата функция и ограниченията на задачата.



Фиг.21. Жизнен цикъл на скакалците



Фиг.22. Зони на привличане, отблъскване и комфорт в GOA

Нека $X_i \in \mathbb{R}^D$ е позицията на i -тия скакалец. Общият модел на движение включва социалното взаимодействие S_i , гравитационния компонент G_i и адвекцията на вятъра A_i :

$$X_i = S_i + G_i + A_i. \quad (1)$$

$$S_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N s(d_{ij}) \cdot \hat{d}_{ij}, \quad (2)$$

$$s(r) = f \cdot e^{(-r/l)} - e^{(-r)}. \quad (3)$$

За оптимизационната задача позицията се актуализира спрямо най-доброто намерено решение T . Адаптивният параметър c намалява с итерациите и управлява прехода от глобално изследване към локално уточняване:

$$c = c_{\max} - t \cdot (c_{\max} - c_{\min}) / T_{\max}. \quad (4)$$

Всеки кандидат-режим кодира състоянията или степените на компенсационните устройства. Фитнес функцията оценява загубите, отклонението на $\cos \varphi$, броя превключвания и риска от свръхкомпенсация. Дискретните решения се получават чрез проектиране на актуализираните позиции към допустимите състояния.

Анализ на реактивната мощност и фактора на мощността

Оптимизацията на реактивната мощност в производствено предприятие изисква съчетаване на измервателни данни, нормативни ограничения и технически характеристики на електрическата уредба. Целта е да се поддържа факторът на мощността в диапазон, който не води до санкции, но също така не предизвиква икономически неизгодна свръхкомпенсация.

В разглежданото предприятие анализът е насочен към фактора на мощността $\cos \varphi$ при различни режими на работа на трансформаторите в главната подстанция и на секциите 6 kV. Измерванията позволяват да се идентифицират характерни режими, разлики между трансформаторите и влиянието на отделни производствени цехове върху реактивните товари.

Предмет на разглеждане е изменението на фактора на мощността $\cos \varphi$ при различни условия на работа на трансформатор Тр.№1 и трансформатор Тр.№2 в главната подстанция. На фиг. 23 са показани стойностите на $\cos \varphi$, определени за 15-минутен интервал за Тр.№1 през делнично денонощие. Всички стойности надхвърлят 0,95, като при спиране на цех „1“ $\cos \varphi$ достига до около 0,99.

Аналогичен характер има и зависимостта за празнично денонощие. Стойностите на $\cos \varphi$ отново са над 0,95, а при спиране на цех „1“ се повишават допълнително. Това показва наличие на режим, близък до свръхкомпенсация, който следва да бъде управляван динамично.

За Тр.№2 стойностите са малко по-ниски от тези на Тр.№1. В началото на делничното денонощие $\cos \varphi$ е около 0,94, при спиране на цех „1“ се повишава до около 0,97, а през втората половина на деня се наблюдават стойности около 0,92.

От едновременно проведените измервания на двата трансформатора могат да се направят два важни извода. Първо, при анализа за оптимизиране на реактивните товари на основното производство е достатъчно да се използват данни за работно денонощие, тъй като разликите спрямо празничните денонощия са малки. Второ, анализът трябва да се извършва отделно за всеки трансформатор, тъй като натоварването и влиянието на производствените цехове не са еднакви.

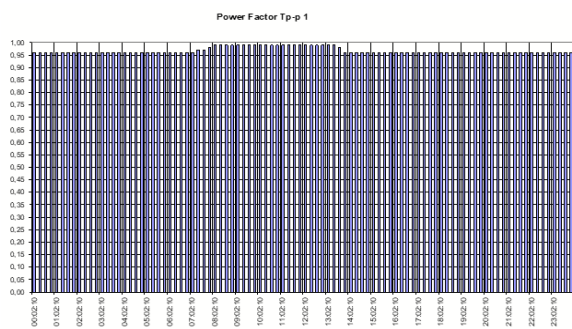
Измерванията на двете секции на шини 6 kV в ГПП позволяват да се оцени локалното влияние на производствените товари върху $\cos \varphi$. На фиг.24 е представено изменението във времето на фактора на мощността на секция 1. Наблюдават се значителни колебания през почти шестдневния запис, като регистрираните стойности варират приблизително от 0,59 до 0,83.

