

ION-NTD INTEGRATED INFORMATION SYSTEM FOR HEAT TREATMENT PROCESS MANAGEMENT THROUGH VALUE-ORIENTED APPROACH - ARCHITECTURE AND ECONOMIC MODELING

Ilia Zumbilev

University of agribusiness and rural development, Plovdiv, Bulgaria

Abstract: This study examines how modern integrated information systems transform traditional heat treatment operations through a unified five-layer architecture connecting physical processes with financial performance. The research analyzes the evolution from isolated SCADA systems to integrated Manufacturing Execution System platforms based on Industry 4.0 principles. Key investigated components include architectural integration between sensor networks, supervisory systems, MES layer, ERP integration, and business intelligence layer. Special attention is given to real-time economic modeling through activity-based costing approach, which transforms static spreadsheets into dynamic calculation engines. The methodology encompasses analysis of contemporary literature from the period 2023-2025, including research on digital twins for industrial furnaces and Industry 4.0 implementations. Results demonstrate how the unified data model enables automated workflows from production order to financial reporting, eliminating information barriers. Conclusions emphasize the necessity of holistic architectural integration as a foundation for value creation in modern heat treatment enterprises.

Keywords: integrated information systems, heat treatment, Industry 4.0, Manufacturing Execution System, real-time cost calculation, data architecture, IoT, digital transformation, kilowatt-hour optimization, manufacturing efficiency.

ИНТЕГРИРАНА ИНФОРМАЦИОННА СИСТЕМА ION-NTD ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ПРОЦЕСИ ПРИ ТЕРМИЧНО ОБРАБОТВАНЕ ЧРЕЗ ПОДХОД, ОРИЕНТИРАН КЪМ СТОЙНОСТТА - АРХИТЕКТУРА И ИКОНОМИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ

Илия Зюмбилев

Висше училище по агробизнес и развитие на регионите - Пловдив

Резюме: Настоящото изследване разглежда как съвременните интегрирани информационни системи трансформират традиционните операции по термична обработка чрез единна петслойна архитектура, свързваща физическите процеси с финансовото представяне. Проучването анализира еволюцията от изолирани SCADA системи към интегрирани Manufacturing Execution System платформи, базирани на Industry 4.0 принципи. Основните изследвани компоненти включват архитектурната интеграция между сензорни мрежи, надзорни системи, MES слой, ERP интеграция и бизнес интелигентен слой. Специално внимание е отделено на икономическото моделиране в реално време чрез подход, базиран на изчисление на разходи по дейности, който трансформира статичните електронни таблици в динамични машини за изчисляване. Методологията обхваща анализ на съвременна литература от периода 2023-2025 година, включително изследвания върху дигитални близнаци за индустриални пещи и Industry 4.0 внедрявания. Резултатите демонстрират как унифицираният модел на данни позволява автоматизирани работни потоци от производствена поръчка до финансово отчитане, елиминирайки информационни препятствия. Изводите подчертават необходимостта от холистична архитектурна интеграция като основа за създаване на стойност в съвременните термообработващи предприятия.

Ключови думи: интегрирани информационни системи, термична обработка, Industry 4.0, Manufacturing Execution System, изчисление на разходи в реално време, архитектура на данни, IoT, дигитална трансформация, киловатчас оптимизация, производствена ефективност.

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременната производствена среда изисква фундаментална промяна в управлението на процесите за термична обработка. Традиционните подходи, базирани на изолирани контролни системи, създават информационни препятствия, които пречат на оптимизацията и ограничават конкурентоспособността. Появата на концепцията Industry 4.0 и развитието на киберфизични системи предлагат нови възможности за интегриране на технологичните операции в цялостен процес на генериране на стойност [1].

Необходимостта от настоящото изследване произтича от нарастващите изисквания към производствените предприятия за термична обработка да осигурят не само технологично съвършенство, но и пълна прозрачност на разходите, проследимост на процесите и икономическа ефективност. Съвременните пазарни условия, особено в секторите на аерокосмическата индустрия, автомобилостроенето и медицинските устройства, налагат строги изисквания за документиране и контрол на качеството, които традиционните системи не могат адекватно да адресират.

Скоросни изследвания [2] подчертават значението на дигиталната трансформация в областта на термичната обработка. Франк и Ели описват приложението на дигитални

близнаци за оптимизация и контрол на индустриални пещи, докато конференцията E3S Web представя нови стратегии за подобрена производителност и устойчивост. Изследването на MDPI от 2020 година за интегрирани и мрежови системи в топлинното процесно инженерство полага основите на архитектурния подход, който е централен за настоящата работа.

