



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЧНО И СИСТЕМНО ИНЖЕНЕРСТВО
КАТЕДРА „АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ПРОИЗВОДСТВОТО“

Маг. инж. Йордан Ангелов Белев

**ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗГРАЖДАНЕ НА ИНТЕЛИГЕНТНА
СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ В МЕБЕЛНОТО ПРОИЗВОДСТВО**

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
проф. д-р инж. Георги Попов – ТУ-София

Научно жури:

1. Доц. д-р Светла Лекова, ХТМУ - София - председател
2. Проф. д-р Идилия Бачкова, ХТМУ - София
3. Проф. д-р Тодор Стоилов, ИИКТ на БАН
4. Проф. д-р Галина Николчева, ТУ - София
5. Доц. д-р инж. Денис Чикуртев, ТУ - София

София, 2026

Дисертационният труд е написан на 214 страници, съдържа 65 фигури и 63 таблици. Цитирани са 126 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 22.06.2026 година

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на от часа в зала, сграда „.....” на ХТМУ.

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

СЪДЪРЖАНИЕ

ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ	5
УВОД.....	6
ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	7
Актуалност на темата	7
Обект и предмет на изследването	7
Изследователски проблем.....	7
Цел и задачи на дисертационния труд.....	8
Методи и средства на изследването	9
Структура и обем.....	9
КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	10
ПЪРВА ГЛАВА. ОБЗОР НА МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА МЕБЕЛНИ ПРОИЗВОДСТВА	10
Терминологична рамка: от модернизация към интелигентно производство	10
Особености на мебелното производство	11
Интелигентни методи за детайлно планиране	12
Референтни рамки и архитектури	13
Изводи от Първа глава	14
ВТОРА ГЛАВА. ОЦЕНКА НА ЗРЕЛОСТТА НА МИКРО-, МАЛКИ И СРЕДНИ ПРЕДПРИЯТИЯ.....	14
Сравнителен анализ на моделите за зрелост и готовност.....	14
Структура на разработения метод.....	15
Логика за препоръки и пътна карта	15
Пример за оценяване	15
Резултати по области на способности	16
Реализация в Google Sheets с генеративен интелект.....	17
Изводи от Втора глава.....	18
ТРЕТА ГЛАВА. МОДЕРНИЗАЦИЯ И КООРДИНИРАЩО УПРАВЛЕНИЕ НА ПРОИЗВОДСТВЕНИ СИСТЕМИ	18
Обект на модернизацията	18
Модернизация на осцилиращото движение.....	19
Модернизация на транспортната лента	20

Модернизация на главния калибровъчен вал	21
Оценка на ефекта от модернизацията.....	21
Координиращо управление на взаимосвързаните процеси	22
Режими, логика и защиты.....	23
Изводи от Трета глава	24
ЧЕТВЪРТА ГЛАВА. ИНТЕЛИГЕНТЕН ПОДХОД ЗА ОПТИМАЛНО ПЛАНИРАНЕ НА ОПЕРАЦИИТЕ	25
Постановка на задачата	25
Формална математическа постановка	25
Комбиниран подход	26
Модел съгласно IEC/EN 62264.....	27
Резервиране на производствен капацитет чрез алгоритъма на раницата	28
Енергийно ограничение	29
Времеви автомати и формална верификация	30
Производствен пример.....	32
Изводи от Четвърта глава	33
ПЕТА ГЛАВА. АРХИТЕКТУРА НА ИНТЕЛИГЕНТНА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА МЕБЕЛНА ФИРМА	34
Многогравнищна архитектура	34
SCADA/HMI и операторски функции	35
MES ниво и информационни потоци.....	37
Енергиен мениджмънт	38
Техническа и софтуерна реализация	38
Изводи от Пета глава.....	40
ОБЩИ ИЗВОДИ.....	41
ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА	42
I. Научни приноси.....	42
II. Научно-приложни приноси.....	43
III. Приложни приноси.....	43
ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	43
АПРОБАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44

ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ

Съкращение	Наименование на английски	Наименование на български
AI	Artificial Intelligence	Изкуствен интелект
CPS	Cyber-Physical Systems	Киберфизични системи
ERP	Enterprise Resource Planning	Планиране на ресурсите на предприятието
HMI	Human–Machine Interface	Човеко-машинен интерфейс
IEC	International Electrotechnical Commission	Международна електротехническа комисия
IEC/EN	IEC / European Standard	Международен/европейски стандарт
IIRA	Industrial Internet Reference Architecture	Референтна архитектура на индустриалния интернет
KPI	Key Performance Indicator	Ключов показател за ефективност
MES	Manufacturing Execution System	Система за управление на производствените операции
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture	Унифицирана архитектура за комуникации с отворена платформа
PID	Proportional–Integral–Derivative	Пропорционално-интегрално-диференциален регулатор
PLC	Programmable Logic Controller	Програмируем логически контролер
PROFINET	Process Field Network	Индустриална Ethernet комуникационна мрежа
RAMI 4.0	Reference Architectural Model Industrie 4.0	Референтен архитектурен модел за Индустрия 4.0
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	Супервайзорно управление и събиране на данни
TIA Portal	Totally Integrated Automation Portal	Среда за напълно интегрирана автоматизация
UPPAAL	Integrated tool environment for timed automata	Интегрирана програмна среда за времеви автомати
VFD	Variable Frequency Drive	Честотно регулируемо задвижване
WinCC	Windows Control Center	SCADA/HMI платформа на Siemens
МСП	—	Малки и средни предприятия

УВОД

Развитието на информационните и комуникационните технологии, индустриалната автоматизация и изкуствения интелект променя начина, по който се проектират, управляват и оптимизират производствените системи. В условията на Индустрия 4.0 производството се разглежда като интегрирана киберфизическа среда, в която машините, сензорите, операторите и информационните системи обменят данни и съвместно подпомагат управленските решения. Преминаването към умно и интелигентно производство обаче не се осъществява чрез еднократно внедряване на отделна технология. То изисква последователно надграждане на техническата, информационната и организационната инфраструктура.

Дървообработващата и мебелната индустрия се характеризира с голямо продуктово разнообразие, малки и средни серии, индивидуални клиентски поръчки, различни технологични маршрути и високи изисквания към гъвкавостта. В значителна част от микро-, малките и средните предприятия се използва технологично годно, но морално остаряло оборудване с локални системи за управление и ограничени възможности за събиране на данни. Това затруднява директното прилагане на цялостни решения за Индустрия 4.0 и налага поэтапен, икономически обоснован подход.

Дисертационният труд разглежда този преход като свързана последователност от дейности: оценяване на готовността на предприятието; модернизация на ключови производствени възли; изграждане на координиращо управление; разработване на метод за оптимално планиране на операциите; и интегриране на резултатите в многослойна архитектура на интелигентна система за управление. По този начин локалната автоматизация се превръща в основа за цифровизация, оперативна прозрачност, енергиен мониторинг и интелигентно вземане на решения.

Основната научна и практическа насоченост е към решения, които са достатъчно формализирани и технологично обосновани, но остават приложими за предприятия с ограничени ресурси. Разработките обединяват методи за оценка на зрелостта, програмируемо управление, SCADA/HMI, MES функции, алгоритъма на раницата, времеви автомати, стандартите IEC/EN 62264 и IEC 61131-3, както и комуникационни механизми като PROFINET и OPC UA.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на темата

Актуалността на изследването се определя от необходимостта мебелните предприятия да повишат производителността, качеството, енергийната ефективност и способността си да изпълняват персонализирани поръчки при кратки срокове. За постигането на тези цели не е достатъчно да се автоматизират отделни операции. Необходимо е производствените възли да бъдат свързани информационно, тяхната работа да се координира, а оперативните решения да се основават на реални данни, модели и формализирани ограничения.

Особено значим е проблемът при микро-, малките и средните предприятия, където финансовите и кадровите ресурси са ограничени, а оборудването често е разнородно. Подходът трябва да допуска модернизация на съществуващи машини, да използва стандартни промишлени средства за автоматизация и да предоставя ясна пътна карта за развитие. Интегрирането на енергийните ограничения в координацията и планирането е допълнително важно поради високата мощност на основните машини и ограничената присъединена мощност на производствените цехове.

Научният интерес се свързва с едновременното решаване на няколко взаимнозависими задачи: оценка на готовността; формализиране на прехода от модернизация към интелигентно управление; избор на производствени операции при ограничен капацитет; верификация на технологичната и времевата изпълнимост; и архитектурна интеграция между ERP, MES, SCADA/HMI и PLC.

Обект и предмет на изследването

Обект на изследване са производствените процеси в мебелното производство, включително процесите на шлифоване и калибриране на дървени детайли, събирането и оползотворяването на дървесните отпадъци, както и свързаните материални и енергийни потоци.

Предмет на изследване са методите, моделите, алгоритмите и техническите средства за проектиране и изграждане на интелигентна система за управление на тези процеси: метод за оценка на готовността, решения за модернизация, координиращо управление, оптимално планиране на операциите и многоравнищна информационно-управляваща архитектура.

Изследователски проблем

Изследователският проблем се състои в липсата на цялостен и практически приложим подход за проектиране и внедряване на интелигентна система за управление в мебелно микро-, малко или средно предприятие. Съществуващите модели за Индустрия 4.0 често предполагат развита цифрова инфраструктура, а методите за производствено планиране не винаги отчитат едновременно ограниченията по машинен капацитет, технологична последователност, бункерен и складов капацитет, срокове и електрическа мощност.

Необходим е подход, който свързва поетапната модернизация на съществуващото оборудване с формални и оптимизационни методи на MES равнище.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е да се разработи и приложи подход за проектиране и изграждане на интелигентна система за управление в мебелното производство, съобразена със спецификата на микро-, малките и средните предприятия, която осигурява поетапна модернизация, събиране и използване на производствени и енергийни данни, координирано управление на процесите и интелигентно детайлно планиране на операциите.

За постигане на така формулираната цел се поставят следните основни задачи:

1. Да се анализират съвременните концепции за умно и интелигентно производство и да се изясни връзката им с автоматизацията, цифровизацията, модернизацията и интелигентното управление.
2. Да се проучат моделите за зрялост и готовност за Индустрия 4.0 и да се оцени приложимостта им към микро-, малки и средни предприятия от мебелния сектор.
3. Да се разработи адаптиран метод за оценка на готовността на мебелни микро-, малки и средни предприятия, отчитащ технологични, организационни, информационни, ресурсни и управленски фактори.
4. Да се анализират технологичните и организационните особености на дървообработващата и мебелната промишленост, влияещи върху управлението, автоматизацията, планирането и цифровата трансформация.
5. Да се проектират и реализират решения за модернизация на системите за управление на ключови възли на широколентова шлифовъчна машина.
6. Да се разработи подход за интелигентно координиращо управление, свързващ производствени ресурси, технологични операции, информационни потоци и управленски решения.
7. Да се изследват методи за интелигентно детайлно планиране, включително избор на операции при ограничен капацитет и формална проверка на изпълнимостта на графика.
8. Да се разработи метод за детайлно планиране с алгоритъма на раницата за избор на операции или поръчки при ограничени производствени ресурси, време и капацитет.
9. Да се разработи метод за моделиране и проверка на производствени графици чрез времеви автомати, отчитащ технологичната последователност, времевите ограничения и заетостта на ресурсите.
10. Да се проучи приложимостта на референтни рамки и архитектури за умни и интелигентни производства при разработването на адаптирана архитектура за мебелно производство.