Резултатите от измерванията показват, че в точката на търговско мерене на Тр.№1 факторът на мощността през цялото денонощие е по-висок от 0,95, а при определени режими достига до 0,99. Подобна е и ситуацията при Тр.№2, макар и с малко по-ниски стойности. Поддържането на значително по-високи стойности от неутралния фактор на мощността $\cos \varphi = 0,9$ не е икономически целесъобразно, защото може да доведе до свръхкомпенсация и допълнителни загуби.

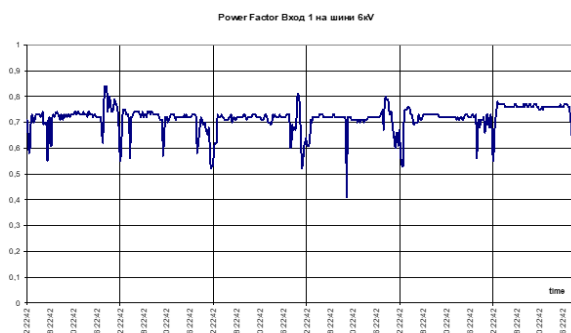
На база на измерванията и анализа е технически възможно компенсацията на реактивните товари на цех „1“ да бъде реализирана чрез присъединяване на по една кондензаторна батерия с мощност 1000 kVAr към всяка от двете секции 6 kV в подстанцията. Всяка батерия следва да се управлява чрез самостоятелен комутационен апарат, така че да се изключва при престой на цеха или при риск от свръхкомпенсация.

Фиг.25 показва, че постоянното включване на кондензаторна батерия не е оптимално за всички режими. При намалено натоварване или престой на цеха е необходимо адаптивно

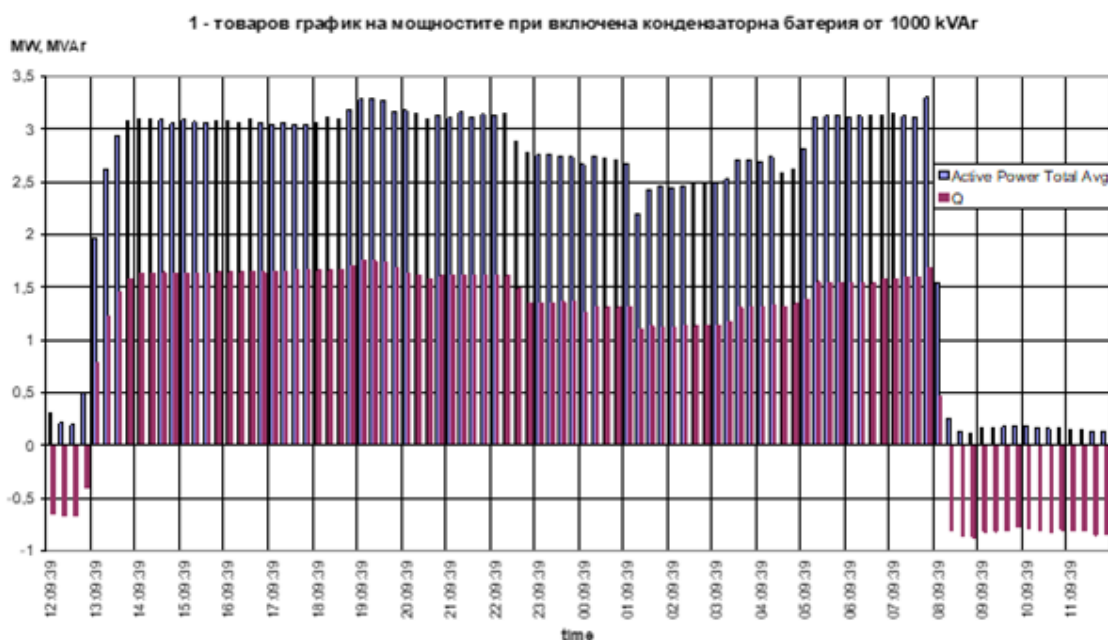
управление, което да отчита текущата активна и реактивна мощност, фактора на мощността и допустимите граници на работа. Именно тази необходимост обосновава използването на интелигентен оптимизационен алгоритъм.