Целта на първата част от настоящото изследване е да анализира архитектурните принципи и икономическите модели, които стоят в основата на съвременните интегрирани информационни системи за управление на процесите при термична обработка. Конкретно, изследването има следните цели:

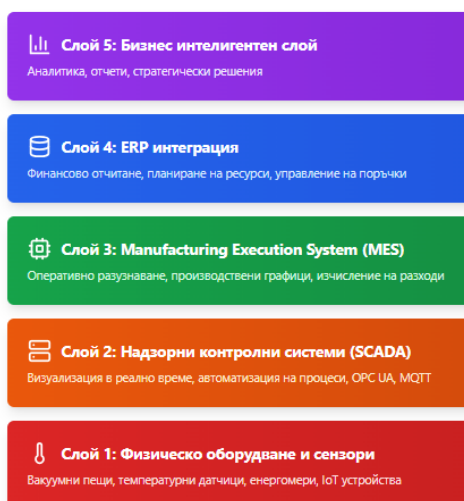
Първо, да документира еволюцията от фрагментирани контролни системи към унифицирани Manufacturing Execution System платформи и да идентифицира ключовите технологични промени, които правят възможна тази трансформация. Второ, да опише петслойната архитектура, която свързва физическото оборудване с бизнес интелигентния слой чрез стандартизирани протоколи и единен модел на данни. Трето, да анализира как икономическото моделиране в реално време трансформира финансовата предвидимост и подкрепата при вземане на решения чрез динамично изчисление на разходите, базирано на дейности.

Изследването се базира на анализ на съвременна литература от периода 2020-2025 година, включително академични публикации, индустриални доклади и технологични прегледи [3-5]. Методологията включва систематичен преглед на архитектурните подходи, документиращи в литературата, и техния синтез в цялостна рамка, приложима за различни типове термообработващи операции.

ЕВОЛЮЦИЯ ОТ ОТДЕЛНОТО ЧАСТИЧНО КЪМ ОБЩОТО ИНТЕГРИРАНО

Традиционните съоръжения за термично обработване работеха чрез отделени системи, където SCADA платформите контролираха параметрите на пещта, електронни таблици управляваха изчисления на разходите, а системите за планиране на ресурсите на предприятието проследяваха поръчките независимо. Тази разделеност в етапите създаваше информационни препятствия, пречещи за реализирането на пълна оптимизация.

Преходът от изолирани архитектури за управление към индустриално специфични Manufacturing Execution System решения и платформи с Internet of Things е документиран като водеща тенденция в съвременната литература. Изследването на MDPI за интегрирани и мрежови системи подчертава необходимостта от дигитална трансформация в топлинното процесно инженерство, която надхвърля традиционната автоматизация.



Фиг. 1. Петслойна архитектура на интегрирани информационни системи

Този преход осигурява управление на платформа, предиктивно балансиране на натоварването и събиране на данни в реално време, както е валидирано в скорошни пазарни проучвания за периода 2025-2033 година [5].

Съвременната смяна на изолирани компоненти с интегрирана архитектура на Manufacturing Execution System установява двупосочни потоци от данни между физическото оборудване и стратегическия бизнес интелигентен слой. Преходът към принципите на Industry 4.0 въвежда киберфизични системи, при които вакуумни пещи, камери за нитридиране и апаратура за гасене се превръщат в активи за генериране на данни, свързани чрез индустриалната инфраструктура на Internet of Things.

Всеки термичен цикъл създава голям комплект от данни, обхващащ температурни профили, консумация на енергия, използване на газ, време за обработка и характеристики на материала. Усъвършенстваните информационни системи се базират на този опит от оперативни данни и ги превръщат в икономически виждания чрез прилагане на модели за изчисление на разходи, базирани на дейност, които точно разпределят разходите към конкретни производствени партии, позволявайки прецизен анализ на рентабилността на ниво компоненти.

Доклад на [7] за дефинирането на термична обработка в контекста на Industry 4.0 подчертава трансформационния потенциал на интегрираните системи. Изследването показва как традиционните подходи, базирани на периодично събиране на данни и ръчна обработка, са заменени от непрекъснати потоци от информация, които позволяват реакции в реално време на променящите се условия.