11. Да се проектира архитектура на интелигентна система за управление, интегрираща модернизирано оборудване, мониторинг, енергиен мениджмънт, координиращо управление и интелигентно планиране.

12. Да се оцени приложимостта на разработените методи, модели и архитектурни решения в условията на мебелни микро-, малки и средни предприятия.

Методи и средства на изследването

В дисертационния труд са използвани сравнителен анализ, системен и архитектурен анализ, методи за моделиране на производствени и управляващи процеси, алгоритмична оптимизация и формална верификация. Експерименталната и приложната част се основава на програмируеми логически контролери SIMATIC S7-1200, честотни преобразуватели, аналогови и дискретни измервателни канали, HMI/SCADA WinCC и инженерната среда TIA Portal. За оперативното планиране са използвани алгоритъмът на раницата и мрежи от времеви автомати, моделирани в UPPAAL. Информационната интеграция е разгледана в съответствие с IEC/EN 62264, IEC 61131-3 и принципите на многоравнищната производствена автоматизация.

Структура и обем

Дисертационният труд е структуриран във въведение, пет глави, общи изводи, приноси, списък на публикациите, апробация, библиография и приложение. Текстът е 216 страници и включва 59 фигури, 63 таблици и 126 библиографски източника. Първа глава формира теоретичната и терминологичната основа; Втора глава разработва метода за оценка на зрелостта; Трета глава представя модернизацията и координиращото управление; Четвърта глава развива комбинирания подход за оптимално планиране; Пета глава интегрира резултатите в архитектура на интелигентна система за управление.

КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ПЪРВА ГЛАВА. ОБЗОР НА МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА МЕБЕЛНИ ПРОИЗВОДСТВА

Терминологична рамка: от модернизация към интелигентно производство

В първата глава се въвежда терминологична рамка, която разграничава модернизацията, автоматизацията, цифровизацията, умното производство и интелигентното производство. Модернизацията обновява машините и системите за управление, за да повиши надеждността и функционалността им. Автоматизацията осигурява автоматично изпълнение на операции по предварително зададени правила и управляващи въздействия. Цифровизацията добавя събиране, обработка, съхранение и обмен на данни.

Умното производство се основава на свързаност, мониторинг в реално време, проследимост и координация между машини, оператори и информационни системи. Интелигентното производство надгражда тази среда чрез анализ, прогнозиране,

оптимизация и адаптивно вземане на решения. Разграничението е важно, защото системата, разработена в дисертацията, не се ограничава до автоматизация или визуализация, а използва данни, ограничения и алгоритми за оперативно управление. Йерархичната връзка между етапите на развитие е представена на фиг.1.



Фиг.1. Йерархична връзка между модернизация, автоматизация, цифровизация, умно и интелигентно производство

Особености на мебелното производство

Дървесината е естествен и анизотропен материал, чиито свойства зависят от вида, влажността, структурата и наличието на дефекти. Производственият процес включва множество последователни и взаимнозависими операции: първична обработка, сушене, рязане, пробиване, фрезоване, шлифоване, кантиране, сглобяване, повърхностна обработка и опаковане. Голямото продуктово разнообразие и индивидуалните изисквания водят до чести промени на маршрутите, настройки и пренастройки.

Основните управленски предизвикателства са непостоянното качество на суровината, координацията между множество операции, ограничените машини и квалифицирани

оператори, необходимостта от проследимост, трудното детайлно планиране, липсата на надеждни производствени данни и високата енергийна интензивност на някои процеси. Оттук следва необходимостта от гъвкаво планиране, координиращо управление, централизирано събиране на данни, контрол на качеството, енергиен мониторинг и поетапна модернизация. Спецификите и предизвикателствата на сектора са обобщени на фиг. 2.



Фиг. 1.X. Специфики и предизвикателства при прехода на дървообработващите и мебелните предприятия към интелигентно производство

Фиг.2. Специфики, предизвикателства и необходим управленски подход в дървообработващата и мебелната промишленост

Интелигентни методи за детайлно планиране

Обзорът на методите за детайлно планиране обхваща математическо програмиране, генетични и еволюционни алгоритми, меметични алгоритми, многокритериална оптимизация, обучение с поощрение, системи за подпомагане вземането на решения и цифрови двойници. Тези методи имат различни изисквания към качеството и обема на данните, изчислителните ресурси и възможността за обяснение на резултатите.

За мебелни МСП е необходим интерпретируем и поетапно внедрим подход, способен да работи с експертно зададени технологични времена и ясно формализирани ограничения. Поради това в дисертацията са избрани два взаимнодопълващи се метода: алгоритъмът на раницата за избор на операции или поръчки при ограничен капацитет и времевите автомати за формална проверка на технологичната последователност, времевите условия и ограниченията за паралелна работа. Факторите, определящи спецификата на детайлното планиране, са систематизирани на фиг.3.



Фиг. 3. Специфика на детайлното планиране в дървообработващата и мебелната промишленост

Референтни рамки и архитектури

Направен е сравнителен анализ на RAMI 4.0, IIRA, NIST CPS, IISF, FIWARE и модела 4+1 View. RAMI 4.0 предоставя йерархично и многослойно представяне на активите и жизнения им цикъл. IIRA и NIST CPS подпомагат описанието на връзките между физическите обекти, комуникацията, данните, приложенията и човешкото участие. IISF акцентира върху сигурността и доверието, а FIWARE и 4+1 View подпомагат софтуерната и контекстната интеграция.

Нито една от рамките не може да бъде приложена директно като готово решение за мебелно МСП. Разработваната архитектура използва техните принципи в опростен и практически реализуем вид: производствено ниво, PLC управление, SCADA/HMI, енергиен мониторинг, MES оперативно управление и обмен с ERP. Изводът е, че необходимият модел е адаптирана многослойна архитектура, която допуска поетапно внедряване и повторно използване на съществуващото оборудване.

Изводи от Първа глава

1. Преходът към интелигентно производство е поетапен процес, в който всяко следващо ниво надгражда техническите и информационните възможности на предходното.
2. Мебелното производство изисква специализирани решения поради продуктовото разнообразие, ограничените ресурси, честите пренастройки и сложните технологични зависимости.
3. Съществуващите модели за зрялост и референтни архитектури са полезна методологична основа, но трябва да бъдат адаптирани към условията на МСП.
4. Практически приложимият подход трябва да обединява оценка на готовността, модернизация, събиране на данни, координация, интелигентно планиране и архитектурна интеграция.
5. Комбинацията от алгоритъма на раницата и времеви автомати е подходяща за ясно формализирана и интерпретируема задача за детайлно планиране.

ВТОРА ГЛАВА. ОЦЕНКА НА ЗРЕЛОСТТА НА МИКРО-, МАЛКИ И СРЕДНИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Сравнителен анализ на моделите за зрелост и готовност

Оценяването на зрелостта предхожда инвестиционните и организационните решения. То установява текущото състояние, дефицитите и целевото ниво, а резултатите се преобразуват в приоритети и пътна карта. Разграничени са понятията готовност, зрялост, рамка и пътна карта. Готовността показва дали са налице условия за започване на промяната; зрелостта описва достигнатото ниво на способности; рамката систематизира методите и инструментите; пътната карта определя последователността на инициативите.

Сравнителният анализ показва, че повечето общи модели поставят силен акцент върху технологията, но само част от тях отчитат ограниченията на МСП. Недостатъчно са представени въпросите за ограничените финансови и кадрови ресурси, използването на остаряло оборудване, практическата приложимост на стандартите и необходимостта от конкретни стъпки след оценяването. Това обосновава разработването на опростен модел с ясни въпроси, количествена скала и автоматично генериране на препоръки.

Структура на разработения метод

Моделът е организиран в три направления – „Хора“, „Процеси“ и „Технологии“. Всяко направление включва по пет области на способности, а всяка област се оценява чрез два въпроса. Общият въпросник съдържа 30 въпроса. Тази структура осигурява баланс между управленските, организационните, производствените и техническите фактори, като запазва приложимостта към малки предприятия. Структурата на разработения модел е представена в Таблица 1.

Таблица 1. Структура на модела за оценка

Направление	Области на способности
Хора	Лидерство и стратегия; умения на операторите; дигитални умения; култура за подобрене; поддръжка и отговорности
Процеси	Стандартизирани операции; производствени поръчки; управление на престои; контрол на качеството; планирана поддръжка
Технологии	Автоматизация на машини; събиране на данни; свързаност; MES/оперативни системи; анализ и предсказване

Оценката се задава по скала от 0 до 4, където 0 означава отсъствие на практика или способност, а 4 – оптимизирана и системно управлявана способност. За всяка област се определят текуща оценка, целева стойност и приоритет. Средните стойности по направления и общата средна стойност формират профила на зрелостта. Методът не разглежда зрелостта само като едно число, а като карта на дефицитите, която насочва последващите инициативи.

Логика за препоръки и пътна карта

За всяка област са дефинирани правила, които свързват текущата оценка, целевото ниво и значението на областта с конкретна препоръка. При ниска оценка се предлагат базови действия с малка сложност и бърз ефект; при средна оценка – интеграционни и стандартизационни действия; при висока оценка – аналитични, предсказващи и оптимизационни инициативи.

Пътната карта е разделена на три времеви хоризонта. Хоризонтът 0–6 месеца включва инициативи за базова видимост и управляемост: производствени карти, кодове за престои, планова поддръжка, събиране на машинни и алармени данни, олекотена MES система и начални KPI табла. Хоризонтът 6–18 месеца включва лидерска програма, развитие на цифрови умения, стандартизирани операции и регистър на качеството. Хоризонтът 18–36 месеца обхваща стандартизирано обучение, матрица на компетенциите и модернизация на критични машини с PLC/HMI/VFD.

Пример за оценяване

Методът е приложен към предприятие от мебелния сектор. Общата средна оценка е 1,2 от 4, което съответства на начален етап на структурирана цифровизация и свързаност. Най-висока е оценката по направление „Хора“ – 1,7, следвана от „Процеси“ – 1,1 и „Технологии“ – 0,8. Резултатът показва, че практическите умения на операторите и частичната машинна автоматизация могат да бъдат използвани като основа, но липсват

системно събиране на данни, свързаност, MES и аналитични функции. Обобщените резултати от оценяването са дадени в таблица 2. Оценките по направление „Хора“ са представени в таблица 3а. Оценките по направление „Процеси“ са представени в таблица 3б. Оценките по направление „Технологии“ са представени в таблица 3в.