Фиг.23. $\cos \phi$ на трансформатор № 1 през делнично денонощие



Фиг.24. Изменение на $\cos \phi$ на секция 1 на шини 6 kV



Фиг.25. Товаров график при включена кондензаторна батерия 1000 kVAr

Анализът показва различно поведение в точката на търговско мерене и на секциите 6 kV. При трансформатор № 1 $\cos \phi$ е над 0,95 и при определени режими достига около 0,99, докато на секция 1 стойностите варират приблизително между 0,59 и 0,83. Това потвърждава необходимостта компенсацията да се управлява локално и режимно, а не чрез постоянна мощност.

Предложено е присъединяване на по една кондензаторна батерия 1000 kVAr към всяка секция 6 kV, управлявана от самостоятелен комутационен апарат. При престой на цеха батериите трябва да се изключват. Потенциалното намаляване на загубите от пренос на реактивна мощност е оценено на около 83,4 MWh годишно, а собствените загуби в

кондензаторните уредби – около 43,8 MWh годишно. Следователно реалният ефект зависи от адаптивния режим на включване.

Формулиране и решение на оптимизационната задача

За две секции векторът на управляващите променливи се задава като:

$$u(t) = [u_1(t), u_2(t)], u_i(t) \in \{0, 1\}, \quad (5)$$

където 1 означава включена, а 0 – изключена батерия. При многостъпална реализация са възможни дискретни мощности, например 0, 500, 1000 и 1500 kVAr. Целевата функция е:

$$F = w_1 \cdot P_{\text{loss}} + w_2 \cdot \text{Penalty}_{\cos\phi} + w_3 \cdot \text{Penalty}_{\text{switch}} + w_4 \cdot \text{Penalty}_{\text{overcomp}}. \quad (6)$$

Оптимизацията минимизира F при ограничения за фактора на мощността, напрежението, мощността на кондензаторните стъпала и максималния брой превключвания:

$$\begin{aligned} \cos \phi_{\min} \leq \cos \phi(t) \leq \cos \phi_{\max}; \quad U_{\min} \leq U(t) \leq U_{\max}; \\ 0 \leq Q_{ci}(t) \leq Q_{ci,\max}; \quad n_{\text{switch}} \leq n_{\text{switch},\max}. \end{aligned} \quad (7)$$

Входните данни са 15-минутни измервания на P, Q и $\cos \phi$, техническите параметри на батериите, границите на напрежението, режимите на цеховете и състоянието на комутационните апарати. За всяко кандидат-решение се изчисляват новата реактивна мощност Q_{new} , новият фактор на мощността и наказателните членове.

1. Въвеждат се измерените $P(t)$, $Q(t)$, $\cos \phi(t)$ и техническите граници.
2. Инициализира се популация от кандидат-режими $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]$.
3. За всеки режим се изчислява $Q_{\text{new}}(t) = Q(t) - Q_c(u, t)$.
4. Изчислява се $\cos \phi_{\text{new}}(t) = P(t) / \sqrt{P(t)^2 + Q_{\text{new}}(t)^2}$.
5. Оценяват се загубите и наказанията за недопустим $\cos \phi$, превключвания и свръхкомпенсация.
6. Избира се текущо най-доброто решение и популацията се актуализира по GOA.
7. Процесът се повтаря до достигане на критерия за спиране.
8. Изходът е оптимален режим и очакваните показатели след управление.