ЕДИННА АРХИТЕКТУРА, СВЪРЗВАЩА ПРОЦЕСА С ПЕЧАЛБАТА

Ефективността на съвременните информационни системи зависи фундаментално от архитектурната интеграция през пет различни, но взаимосвързани слоя. Основата се състои от физическо оборудване, оборудвано със сензори, които следят критични параметри като температура на камерата, вакуумно налягане, атмосферен състав, скорости на охлаждане и енергопотребление. Тези измервания се изкачват нагоре чрез индустриални протоколи като OPC UA и MQTT към надзорни контролни системи, които осигуряват визуализация в реално време и автоматизират процесите [8].

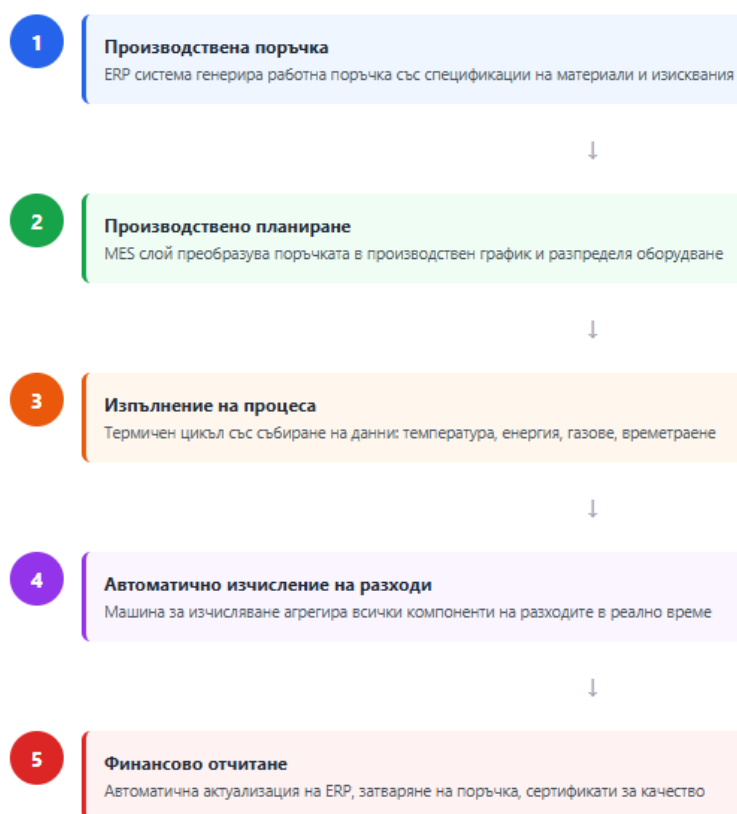
Третият слой включва системата за изпълнение на производството, играеща роля на център за оперативно разузнаване. Този слой получава работни поръчки от системите за планиране на ресурсите на предприятието, превръща ги в производствени графици, проследява потоците на материалите през различни етапи на термично обработване и документира измервания на качеството. Критично е, че MES слой реализира динамични машини за изчисляване на разходите, които автоматично изчисляват разходите за всеки цикъл на обработка чрез агрегиране на данни от множество източници.

Отчитането на електроенергия осигурява консумация на киловатчас, сензорите за поток на газ отчитат използването на аргон или амоняк, системите за управление на поддръжката допринасят за разпределение на амортизацията на оборудването, а човешките ресурси осигуряват разходите за труд въз основа на реалните разпределения на смени.

Интеграцията работи чрез унифициран модел на данни, при който основните бизнес обекти, включително материали, компоненти, оборудване и персонал, поддържат последователни дефиниции на всички системни слоеве. Когато вакуумната пещ завърши цикъл на карбуризация, събитието задейства автоматизирани работни потоци, които актуализират позициите на инвентара в ERP системата, затварят производствени поръчки в

MES, записват сертификати за качество в системата за управление на качеството и изчисляват реалните разходи спрямо бюджетните цели.

Изследването [9] относно интелигентни индустриални фурни и пещи чрез комбинацията Industry 4.0 и Industrial Internet of Things демонстрира как стандартизираните протоколи за комуникация позволяват безпроблемна интеграция между различни производители на оборудване и софтуерни платформи. Тази синхронизация елиминира ръчния трансфер на данни и гарантира, че финансовите отчети отразяват действителното оперативно представяне без забавяния в съгласуването.