Таблица 2. Обобщени резултати от оценяването

Показател	Стойност	Интерпретация
Обща средна оценка	1,2 / 4	Начален етап на структурирана цифровизация и свързаност
Хора	1,7 / 4	Налични операторски умения; необходима е по-устойчива култура за KPI и подобрения
Процеси	1,1 / 4	Частично описани процеси; недостатъчна проследимост на поръчки, престои и поддръжка
Технологии	0,8 / 4	Липса на MES, анализ, предсказване и достатъчна машинна свързаност
Инвестиционен приоритет	Технологии	Инфраструктура за данни, свързаност и оперативно управление

Резултати по области на способности

Таблица 3а. Оценки по направление „Хора“

Област – Хора	Текущо	Цел 12 м.
Лидерство и стратегия	1,5	3
Умения на операторите	3,0	4
Дигитални умения	2,0	3
Култура за подобрене	1,0	2
Поддръжка и отговорности	1,0	2

Таблица 3б. Оценки по направление „Процеси“

Област – Процеси	Текущо	Цел 12 м.
Стандартизирани операции	2,0	3
Производствени поръчки	0,5	2
Управление на престои	0,5	2
Контрол на качеството	1,5	3
Планирана поддръжка	1,0	2

Таблица 3в. Оценки по направление „Технологии“

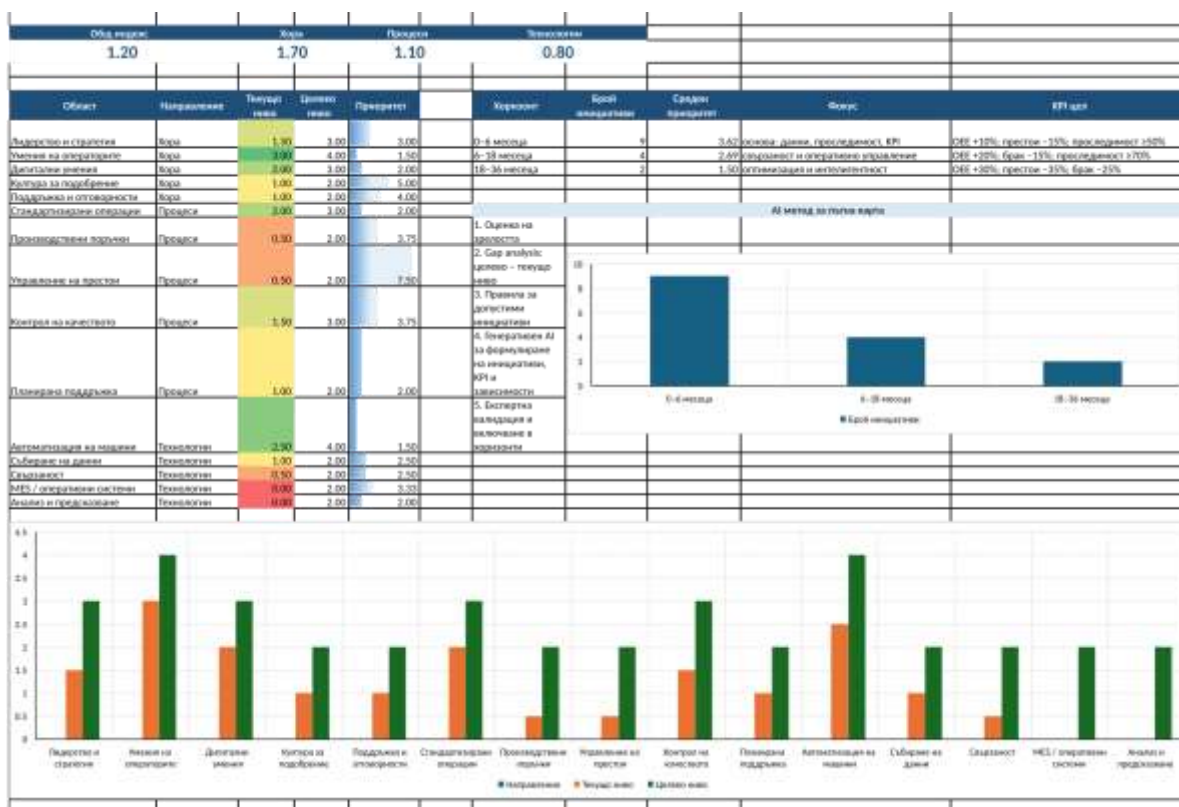
Област – Технологии	Текущо	Цел 12 м.
Автоматизация на машини	2,5	4
Събиране на данни	1,0	2
Свързаност	0,5	2

Област – Технологии	Текущо	Цел 12 м.
MES / оперативни системи	0,0	2
Анализ и предсказване	0,0	2

Реализация в Google Sheets с генеративен интелект

Практическата реализация включва листове за въпросника, изчисляване на оценките, правила за препоръки, генеративен модул, пътна карта и командно табло. Формулите изчисляват средните стойности и приоритетите, условното форматиране визуализира слабите области, а шаблонът за заявка към генеративен модел съдържа контекста на предприятието, текущата и целевата оценка, ограниченията и желаната форма на препоръката.

Генеративният интелект не заменя правилата и оценъчната логика. Той се използва за превръщане на структурирания резултат в разбираеми препоръки, обосновка и описание на стъпките. Така се запазва проследимостта на решенията, а препоръките могат да бъдат адаптирани към конкретната производствена среда. Командното табло за зрялост, приоритети и пътна карта е показано на фиг.4.



Фиг.4. Командно табло за зрялост, приоритети и пътна карта

Изводи от Втора глава

1. Разработеният метод е ориентиран към практическите ограничения на мебелните микро- и малки предприятия и използва ограничен, но достатъчен набор от показатели.

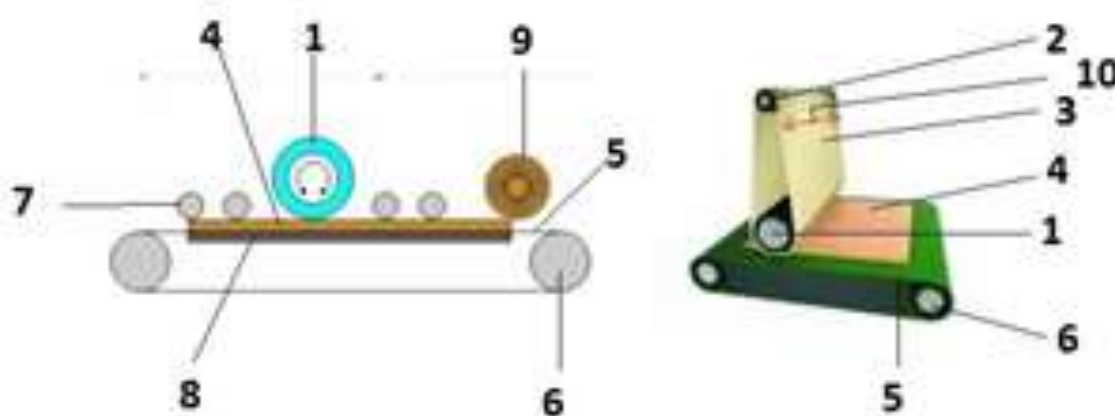
2. Оценката по направления и области позволява да се разграничат силните страни от критичните дефицити, вместо резултатът да се свежда до един общ индекс.
3. Правилата и генеративният модул превръщат оценяването в инструмент за действие чрез конкретни препоръки и трихоризонтна пътна карта.
4. Примерът показва, че първият инвестиционен приоритет е изграждането на инфраструктура за производствени данни, свързаност и MES функции.
5. Методът създава връзка между оценката на готовността и следващите етапи на дисертационния подход – модернизация, координация и интелигентно планиране.

ТРЕТА ГЛАВА. МОДЕРНИЗАЦИЯ И КООРДИНИРАЩО УПРАВЛЕНИЕ НА ПРОИЗВОДСТВЕНИ СИСТЕМИ

Обект на модернизацията

Практическата разработка започва от широколентова шлифовъчна машина, която е енергоемък и технологично важен възел. Машината извършва калибриране и шлифование чрез главни работни валове, транспортна лента и осцилиращо движение на шлифовъчния инструмент. Съществуващите системи са надеждни като базова механика, но имат ограничени възможности за регулиране, диагностика, събиране на данни и интеграция.

Избрани са три подсистеми, чието обновяване има пряк ефект върху качеството, производителността и енергопотреблението: осцилиращото движение на инструмента, транспортната лента и главният калибровъчен вал. Принципната схема на широколентовата шлифовъчна машина е показана на фиг. 5.

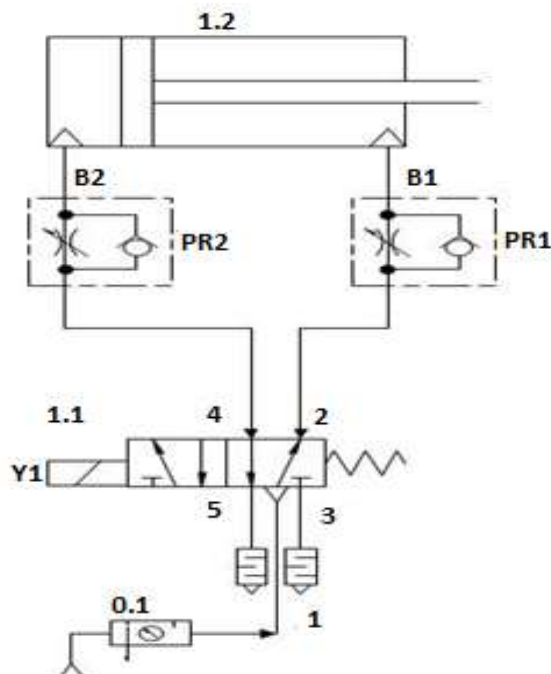


Фиг. 5. Принципна схема на широколентова шлифовъчна машина

Модернизация на осцилиращото движение

Старата система използва пневматично регистриране и управление, което води до висок постоянен разход на сгъстен въздух, чувствителност към замърсяване и ограничена диагностичност. Предложената система заменя пневматичното сигнализиране с електропневматично управление. Безконтактни датчици регистрират положението, а PLC или електронна логика управлява разпределителя и изпълнителния механизъм.

Новото решение осигурява по-точно превключване, по-малък разход на въздух, възможност за броене на циклите и диагностика на отсъстваща осцилация. Сигналите могат да се използват от по-високото ниво за мониторинг и поддръжка. Модернизираната пневматична схема за управление на осцилацията е представена на фиг.6.



Фиг.6. Пневматична схема на модернизираната система за автоматично управление на осцилацията

Модернизация на транспортната лента

При транспортната лента е въведено честотно управление, което заменя стъпковото или механичното регулиране с плавна промяна на скоростта. Заданието може да се формира от операторския интерфейс или автоматично според натоварването на главния калибровъчен вал. Честотният преобразувател осигурява плавно пуск и спиране, защита, диагностика и комуникационни сигнали.

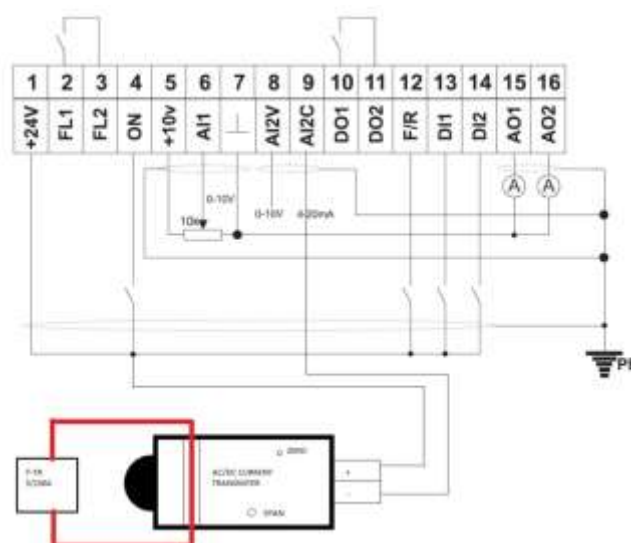
Плавното регулиране позволява скоростта на подаване да се адаптира към материала и текущия режим на шлифование. Така се намаляват претоварванията, повишава се качеството и се съкращава времето за обработка. Честотата на инвертора се превръща и в измерима производствена променлива за оценяване на производителността.