Оптималното решение е режимно-зависимо. При високо индуктивно натоварване се включва съответната батерия, а при ниско натоварване или престой тя се изключва. Така се поддържа $\cos \phi$ в технически и икономически обоснован диапазон, намалява се преносът на реактивна мощност и се ограничава рискът от свръхкомпенсация.

Изводи от Шеста глава

1. Анализът на качеството на електроенергията и фактора на мощността показва, че управлението на реактивната мощност е съществен елемент от индустриалните системи за енергиен мениджмънт.

2. Експерименталните резултати показват, че при трансформаторите в главната подстанция $\cos \varphi$ в повечето случаи надвишава нормативната граница 0,9, а при определени режими достига стойности до 0,99, което е индикация за възможна свръхкомпенсация.
3. Между делничните и празничните денонощия не се наблюдават съществени различия в характера на изменение на $\cos \varphi$, което позволява използване на представителни работни профили при оптимизационните процедури.
4. Установено е, че реактивните товари трябва да се анализират отделно по трансформатори и секции 6 kV поради различния характер на натоварването и различното влияние на производствените цехове.
5. Технически обосновано решение за компенсация на реактивната мощност на цех „1“ е използването на кондензаторни батерии с мощност 1000 kVAr към всяка от секциите 6 kV, управлявани чрез отделни комутационни апарати.
6. Оценено е, че компенсирането може да намали загубите от пренос на реактивна мощност по кабелните линии с около 83,4 MWh годишно, като следва да се отчитат и собствените загуби на кондензаторните уредби, оценени на около 43,8 MWh годишно.
7. Постоянното включване на компенсационните устройства не е оптимално за всички режими. Необходимо е адаптивно управление, което отчита текущото натоварване, $\cos \varphi$, ограниченията на напрежението и риска от свръхкомпенсация.
8. В главата е предложено прилагане на GOA като интелигентен оптимизационен метод за избор на режими на компенсация. Алгоритъмът позволява търсене на близки до оптималните решения при наличие на много променливи и ограничения.
9. Формулираната целева функция свързва оптимизацията с реални инженерни показатели – загуби, отклонение на $\cos \varphi$, брой превключвания и наказания при свръхкомпенсация. Това превръща GOA от общ алгоритъм в приложим инструмент за EnMS.
10. Предложеният подход създава основа за интегриране на AI-базирана оптимизация в индустриални системи за енергиен мениджмънт, съвместими с изискванията на IEC 61000-4-30 и EN 50160, и подпомага изграждането на адаптивни енергийни системи в контекста на Industry 4.0.

ОБЩИ ИЗВОДИ

В резултат на проведените теоретични изследвания, сравнителни анализи, разработени модели, архитектурни решения и експериментални изследвания, свързани с разработката на интелигентна система за енергиен мениджмънт, могат да бъдат формулирани следните общи изводи:

1. Направеният обзор на съвременните системи за енергиен мениджмънт показва, че в условията на Industry 4.0 и Industry 5.0 те се превръщат от организационно-управленски инструмент за повишаване на енергийната ефективност в интегрирани информационно-аналитични системи, способни да подпомагат мониторинга, анализа, диагностиката и оптимизацията на енергийните процеси в индустриална среда.
2. Установено е, че стандартите от серията ISO 50000, както и стандартите EN 50160 и IEC 61000-4-30, осигуряват необходимата нормативна и методологична основа за изграждане на системи за енергиен мениджмънт, определяне на енергийни показатели, базови енергийни линии, измерване, верификация и оценка на качеството на електроенергията. Същевременно тези стандарти не предоставят достатъчно механизми за семантична оперативна съвместимост, онтологично представяне на знания, автоматизиран логически извод и AI-базирана оптимизация.
3. Обоснована е 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, използвани за анализ и подпомагане на решения.
4. Разработената хибридна семантично-оптимизационна AI концепция показва, че ефективната интелигентна EnMS не следва да се разглежда само като система за събиране и визуализация на данни, а като интегрирана среда за семантично моделиране, логически извод, откриване на аномалии, прогнозиране и оптимизация. Комбинирането на символен изкуствен интелект и оптимизационни алгоритми създава предпоставки за по-висока обяснимост, проследимост и адаптивност на управленските решения.
5. Предложеният шестетапен методологичен подход — планиране, моделиране, семантична интеграция, интеграция със системи, анализ и AI, и валидация — осигурява последователна рамка за разработване на умни и интелигентни системи за енергиен мениджмънт. Този подход позволява систематично преминаване от дефиниране на цели и изисквания към изграждане на онтологични модели, интеграция с индустриални системи, анализ на данни и проверка на приложимостта в реална производствена среда.
6. Разработената онтология на система за енергиен мениджмънт, базирана на ISO 50001, формализира основните понятия, връзки и ограничения, свързани с

енергийната политика, енергийните цели, значимите енергийни потребители, енергийните показатели, базовите енергийни линии, измерванията и действията за подобрене. Чрез нея се създава основа за еднозначно представяне, повторно използване и автоматизирана обработка на знанията в областта на енергийния мениджмънт.

7. Семантичното съгласуване на разработената ISO 50001-базирана онтология с OntoMES, IEC 62264 и SOSA/SSN показва възможност за интегриране на енергийния, производствения и измервателния контекст в единен семантичен модел. Това позволява свързване на енергийните измервания с оборудване, производствени единици, технологични процеси, значими енергийни потребители и показатели за енергийна ефективност.
8. Приложението на онтологичния модел в предприятие за добив на цветни метали потвърждава практическата приложимост на предложения подход. Чрез моделиране на производствената структура, измервателната инфраструктура, електрозахранването, базовите енергийни линии и показателите за енергийна ефективност е създадена основа за изграждане на граф от знания, който подпомага проследимостта, анализа и интерпретацията на енергийните данни.
9. Разработената онтологично базирана семантична архитектура за интелигентен енергиен мениджмънт осигурява интеграция между IoT устройства, OPC UA комуникация, MES/EnMS системи, семантичен слой, граф от знания и аналитични AI модули. Тя преодолява ограниченията на традиционните SCADA-базирани решения, като осигурява семантична оперативна съвместимост, контекстуализиране на данните, логически извод и възможност за интелигентен анализ.
10. Предложеният двупосочен OWL $\leftrightarrow$ OPC UA междинен софтуер създава предпоставки за автоматизирана връзка между индустриалните комуникационни модели и онтологичното представяне на знания. Това позволява преобразуване на данни от физическата измервателна инфраструктура към семантичен модел и обратно, което е важно условие за изграждане на интегрирани и разширяеми интелигентни EnMS архитектури.
11. Разработеният онтологично базиран подход за мониторинг и интелигентен анализ на енергийни данни показва, че енергийните показатели, параметрите на качеството на електроенергията и отклоненията в работните режими могат да бъдат анализирани не само като числови стойности, а и в техния производствен, технологичен и нормативен контекст. Това повишава точността на интерпретацията и подпомага откриването на причини за неефективност, аномалии и отклонения.
12. Семантично базираното откриване на аномалии позволява обединяване на правила, онтологичен логически извод, анализ на времеви редове, статистически методи и машинно обучение. По този начин се създава възможност за разпознаване на различни типове аномалии, включително отклонения в

електропотреблението, нисък фактор на мощността, свръхкомпенсация, претоварване, отклонения на напрежението, хармонични изкривявания и несъответствия спрямо енергийните показатели.