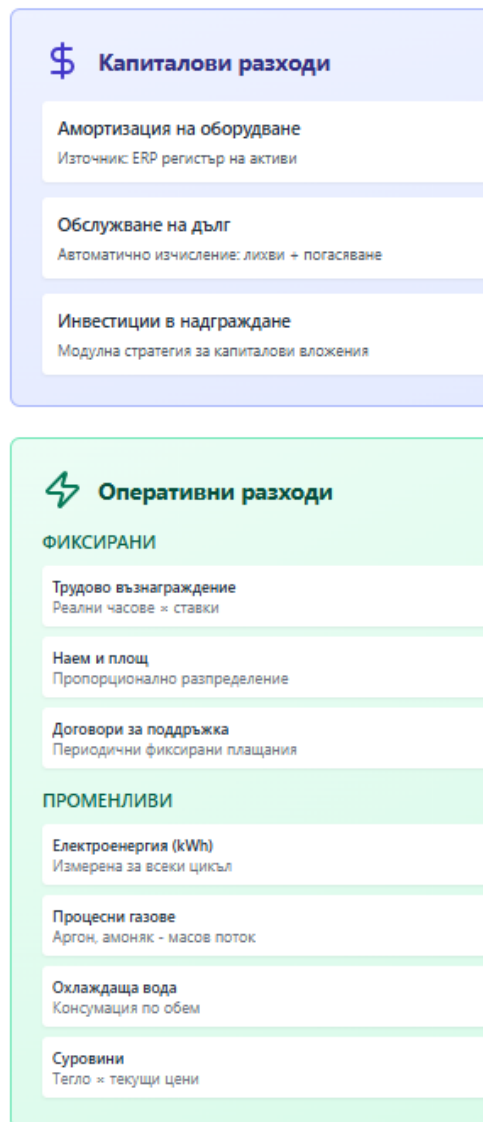
Фиг. 2. Автоматизиран поток на данни от поръчка към финансово отчитане

Последните изследвания [10] подкрепят приемането на петслойни архитектури, които дълбоко интегрират потоци от данни за SCADA, MES, ERP и усъвършенствана аналитика, позволявайки точна атрибуция на разходите и проследимост в реално време. Индустриалните стандарти като AMS2750 и CQI-9 се отразяват в усилията за хармонизиране на документацията и подобряване на съответствието на процесите.

ИКОНОМИЧЕСКИ АКЦЕНТ ПРИ МОДЕЛИРАНЕТО В СИСТЕМИТЕ ЗА РЕАЛНО ВРЕМЕ

Преходът на икономическото моделиране от статични електронни таблици към динамични информационни системи представлява значителен напредък във финансовата предвидимост и подкрепата при вземане на решения. Подходите от досегашния опит за изчисляване на разходите се основаваха на периодични ръчни актуализации, при които счетоводителите разпределяха месечните разходи по производствените обеми чрез предварително определени ставки. Тази методология предостави ограничена приложима информация, тъй като ръководството научи за разликите в разходите седмици след тяхното настъпване, когато коригиращите действия станаха значително по-трудни за прилагане.

Съвременните информационни системи вграждат сложни модели на разходите директно в слоя за изпълнение на производството, позволявайки икономическо наблюдение в реално време, което паралелно следва оперативното проследяване. Архитектурата на системата прави разлика между капиталови разходи, свързани с придобиване на оборудване, и оперативни разходи, свързани с текущи дейности по обработка. Компонентите на капиталовите разходи, включително амортизационни такси, тежат от регистрите на дълготрайните активи, поддържани в ERP системата, докато изчисленията за обслужване на дълга автоматично включват текущите лихвени проценти и оставащите графици за плащания.



Фиг. 3. Подробна структура на разходите с интеграция на данни в реално време

Оперативните разходи се делят на фиксирани и променливи категории въз основа на връзката им с обема на производството. Фиксираните разходи обхващат трудовото възнаграждение, изчислено от реалните работни часове от оператори и ръководители по съответните им ставки, наем, разпределен пропорционално на площта на оборудването, и периодични договори за поддръжка. Променливите разходи включват прецизно измерена консумация на електрическа енергия за всеки цикъл на пещта, процесни газове,

проследявани чрез контролери на масовия поток, консумация на охлаждаща вода и разходи за суровините, базирани на теглото на партидата и текущите цени на доставката.