Модернизация на главния калибровъчен вал

Пускът „звезда–триъгълник“ е заменен с честотно управление. Токов преобразувател измерва натоварването на двигателя, а вграденият регулатор на честотния преобразувател формира управляващо въздействие. Токът на двигателя се използва като индиректен показател за натоварването на процеса.

Решението ограничава пусковите токове, подобрява възможностите за защита и позволява координиране на скоростта на транспортната лента с натоварването на калибровъчния вал. При нарастване на товара подаването може да бъде намалено, а при

по-нисък товар – увеличено в допустими граници. Свързването на честотния и токовия преобразувател е показано на фиг.7. Техническите резултати от модернизацията са обобщени в Таблица 4. Енергийният и производственият ефект са представени в Таблица 5.



Фиг.7. Свързване на честотния преобразувател с токовия преобразувател

Оценка на ефекта от модернизацията

Таблица 4. Технически ефект от модернизацията

Подсистема	Основно техническо подобрене
Осцилиращо движение	Замяна на пневматичното сигнализиране с електропневматично управление
Транспортна лента	Плавно регулиране на скоростта чрез честотен преобразувател
Главен калибровъчен вал	Честотно управление и измерване на товара чрез токова обратна връзка

Таблица 5. Енергиен и производствен ефект

Показател	Преди	След	Ефект
Разход на сгъстен въздух за осцилация	около 450 dm ³ /min	около 25 dm ³ /min	значително намаляване
Работа на компресора	почти непрекъсната	периодична	намалено електропотребление
Време за обработка на 100 m ²	40 min	28 min	намаление с 12 min
Електроенергия за 100 m ²	52 kWh	34 kWh	намаление с 18 kWh
Пускови токове на главния вал	високи при „звезда–триъгълник“	ограничени от VFD	по-благоприятен режим

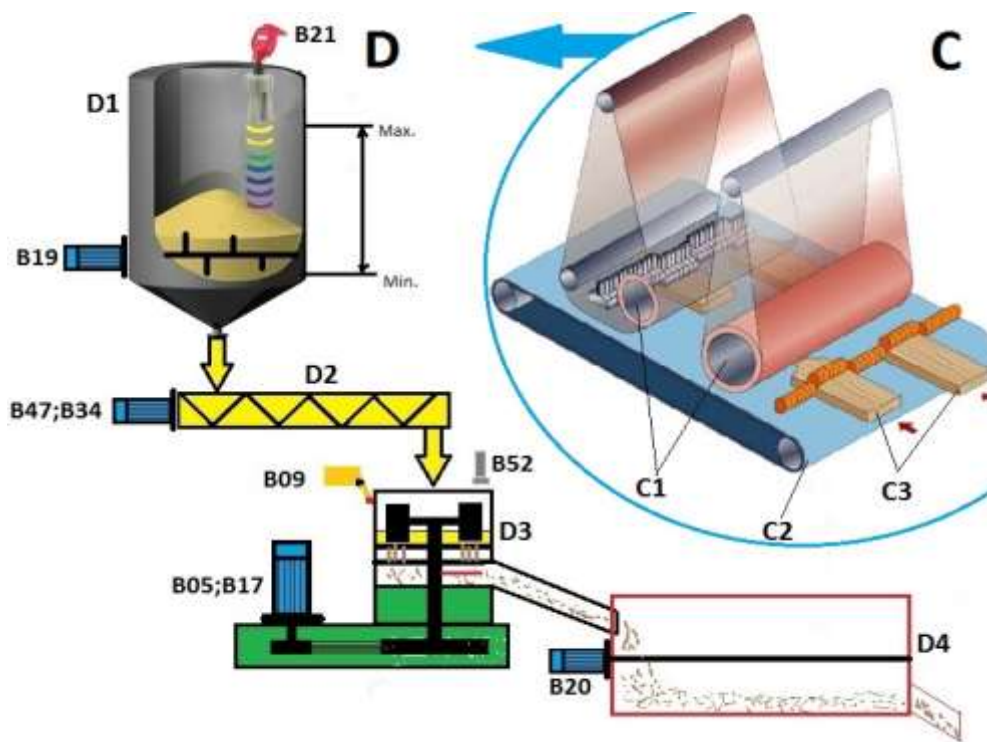
Модернизацията създава и информационен ефект. Налични стават сигналът за осцилация, токът на главния вал, честотата на транспортната лента, състоянията и

авариите на честотните преобразуватели и времето на работа. Тези данни могат да се използват за диагностика, планирана поддръжка, анализ на натоварването, енергиен мониторинг и изчисляване на производствени показатели.

Координиращо управление на взаимосвързаните процеси

След модернизацията на локалните възли е разработено координиращо управление на производствената система. Освен широколентовата шлифовъчна машина системата включва аспирация, компресор, бункер за дървесни отпадъци, дозиращ винт, пелетизираща преса, миксер, охладител и брикетизираща линия. Отпадъчният материал от шлифоването се отвежда към бункера и се използва като суровина за пелети или брикети.

Координацията е необходима поради зависимостта между образуването и потреблението на отпадъчния материал, ограничението на бункера, технологичната последователност и общото енергийно ограничение. Контролерът изпълнява ролята на координатор: приема сигнали за нива, състояния, товари и защиты; избира режим; управлява последователността на стартиране; регулира подаването; и формира алармени реакции. Технологичната структура на координираната производствена система е представена на фиг.8. Основните подсистеми и функции са систематизирани в Таблица 6.



Фиг.8. Принципна технологична схема на координираната производствена система

Таблица 6. Основни подсистеми на координиращото управление

Подсистема	Функция
Събиране на дървесни отпадъци	Постъпване на отпадъчна суровина от дървообработващите машини
Бункер	Натрупване и временно съхранение на суровината
Дозиращ винт	Регулиране на количеството към пресата

Подсистема	Функция
Пелетизираща преса	Преобразуване на суровината в пелети
Миксер и спомагателни механизми	Подготовка на суровината за пресоване
Ротационен охладител	Охлаждане и стабилизиране на пелетите

Режими, логика и защиты

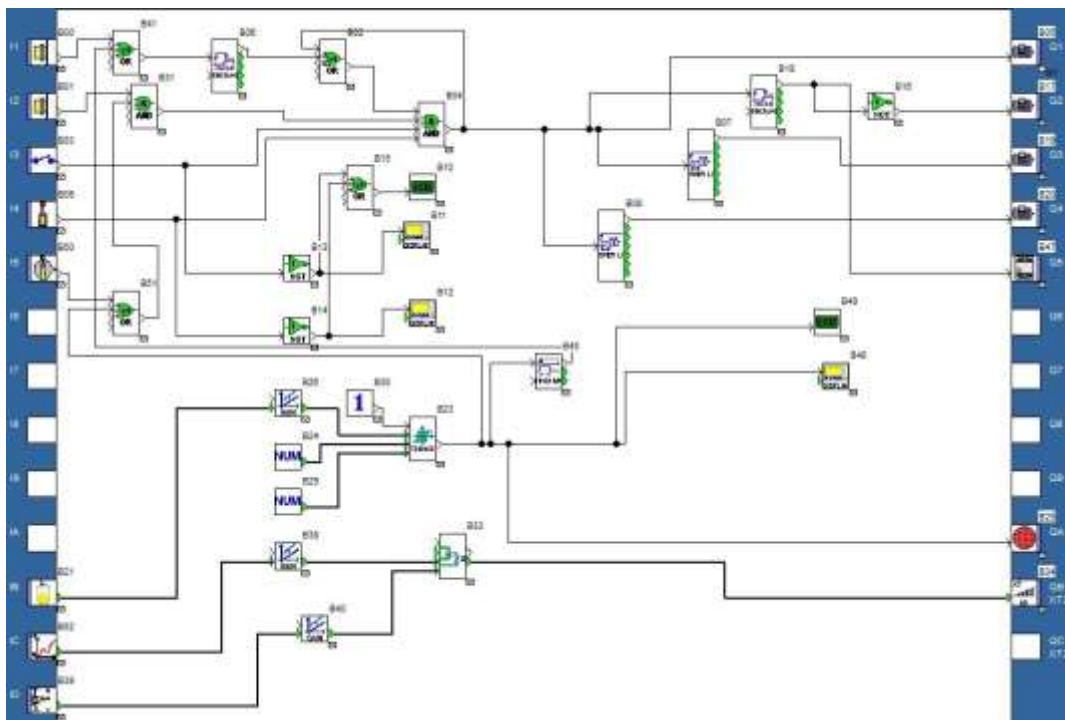
Системата поддържа ръчен, автоматичен и защитен режим. Ръчният режим се използва за настройка, профилактика и проби. В автоматичен режим контролерът изпълнява технологичната последователност, регулира подаването според нивата и координира работата на механизмите. При претоварване, липса на материал, максимално ниво, отказ на винта, аварийен стоп или несъответствие между команда и състояние системата блокира рисковите действия и генерира сигнализация. Логиката за регулиране на подаването е обобщена в Таблица 7. Функционалната блокова диаграма на координиращото управление е показана на фиг.9.

Таблица 7. Логика за регулиране на подаването

Условие	Управляващо действие
Нивото е под заданието	Увеличаване на скоростта на дозиращия винт
Нивото е около заданието	Поддържане на текущата скорост
Нивото е над заданието	Намаляване на скоростта
Достигнато максимално ниво	Спиране или ограничаване на подаването
Ниво под минимално допустимото	Сигнализация за недостиг на материал

Изводи от Трета глава

1. Модернизацията повишава управляемостта, надеждността и енергийната ефективност на съществуващото оборудване, без да изисква пълната му подмяна.
2. Новите сензорни, измервателни и честотно-регулируеми средства осигуряват производствени данни, необходими за по-високи нива на управление.
3. Координиращото управление свързва локалните подсистеми и отчита материалните, технологичните и енергийните зависимости между тях.
4. Режимите, защитите и последователната логика създават основа за безопасно автоматично управление и за интеграция със SCADA и MES.
5. Практическите резултати потвърждават поэтапния подход: модернизация – автоматизация – цифровизация – координация – интелигентно управление.



Фиг.9. Функционална блокова диаграма на координиращото управление

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА. ИНТЕЛИГЕНТЕН ПОДХОД ЗА ОПТИМАЛНО ПЛАНИРАНЕ НА ОПЕРАЦИИТЕ

Постановка на задачата

Задачата за детайлно планиране се решава за краткосрочен времеви хоризонт. Входните данни включват клиентските заявки, количествата, сроковете и приоритетите; технологичните маршрути; машините и операторите; продължителността на операциите; мощността на агрегатите; капацитета на бункера и склада; както и текущото състояние на производствените възли.