13. Изследването на реактивната мощност и фактора на мощността в разглежданото предприятие показва, че управлението на компенсацията не може да се основава единствено на статични настройки. Необходимо е адаптивно управление, което отчита текущото натоварване, изменението на $\cos \varphi$, ограниченията на напрежението, загубите, броя превключвания и риска от свръхкомпенсация.
14. Приложението на алгоритъма на скакалците (GOA) за оптимизация на реактивната мощност доказва възможността интелигентни оптимизационни методи да бъдат използвани за избор на рационални режими на компенсация в индустриални електрически мрежи. Формулираната целева функция свързва оптимизационния алгоритъм с реални инженерни показатели, което превръща метода в приложим инструмент за подпомагане на решения в EnMS.
15. 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.
16. Обобщено може да се заключи, че дисертационният труд постига поставената цел чрез разработване на интелигентен подход за енергиен мениджмънт, който интегрира стандарти, онтологии, семантични технологии, графи от знания, индустриална комуникация и AI-базирана оптимизация. Предложените решения имат научна и приложна значимост и могат да бъдат използвани като основа за изграждане на адаптивни, оперативно съвместими и интелигентни EnMS в индустриални предприятия.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

Получените резултати в дисертационния труд могат да бъдат обобщени в три основни групи: научни, научно-приложни и приложни приноси.

I. Научни приноси

1. Разработен е интегриран интелигентен подход за изграждане на системи за енергиен мениджмънт, който съчетава изискванията на ISO 50001, семантично моделиране, индустриален интернет на нещата, графи от знания и методи на изкуствения интелект. Подходът осигурява методологична основа за преход от традиционен мониторинг на енергопотреблението към интелигентно, контекстно ориентирано и оптимизационно подпомагано управление на енергийните процеси.

2. Предложена е хибридна семантично-оптимизационна концепция с изкуствен интелект за интелигентна система за енергиен мениджмънт, която интегрира символен изкуствен интелект, онтологични модели, автоматизиран логически извод и интелигентни оптимизационни алгоритми. С това се създава възможност за обяснимо, проследимо и адаптивно подпомагане на управленските решения в EnMS.
3. Разработен е шестетапен методологичен модел за създаване на умни и интелигентни системи за енергиен мениджмънт, включващ планиране, моделиране, семантична интеграция, интеграция с индустриални системи, анализ и AI, и валидация. Моделът структурира процеса на разработване на EnMS от дефинирането на цели и изисквания до проверката на приложимостта в реална индустриална среда.
4. Създадена е формална онтология на система за енергиен мениджмънт, базирана на ISO 50001, която представя основните понятия, отношения и ограничения, свързани с енергийната политика, енергийните цели, значимите енергийни потребители, показателите за енергийна ефективност, базовите енергийни линии, измерванията и действията за подобрение. Онтологията осигурява семантична основа за еднозначно представяне, повторно използване и автоматизирана обработка на знанията в областта на EnMS.
5. Предложен е подход за семантично съгласуване на ISO 50001-базираната онтология с производствени и измервателни модели, базирани на IEC 62264 и SOSA/SSN. Чрез това се осигурява свързване на енергийните показатели и измервания с производственото оборудване, производствените единици, технологичните процеси и измервателната инфраструктура.
6. Разработена е онтологично базирана семантична архитектура за интелигентен енергиен мениджмънт, която интегрира IIoT устройства, OPC UA комуникация, MES/EnMS системи, семантичен интеграционен слой, граф от знания и аналитични AI модули. Архитектурата разширява традиционните SCADA/EnMS решения чрез въвеждане на семантична оперативна съвместимост, контекст на данните и логически извод.
7. Предложен е семантично базиран подход за мониторинг и интелигентен анализ на енергийни данни, при който енергийните показатели, параметрите на качеството на електроенергията и отклоненията в работните режими се разглеждат не само като числови стойности, а и в техния производствен, технологичен и нормативен контекст.
8. Формулиран е интелигентен оптимизационен подход за управление на реактивната мощност и компенсация на фактора на мощността, базиран на алгоритъма на скакалците. Чрез него задачата за компенсация се разглежда като многофакторен оптимизационен проблем, отчитащ $\cos \varphi$, загубите, напрежението, ограниченията на кондензаторните стъпала и риска от свръхкомпенсация.