Машината за изчисляване на разходите се изпълнява веднага след завършване на цикъла, като агрегира всички релевантни компоненти на разходите и ги дели на количеството обработени части, за да определи единичните разходи. Този детайлен подход разкрива факторите на разходите с безпрецедентна резолюция, позволявайки на ръководството да идентифицира специфични параметри на обработка, които генерират прекомерни разходи, или конфигурации на оборудване, които работят неефективно.

Термоикономическият анализ на слънчево подпомагани индустриални отоплителни системи, публикуван [11], демонстрира приложението на усъвършенствани методи за моделиране на разходи в термични процеси. Финансовата прозрачност надхвърля вътрешното отчитане, за да поддържа точни оферти за клиенти, където търговските екипи могат да базират ценовите решения на базата на реални исторически разходи за подобни геометрии на компоненти и спецификации на материали, а не на груби оценки.

Моделите на разходи, базирани на дейности, и модулната инвестиционна стратегия са в съответствие с най-добрите практики, описани в съвременната литература за термоикономически анализ и гъвкава симулация за индустриално енергийно планиране. Изследването на [12] КТН Royal Institute of Technology за анализ, базиран на симулация на дискретни събития и гъвкави фабрични концепции, подчертава значението на моделирането в реално време за оптимизация на производствените процеси.

ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Първата част от настоящото изследване демонстрира как архитектурната интеграция и икономическото моделиране в реално време формират основата на съвременните информационни системи за управление на процесите при термична обработка. Петслойната архитектура, свързваща сензорните мрежи с бизнес интелигентния слой чрез стандартизирани протоколи, елиминира информационните препятствия, характерни за традиционните изолирани системи.

Преходът от статични електронни таблици към динамични машини за изчисляване на разходите представлява фундаментална промяна във финансовата предвидимост. Възможността за изчисляване на реални разходи веднага след завършване на производствения цикъл, чрез агрегиране на данни от множество източници, осигурява безпрецедентна прозрачност и подкрепа при вземане на решения.

Унифицираният модел на данни, при който основните бизнес обекти поддържат последователни дефиниции на всички системни слоеве, позволява автоматизирани работни потоци от производствена поръчка до финансово отчитане. Тази синхронизация гарантира, че оперативното представяне се отразява незабавно във финансовите системи без необходимост от ръчна обработка или съгласуване.

Анализът на съвременната литература от периода 2020-2025 година потвърждава тенденцията към дълбока интеграция между физическите процеси и икономическото моделиране. Изследванията на водещи институции и индустриални лидери демонстрират измеримите ползи от архитектурния подход, описан в настоящата работа.

Представената архитектурна рамка и подход към икономическото моделиране формират основата за по-нататъшния анализ на създаването на стойност чрез интелигентна аналитика, измерване на представянето и стратегическо развитие, които ще бъдат разгледани във втората част от изследването. Успешното внедряване на тези принципи изисква холистичен подход, който балансира техническата сложност с организационната готовност и оперативната надеждност.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Bongomin, O., et al. (2025). Digital twin technology advancing Industry 4.0 and Industry 5.0. *Journal article in press*.
2. Hachem, E., & Pigeonneau, F. (2024). Digital twins for heat treatment, optimization and control of industrial furnaces: The TwinHeat industrial chair. *MINES Paris – PSL / ANR project communication*.
3. HBS Group. (2024). The role of MES in Industry 4.0. *Technical article*.
4. Ispir, A. C., et al. (2025). Digital twin development of a fullscale industrial heat pump. *Technical report*. TNO.
5. Lesnyak, E., et al. (2023). Applied digital twin concepts contributing to heat and power systems decarbonization. *Big Data and Cognitive Computing*.
6. Qi, F., et al. (2024). Digitization and greening of industrial reheating furnaces. *Energy Conversion and Management*.
7. Review: Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review. (2022). *Journal of Manufacturing Systems*.
8. Leveraging intelligent manufacturing execution systems for digital transformation in the F&B sector. (2025). *Journal of Intelligent Manufacturing and Systems Engineering*.
9. Modeling and simulation of a flexible manufacturing system—A basic component of Industry 4.0. (2020). *Applied Sciences*, 10(22), Article 8300.
10. Unlocking growth in heat treatment simulation software market, 2019–2033. (2024). *Industry market analysis report*.
11. A framework for sustainable manufacturing: Integrating Industry 4.0 technologies with Industry 5.0 values. (2024). *Sustainability*, 16(4), Article 1364.
12. Review of Industry 4.0 from the perspective of automation and supervision systems: Definitions, architectures and recent trends. (2024). *Electronics*, 13(4), Article 782.