Резултатът трябва да бъде изпълним оперативен план, съдържащ избраните операции, последователността, разпределението по ресурси, времевите прозорци и допустимото енергийно натоварване. Планът се генерира на MES равнище, защото ERP не разполага с необходимата оперативна детайлност, а PLC/SCADA не е предназначено за избор и оптимизация на клиентски поръчки. Групите входни данни за задачата са представени в таблица 8. Основните ограничения на задачата са обобщени в таблица 9.

Таблица 8. Входни данни за задачата

Група входни данни	Съдържание
Клиентски заявки	Вид, количество, срок, приоритет
Технологични маршрути	Последователност на операциите
Производствени ресурси	Машини, оператори, бункер, склад, енергийна мощност
Времеви параметри	Продължителности, времеви прозорци и крайни срокове
Енергийни параметри	Мощности, допустим лимит и моментно натоварване

Група входни данни	Съдържание
Текущо състояние	Работещи машини, аварии, заетост и налична суровина

Таблица 9. Основни ограничения

Ограничение	Съдържание
По мощност	Общата моментна мощност не надвишава допустимия лимит
По машинен капацитет	Една машина не изпълнява повече от една операция едновременно
По технологична последователност	Операциите се изпълняват в зададения ред
По бункерен капацитет	Бункерът не трябва да се препълва
По складов капацитет	Пелетите и брикетите се планират според свободното място
По срок	Заявките се завършват до крайния срок
По състояние	Аварийни или профилактирани машини не се планират

Формална математическа постановка

Задачата за детайлно планиране се разглежда за краен времеви хоризонт H , разделен на дискретни интервали $T = \{0, 1, \dots, H\}$. Нека $J = \{1, \dots, n\}$ е множеството на клиентските заявки, O_j – множеството на операциите за заявка j , $M = \{1, \dots, m\}$ – множеството на производствените ресурси, а общото множество на операциите е:

$$O = \bigcup_{j \in J} O_j \quad (4.1)$$

За всяка заявка j са зададени стойност или приоритет v_j , краен срок d_j и тегло w_j . За всяка операция $i \in O$ са известни продължителността p_{im} и необходимата активна мощност P_{im} при изпълнение върху ресурс m . Параметърът $a_{im} \in \{0, 1\}$ показва дали ресурс m е технологично допустим за операция i .

Въвеждат се двоичните променливи y_j и x_{imt} . Променливата y_j приема стойност 1, ако заявка j е включена в плана, а x_{imt} приема стойност 1, ако операция i започва на ресурс m в момент t . За представяне на текущата заетост се използва $z_{im\tau}$, която е равна на 1, ако операция i се изпълнява на ресурс m в момент τ :

$$z_{im\tau} = \sum_{t \in T_{im}(\tau)} x_{imt} \quad (4.2)$$

където:

$$T_{im}(\tau) = \{t \in T: t \leq \tau < t + p_{im}\} \quad (4.3)$$

Всяка операция от включена в плана заявка трябва да бъде планирана точно веднъж и само върху технологично допустим ресурс:

$$\sum_{m \in M} \sum_{t \in T} x_{imt} = y_j, \forall i \in O_j, j \in J \quad (4.4)$$

$$x_{imt} \leq a_{im} \quad (4.5)$$

Началният и крайният момент на операция i се определят чрез:

$$S_i = \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} t x_{imt} \quad (4.6)$$

$$C_i = \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} (t + p_{im}) x_{imt} \quad (4.7)$$

Технологичната последователност се задава чрез множество $A \subseteq O \times O$ от отношения на предшествоване. За всяка двойка $(i, k) \in A$ се налага:

$$S_k \geq C_i - M_0(1 - y_j), \forall (i, k) \in A \quad (4.8)$$

където M_0 е достатъчно голяма положителна константа. Ограничението по машинен капацитет и текущо състояние на оборудването е:

$$\sum_{i \in O} z_{im\tau} \leq A_{m\tau}, \forall m \in M, \tau \in T \quad (4.9)$$

Тук $A_{m\tau} = 1$ при работоспособен и достъпен ресурс и $A_{m\tau} = 0$ при авария, профилактика или друга недостъпност. Ограничението по електрическа мощност се задава за всеки момент от хоризонта:

$$P_{\tau}^{base} + \sum_{i \in O} \sum_{m \in M} P_{im} z_{im\tau} \leq P_{\tau}^{max}, \forall \tau \in T \quad (4.10)$$

Капацитетът на бункера за отпадъчна дървесна суровина се представя чрез динамичен баланс:

$$B_{\tau+1} = B_{\tau} + \sum_{i \in O} \sum_{m \in M} (g_{im} - c_{im}) z_{im\tau} \Delta t \quad (4.11)$$

$$0 \leq B_{\tau} \leq B^{max} \quad (4.12)$$

В тези изрази g_{im} е количеството генерирана отпадъчна суровина, а c_{im} – количеството, консумирано при производството на пелети или брикети. По аналогичен начин състоянието на склада за готова продукция се описва с:

$$W_{\tau+1} = W_{\tau} + Q_{\tau}^{prod} - Q_{\tau}^{out} \quad (4.13)$$

$$0 \leq W_{\tau} \leq W^{max} \quad (4.14)$$

Закъснението на заявка j се определя чрез:

$$T_j \geq C_j - d_j, T_j \geq 0 \quad (4.15)$$

където C_j е моментът на завършване на последната операция от технологичния маршрут. При наличие на задължителен максимален срок $\bar{d}_j$ се въвежда и твърдото ограничение:

$$C_j \leq \bar{d}_j + M_0(1 - y_j) \quad (4.16)$$

Предвид многокритериалния характер на задачата оптимизацията се организира на две взаимосвързани равнища. На първото равнище се избира набор от заявки, максимизиращ общата им стойност или приоритет:

$$\max F_1 = \sum_{j \in J} v_j y_j \quad (4.17)$$

при агрегирани ограничения на наличния производствен капацитет:

$$\sum_{j \in J} a_{jk} y_j \leq C_k, k \in K \quad (4.18)$$

Тук a_{jk} е необходимото количество от ресурс k за изпълнение на заявка j , а C_k е наличният капацитет. Тази част има структура на многомерна задача на раницата.

За избраното множество $J_{sel} = \{j \in J \mid y_j = 1\}$ на второто равнище се определя детайлен план:

$$\sigma = \{(m_i, S_i, C_i) : i \in O(J^{sel})\} \quad (4.19)$$

който удовлетворява ограниченията (4.4)–(4.16). За допустимото множество от графици $F(J_{sel})$ се решава:

$$\sigma^{opt} = \arg \min_{\sigma \in F(J^{sel})} \Phi(\sigma) \quad (4.20)$$

където:

$$\Phi(\sigma) = \alpha \sum_{j \in J^{sel}} w_j T_j + \beta C_{max} + \gamma E(\sigma) \quad (4.21)$$

В този израз C_{max} е времето за завършване на плана, $E(\sigma)$ – енергийната характеристика на графика, а α , β и γ са тегловни коефициенти, определяни според производствените приоритети.

След оптимизационния избор времевата изпълнимост на плана се проверява чрез модела на времевите автомати. Необходимо условие за приемане на плана е:

$$F(J^{sel}) \neq \emptyset \quad (4.22)$$

При установена неизпълнимост се извършва нов избор на заявки или промяна на тяхното ресурсно разпределение и последователност. По този начин постановката обединява оптимизационния избор и резервирането на капацитет с времевата верификация на детайлния план. Комбинираният подход може да бъде представен последователно като: оптимизационен избор $\rightarrow$ детайлно планиране $\rightarrow$ времева верификация $\rightarrow$ корекция при неизпълнимост $\rightarrow$ изпълним план на операциите.

Комбиниран подход

Предложеният подход разделя задачата на два взаимосвързани етапа. Първият е оптимизационен: избира се подмножество от поръчки или операции, което дава най-висока стойност при ограничения по време, мощност, материал или склад. Вторият е верификационен: проверява се дали избраните операции могат да бъдат разположени във времето, без да се нарушат технологичните зависимости и ограниченията за състоянията на машините.

Ако планът е изпълним, MES го преобразува в задания към SCADA/PLC. Ако не е изпълним, резултатът се връща към оптимизационния блок, променя се подмножеството от операции или времевият прозорец и проверката се повтаря. По този начин

оптималността не се разглежда отделно от реалната изпълнимост. Логиката на комбинирания подход е представена на фиг.10. Взаимодействието между оптимизационния и верификационния етап е представено в таблица 10.



Фиг.10. Логика на комбиниания подход за оптимално планиране

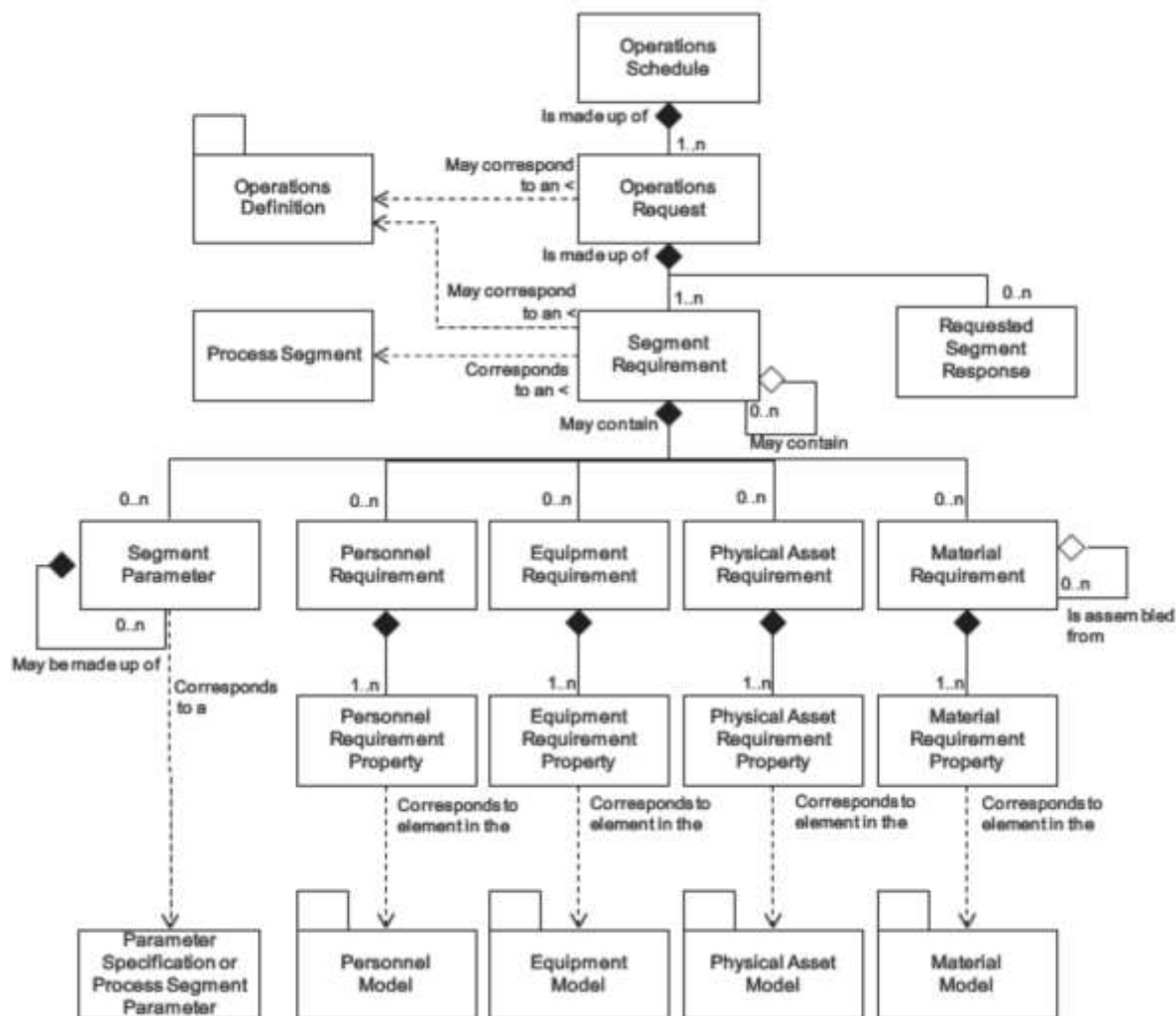
Таблица 10. Взаимодействие между методите