II. Научно-приложни приноси

1. Разработена е структура на интелигентна EnMS, която осигурява връзка между стандартите за енергиен мениджмънт, индустриалните комуникационни технологии, онтологичното моделиране и AI-базираната аналитика. По този начин е предложено приложимо решение за интегриране на организационните, информационните, семантичните и оптимизационните аспекти на енергийния мениджмънт.
2. Създаден е модел за представяне на енергията като обект на производствено-информационно моделиране в контекста на IEC 62264. Това позволява енергийните потоци, измервания и показатели да бъдат свързани с производствената структура, оборудването, технологичните процеси и значимите енергийни потребители.
3. Разработен е примерен ABox за индустриално предприятие, чрез който са моделирани производствената структура, измервателната инфраструктура, електрозахранването, базовите енергийни линии, показателите за енергийна ефективност и значимите енергийни потребители. Това демонстрира приложимостта на онтологичния модел в реален производствен контекст.
4. Предложен е двупосочен OWL ↔ OPC UA междинен софтуерен подход, който осигурява трансформация между индустриални комуникационни модели и онтологично представяне на знания. Това създава предпоставки за автоматизирана интеграция между физическата измервателна инфраструктура и семантичния слой на интелигентната EnMS.
5. Разработени са логически правила, семантични зависимости и механизми за извеждане на знания, които подпомагат автоматизираното откриване на отклонения, интерпретацията на енергийни показатели и оценката на състоянието на енергийните процеси.
6. Предложен е хибриден подход за откриване на аномалии в системите за енергиен мениджмънт, който съчетава онтологичен логически извод, правила, анализ на времеви редове, статистически методи и AI-базиран анализ. Това позволява разпознаване на различни типове отклонения в електропотреблението, фактора на мощността, напрежението, хармоничните изкривявания и енергийните показатели.
7. Формулирана е целева функция за оптимизация на реактивната мощност, която свързва алгоритъма на скакалците с реални инженерни критерии: подобряване на $\cos \varphi$, ограничаване на загубите, спазване на технически ограничения, минимизиране на превключванията и избягване на свръхкомпенсация.
8. Разработеният подход е приложен и верифициран чрез индустриален казус от предприятие за добив на цветни метали, което потвърждава възможността предложените онтологични, архитектурни и оптимизационни решения да бъдат използвани в реална производствена среда.