Етап	Метод	Основен въпрос	Резултат
Избор	Алгоритъм на раницата	Кои операции да се включат при ограничен капацитет?	Подмножество от операции
Верификация	Времеви автомати	Могат ли операциите да се изпълнят във времето?	Потвърден или отхвърлен план
Генериране	MES логика	Какви задания да се подадат?	Оперативен план
Корекция	SCADA/MES обратна връзка	Има ли отклонение?	Препланиране

Модели съгласно IEC/EN 62264

Моделирането на заявките, поръчките, операциите, ресурсите и оперативната способност е съобразено с IEC/EN 62264. Клиентските заявки се групират в производствени поръчки, които се декомпозират до работни поръчки и операции. Календарът на способностите описва наличния персонал, оборудване, материал и производствен капацитет. Тази терминологична и информационна основа осигурява

връзка между бизнес нивото и MES. Моделът на класовете за планиране съгласно IEC/EN 62264-2 е показан на фиг.11.



Фиг.11. Модел на класовете за планиране на операциите съгласно IEC/EN 62264-2

Резервиране на производствен капацитет чрез алгоритъма на раницата

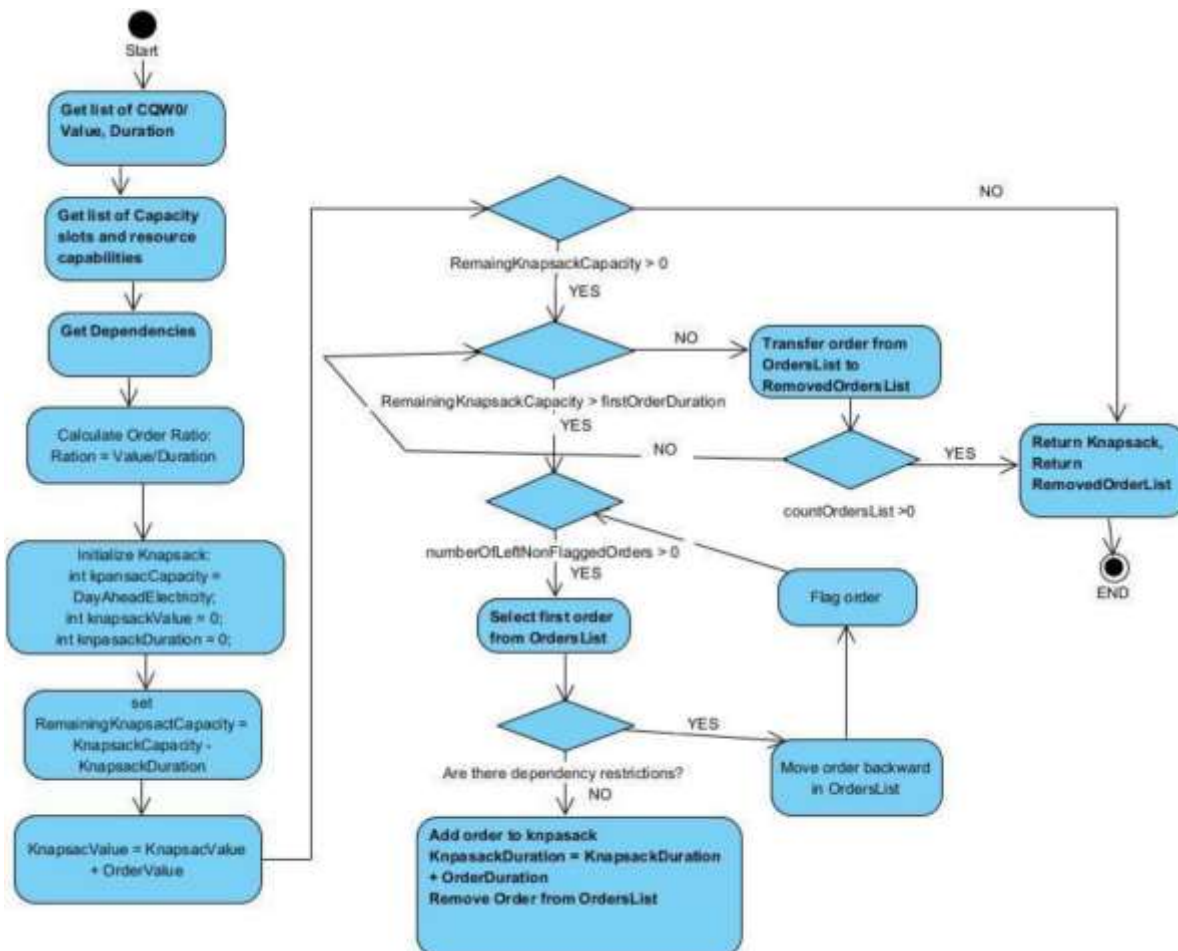
В класическата задача всеки елемент има стойност и тегло, а целта е да се избере комбинация с максимална сумарна стойност, без да се надвиши капацитетът. В производствената интерпретация елементът е заявка, работна поръчка или операция; стойността изразява приоритет, печалба или срокова важност; теглото е необходимото време, мощност, материал или складов капацитет.

За n операции се използва двоична променлива x_i , която приема стойност 1, когато операцията е включена, и 0 – когато не е включена. При един ресурс задачата се задава чрез максимизиране на сумарната стойност при ограничение на сумарното потребление. При няколко ресурса се въвежда отделно ограничение за всеки вид капацитет.

$$\max \sum_i v_i x_i \quad (1)$$

$$\text{при } \sum_i w_{ik} x_i \leq C_k, \quad k = 1, \dots, m; \quad x_i \in \{0,1\} \quad (2)$$

В конкретния производствен пример ограниченията включват машинно време, допустима електрическа мощност, количество отпадъчна суровина, свободен бункерен и складов капацитет и срокова допустимост. Стойността на заявката може да се формира като претеглена комбинация от приоритет, икономическа стойност и близост на крайния срок. Алгоритъмът за избор и резервиране на капацитет е представен на фиг.12.



Фиг.12. Алгоритъм за избор и резервиране на капацитет чрез метода на раницата

Енергийно ограничение

Моментната сумарна мощност на работещите производствени възли трябва да остава под максимално допустимата мощност на цеха. Това ограничение е съществено, защото широколеновата машина и аспирацията заедно могат да използват по-голямата част от наличния ресурс, а пелетизиращата и брикетиращата линия не могат винаги да работят паралелно с тях. Технологичните и енергийните ограничения от примера са дадени в Таблица 11.

$$P_{шл}(t) + P_{асп}(t) + P_{пел}(t) + P_{бр}(t) + P_{комп}(t) \leq P_{max} = 50 \text{ kW} \quad (3)$$

Таблица 11. Технологични и енергийни ограничения на примера

Възел	Мощност / капацитет	Управленско значение
Широколентова шлифовъчна машина	около 35 kW	Основен енергоемък възел
Аспирация	около 13 kW	Работи съвместно със шлифоването
Пелетизираща преса	около 18 kW	Оползотворява отпадъчната суровина
Брикет преса	около 15 kW	Алтернативно оползотворяване
Бункер	до 2000 kg	Изисква освобождаване при запълване
Склад	до 8000 kg	Ограничава производството на пелети/брикети

Времеви автомати и формална верификация

След избора на операции се разработват времеви автомати, които описват машините, поръчките и технологичните зависимости. Времевият автомат се задава чрез множество от състояния, начално състояние, часовници, действия, преходи и инварианти. Състоянията представят например „свободна“, „работи“, „чака“ или „авария“; преходите – стартиране и завършване; часовниците – продължителността; а условията – наличие на материал, свободен ресурс и допустима мощност.

Мрежата от автомати се моделира в UPPAAL. Системният редактор се използва за шаблоните и променливите, симулаторът – за проверка на поведението, а верификаторът – за проверка на свойства за достижимост и безопасност. Типична заявка е дали съществува траектория, при която всички избрани поръчки достигат състояние „завършена“, без да се нарушават ограниченията. Последователността на планиране и верификация чрез времеви автомати е представена на фиг.13. Използваните типове времеви автомати са показани на фиг.14.

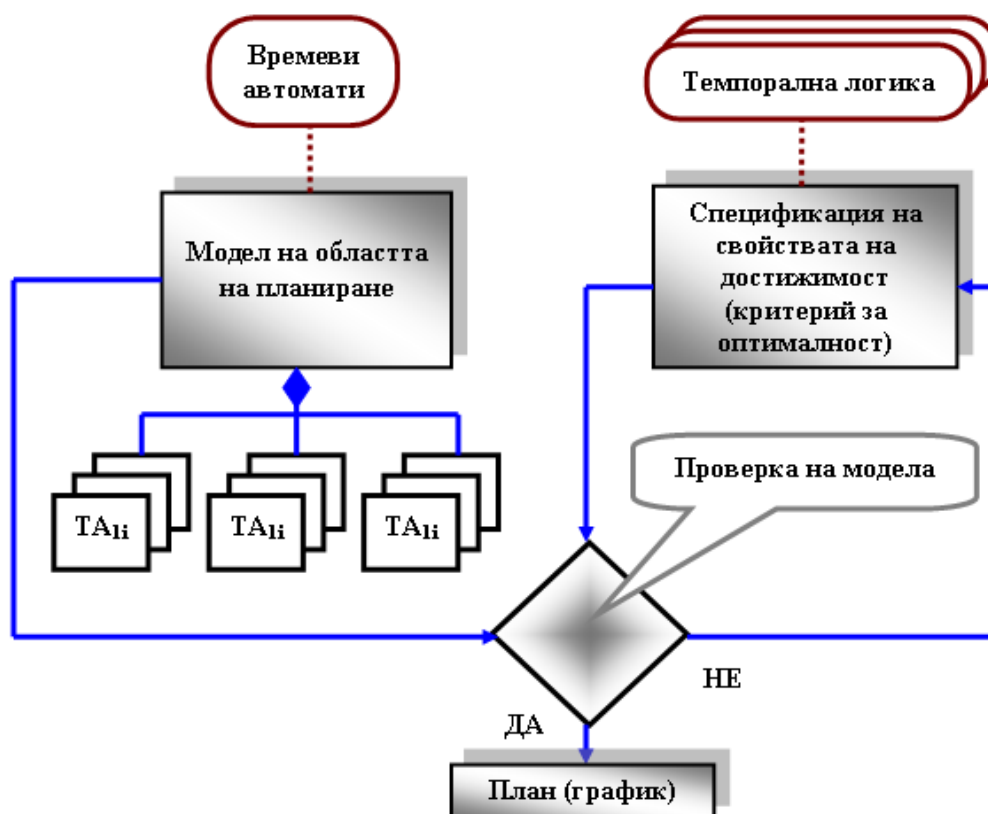
$$A = (L, l_0, C, \Sigma, E, Inv) \quad (4)$$

$$E \leftrightarrow AllOrdersCompleted \quad (5)$$

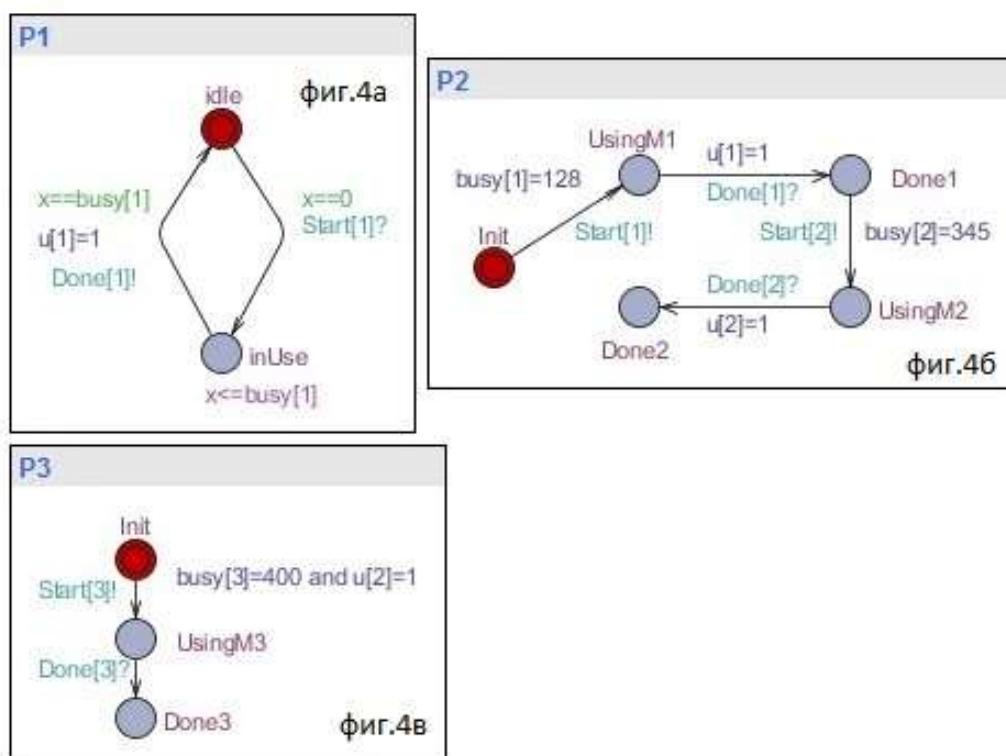
Производствен пример

Примерът включва заявки за шлифване на дървесен материал и заявки за производство на пелети. Шлифоването генерира отпадъчна суровина, която се натрупва в бункера и се използва от пелетизиращата или брикетиращата линия. Така производствените задачи не са независими: изпълнението на едни операции променя материалните и енергийните условия за други.

Комбинираният алгоритъм първо избира заявки, които могат да бъдат поети в разглеждания капацитет, след което проверява последователността и времевата допустимост. При потвърден план се генерират задания за натоварване и времеви прозорци. При авария, отклонение в продължителността, запълване на бункера или промяна в енергийния ресурс планът се актуализира. Принципната схема на технологичната инсталация е представена на фиг.8.



Фиг.13. Подход за оптимално планиране с времеви автомати



Фиг.14. Типове времеви автомати за машини, поръчки и технологични зависимости

Изводи от Четвърта глава

1. Задачата за детайлно планиране е формулирана като избор, подреждане и проверка на изпълнимостта при едновременно действие на производствени, времеви, складови и енергийни ограничения.
2. Алгоритъмът на раницата осигурява интерпретируем избор на операции при ограничен капацитет и може да отчита различни видове стойност и ресурс.
3. Времевите автомати осигуряват формална проверка на технологичната последователност, времевите ограничения и допустимата паралелност.
4. Комбинацията на оптимизация и верификация намалява риска от генериране на математически привлекателен, но технологично неизпълним план.
5. MES е подходящото равнище за реализация, защото свързва бизнес заявките с текущото производствено състояние и заданията към SCADA/PLC.

ПЕТА ГЛАВА. АРХИТЕКТУРА НА ИНТЕЛИГЕНТНА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА МЕБЕЛНА ФИРМА

Многослойна архитектура

Пета глава интегрира разработените методи и технически решения в завършена многослойна архитектура. Производственото ниво включва машините, сензорите, изпълнителните механизми, бункера, аспирацията, компресора и линиите за пелети и брикети. Локалното управляващо ниво се реализира с PLC, входно-изходни модули и енергийни измервателни модули. SCADA/HMI осигурява операторско управление, визуализация, аларми и архиви. MES приема заявки, избира операции, резервира капацитет, проверява изпълнимостта и генерира задания. ERP предоставя бизнес информация и получава отчет за изпълнението.

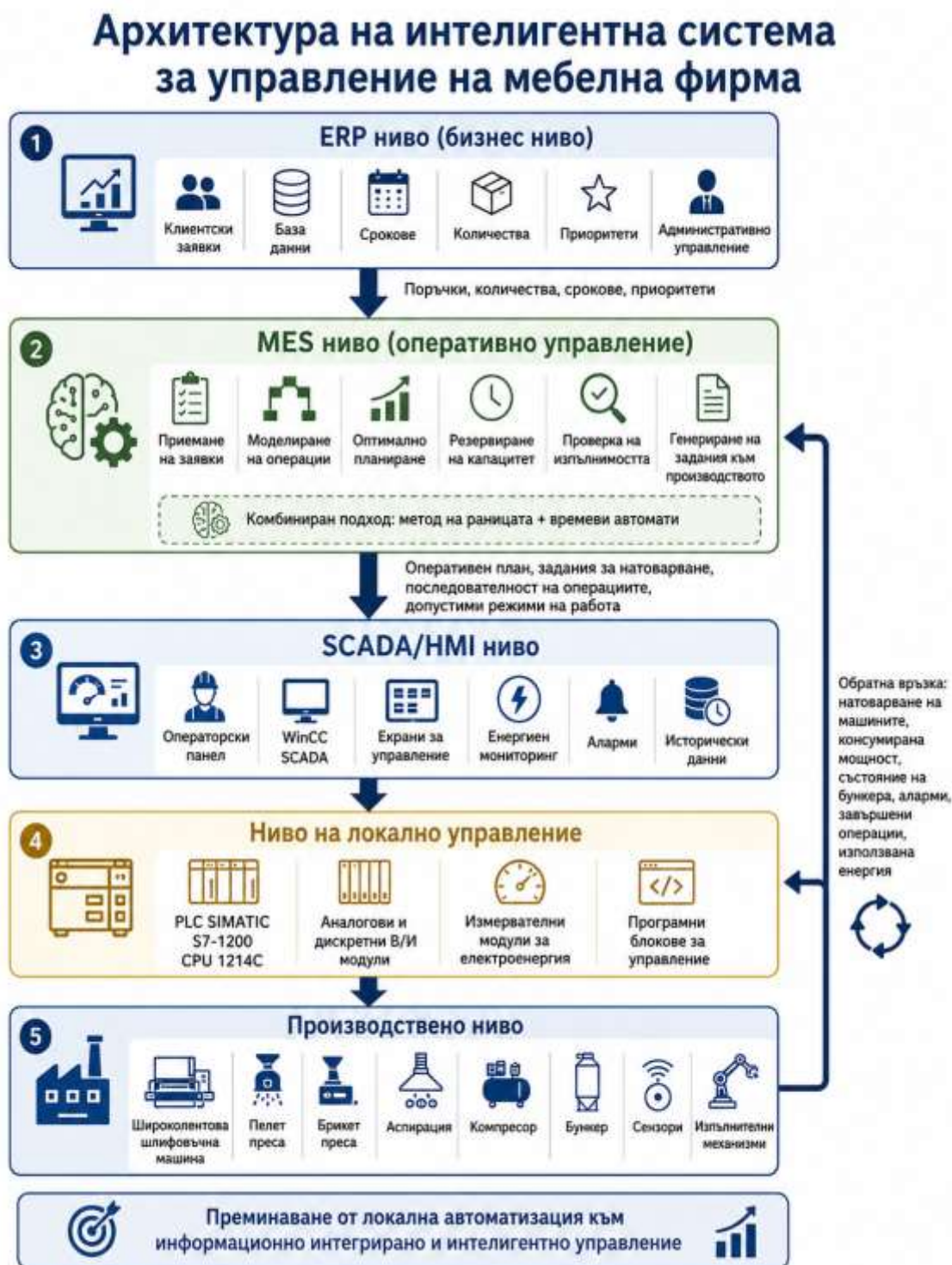
Архитектурата реализира затворен цикъл „планиране – изпълнение – мониторинг – анализ – препланиране“. Именно обратната връзка от реалното изпълнение към оперативното планиране превръща системата от класическа автоматизация и SCADA в интелигентна система за управление. Многослойната архитектура на интелигентната система е представена на фиг.15.

SCADA/HMI и операторски функции

Главният операторски екран осигурява централен достъп до ръчен и автоматичен режим, старт и стоп, нулиране на аларми, задания за натоварване и специализирани екрани. В ръчен режим операторът задава процентно натоварване на шлифовъчната машина или пелетизиращата линия, а остатъчният енергиен ресурс се изчислява автоматично. В автоматичен режим заданията постъпват от MES и се потвърждават преди стартиране.