III. Приложни приноси

1. Създадена е практическа основа за изграждане на интелигентна система за енергиен мениджмънт в индустриално предприятие, включваща моделиране на производствени зони, оборудване, електрозахранване, измервателни точки, енергийни показатели и базови енергийни линии.
2. Разработен е приложим модел за граф от знания, който позволява съхранение, свързване и интерпретация на енергийни, производствени и измервателни данни. Моделът подпомага проследимостта на данните, откриването на зависимости и използването на енергийна информация за управленски решения.
3. Предложен е практически подход за мониторинг на показатели за качеството на електроенергията, включително напрежение, честота, активна и реактивна мощност, фактор на мощността и хармонични изкривявания. Този подход може да бъде използван за изграждане на интелигентни функции за диагностика и контрол в EnMS.
4. Разработени са механизми за анализ на енергийните показатели и откриване на неефективност чрез комбиниране на семантично описание, правила и аналитични методи. Това подпомага ранното идентифициране на отклонения от нормалните режими на работа.
5. Реализирана е приложна схема за използване на алгоритъма на скакалците при оптимално разпределение на реактивната мощност и компенсация на $\cos \varphi$ в индустриална електрическа мрежа. Получените резултати показват приложимостта на метода като инструмент за подпомагане на решения при управление на компенсационни устройства.
6. Предложените онтологични модели, архитектурни решения и алгоритмични процедури могат да бъдат адаптирани към други индустриални предприятия, в които е необходимо интегриране на енергиен мониторинг, производствен контекст, семантична оперативна съвместимост и AI-базирана оптимизация.
7. Разработеният подход създава предпоставки за надграждане на традиционните системи за енергиен мениджмънт към интелигентни EnMS от следващо поколение, включващи предсказващ анализ, препоръчващи системи, цифрови двойници и адаптивно управление на енергийните процеси.
8. Получените резултати имат практическо значение за повишаване на енергийната ефективност, подобряване на оперативната прозрачност, намаляване на неефективните режими и подпомагане на устойчивото управление на енергийните ресурси в индустриални предприятия.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. П. Кесова, И. Бачкова (2015), Мерки за подобряване ефективността на системите за енергиен мениджмънт, 23-ти Международен симпозиум „Управление на енергийни, индустриални и екологични системи“, 14 – 15 май 2015 г., Банкя, стр.91-94, ISSN C633-590X. – **10 точки**
2. Кесова П., Бачкова И. (2018), Подобряване на системите за енергиен мениджмънт с използване на Индустриален Интернет на Нещата, 26 международен симпозиум „Управление на енергийни, индустриални и екологични системи“, 10-11 май 2018 г. Банкя, стр. 93-96, ISSN C633-590X; сп. "Автоматика и информатика" бр.1, стр. 45 – 49, 2018 г. – **10 точки**.
3. Кесова П., Бачкова И. (2019), Анализ на данни в системите за енергиен мениджмънт за оптимизация на реактивната мощност, 27 международен симпозиум „Управление на енергийни, индустриални и екологични системи“, 10-11 май 2019 г. Банкя, стр. 93-96, ISSN C633-590X. – **10 точки**.
4. Полина Кесова (2023), Оптимално разпределение на реактивните мощности и компенсация на $\cos \varphi$ в електрическите инсталации на основно производство в предприятие, XX Национална Младежка Научно-Практическа Конференция, 15 – 17.11.2023 г., ФНТС-София. – Първо място в секция Енергетика и Автоматизация; сп. "Минно дело и геология", бр.5, 2024 г. – **20 точки**

Участие в научни постерни сесии

1. Кесова П., Бачкова И., Стандартизиран подход за подобряване на системите за енергиен мениджмънт, XIV Научна постерна сесия за млади учени, докторанти и студенти на ХТМУ, 19.05.2017, София.

АПРОБАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Резултатите от дисертационния труд са представени на международни симпозиуми по управление на енергийни, индустриални и екологични системи, национални научно-практически конференции, конференцията BULCAMC и научна постерна сесия на ХТМУ. Две разработки са отличени с първо място в секция „Енергетика и автоматизация“ на национални младежки научно-практически конференции. Публикациите обхващат подобряване на EnMS, IoT интеграция, анализ и оптимизация на реактивната мощност, мониторинг на качеството на електроенергията, приложение на AI/ML и обзор на интелигентни референтни архитектури.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработеният дисертационен труд предлага последователен преход от нормативната и методологичната основа на ISO 50001 към семантично интегрирана, интелигентна и оптимизационно подпомагана система за енергиен мениджмънт. Онтологията ontoEnMS, съгласуването с IEC 62264 и SOSA/SSN, графът от знания, двупосочната OPC UA ↔ OWL интеграция, механизмите за мониторинг и откриване на аномалии и GOA-базираното управление на реактивната мощност формират единна научна и приложна рамка. Получените резултати могат да бъдат адаптирани към различни енергоемки производства и да послужат за надграждане на традиционни EnMS към системи от следващо поколение.