Специализираните екрани визуализират нивото на бункера, скоростта на дозиращия винт, натоварването на пелетизиращата машина, натоварването на калибровъчните валове, скоростта на транспортната лента и състоянията на механизмите. Аларменият екран обединява състоянията на шлифовъчната машина, компресора, аспирацията и

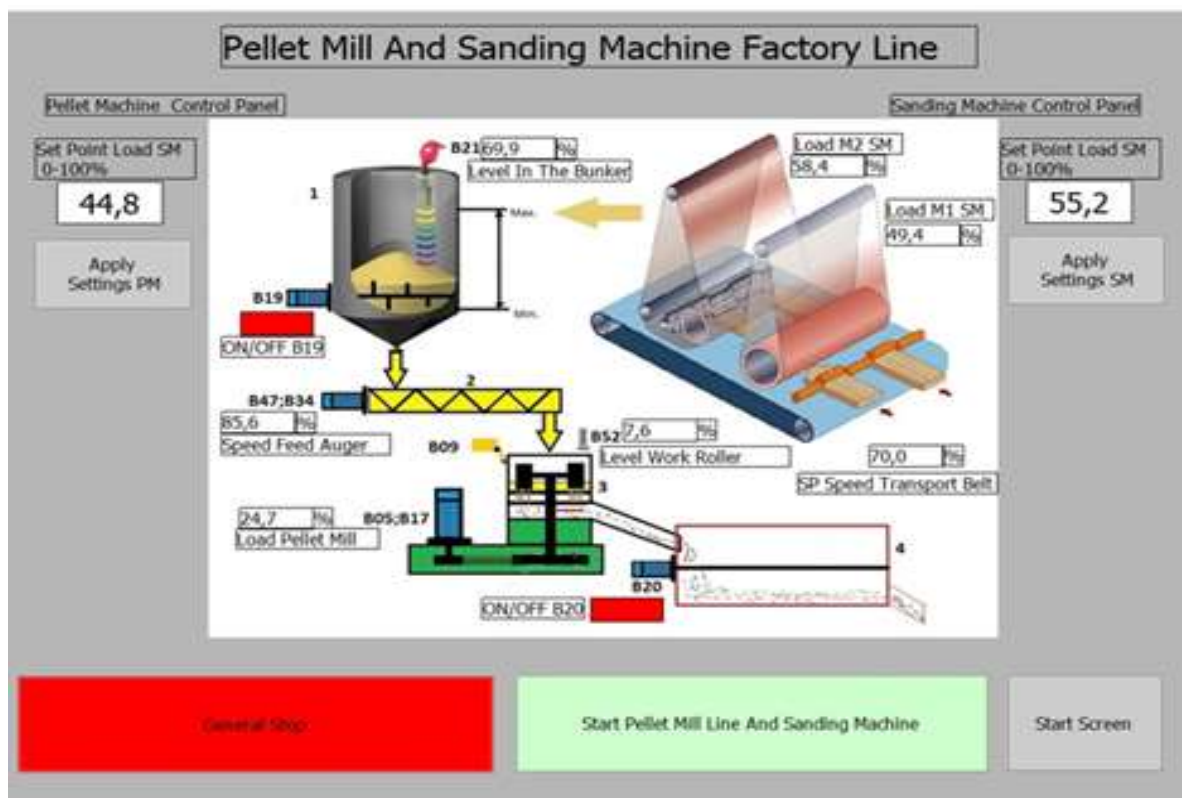
пелетизиращата инсталация. Главният интерфейсен панел на SCADA системата е показан на фиг.16. Операторският екран за технологичните параметри и заданията е показан на фиг.17.



Фиг. 15. Архитектура на интелигентната система за управление



Фиг.16. Главен интерфейс на SCADA системата



Фиг.17. Операторски екран за технологичните параметри и заданията

MES ниво и информационни потоци

MES използва клиентските заявки, технологичната база данни, данните от SCADA/PLC, складовите данни и енергийните измервания. Резултатът е изпълним оперативен план с избрани операции, машини, времеви прозорци и допустими натоварвания. Обменът между MES, SCADA и PLC се реализира чрез OPC UA и PROFINET. PLC изпълнява и събира данни, SCADA визуализира и архивира, а MES анализира отклоненията и при необходимост препланира. Основните информационни входове към MES са представени в Таблица 12.

Таблица 12. Основни информационни входове към MES

Вход към MES	Съдържание
Клиентски заявки	Продукт, количество, срок и приоритет
Технологична база данни	Операции, машини, времена и енергийни норми
SCADA/PLC	Състояния на машините, мощност, бункер и аларми
Склад	Наличност и свободен капацитет
Енергийни данни	Моментна мощност, енергия и допустим лимит

Енергиен мениджмънт

Измервателният модул следи фазови и линейни напрежения, токове, активна, реактивна и пълна мощност, активна и реактивна енергия, фактор на мощността и честота. Данните се визуализират в реално време, архивират се и се използват както от оператора, така и от MES.

Енергийният мениджмънт има две функции. Първата е наблюдение и анализ на енергопотреблението, включително исторически графики и връзка с производствените режими. Втората е активно управление на натоварването: при ограничение до 50 kW наличният ресурс се разпределя между технологичните възли, като се предотвратява претоварване и се запазва изпълнимостта на плана. Измерваните параметри за енергиен мониторинг са дадени в Таблица 13.

Таблица 13. Измервани параметри за енергиен мониторинг

Параметър	Единица	Описание
U_PH_N avg	V	Средно фазово напрежение
U_PH_PH avg	V	Средно линейно напрежение
I avg	A	Среден ток
P Total	kW	Активна мощност
Q Total	kvar	Реактивна мощност
S Total	kVA	Пълна мощност
Active Energy	kWh	Активна електроенергия
Reactive Energy	kvarh	Реактивна електроенергия
Power Factor	cos φ	Фактор на мощността

Параметър	Единица	Описание
Frequency	Hz	Честота

Техническа и софтуерна реализация

Основният контролер е SIMATIC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC. Аналоговият модул SM 1231 AI8 приема сигнали от технологични датчици, а SM 1238 Energy Meter 480VAC измерва електрическите параметри. AQ1 Signal Board формира аналогови задания. Картата с памет подпомага архивирането. HMI KTP700 Basic PN осигурява локално управление, а PC станция с WinCC Runtime Professional реализира SCADA визуализацията и архивите. Избраната хардуерна конфигурация е представена в таблица 14. Хардуерната конфигурация на PLC е показана на фиг.19. Функционалната структура на измервателния модул е представена на фиг.20.

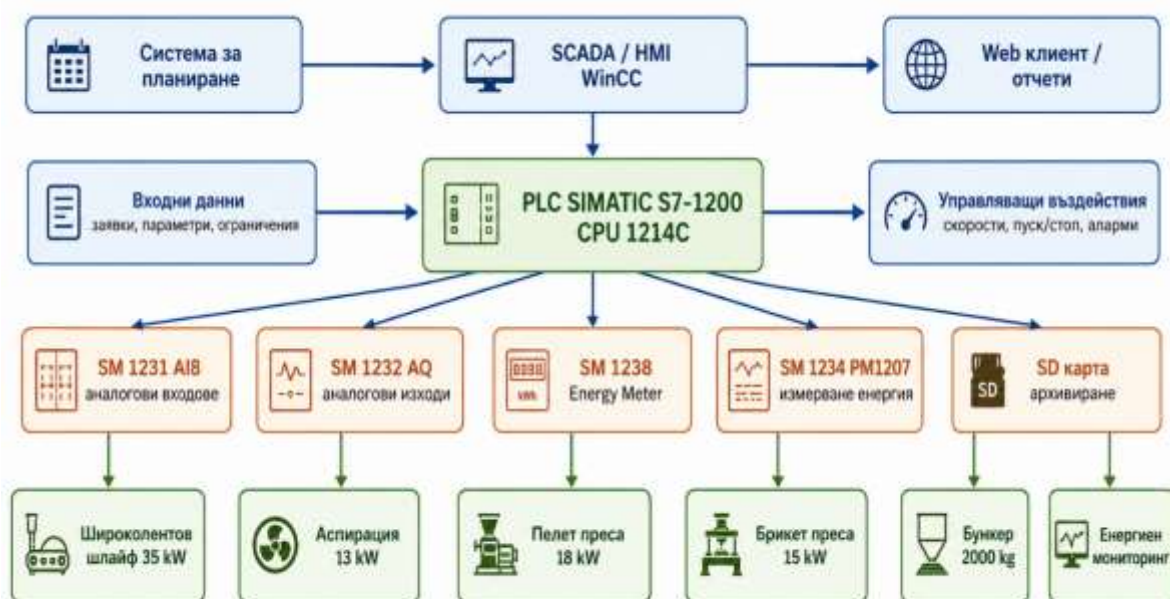
Таблица 14. Хардуерна конфигурация

Техническо средство	Предназначение
S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC	Основен контролер за управление и комуникация
SM 1231 AI8	Аналогови технологични сигнали
SM 1238 Energy Meter 480VAC	Измерване на електрически параметри и енергия
AQ1 Signal Board	Аналогов изход за задания
SIMATIC S7 Memory Card 4 MB	Запис и архивиране
HMI KTP700 Basic PN	Локална операторска визуализация
PC Station с WinCC Runtime Professional	SCADA визуализация и архивиране

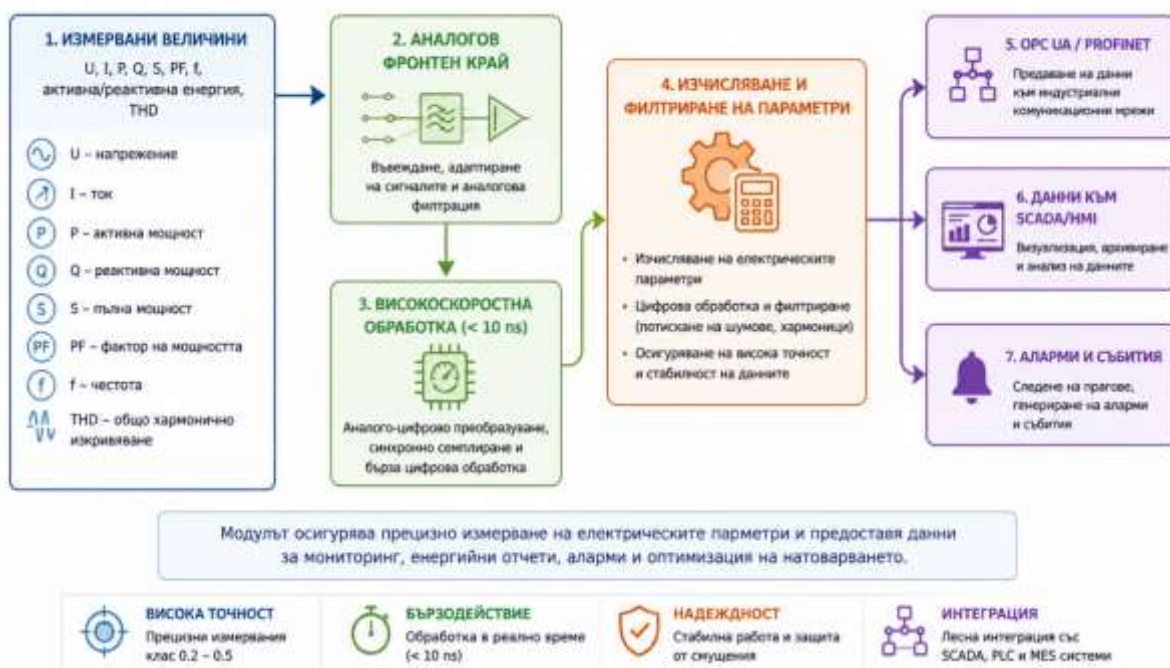
Софтуерната реализация е разработена в TIA Portal и включва организационни блокове, функционални блокове, функции, блокове с данни и PID регулатори. Използвани са езици по IEC 61131-3 – функционални блокови диаграми, ладер логика и структуриран текст. Програмата обработва входните сигнали, управлява възлите, реализира защитите, следи енергийното натоварване, обменя данни с HMI/SCADA и приема задания от MES. Обобщената структура на операторските екрани е показана на фиг.21.

Изводи към Пета глава

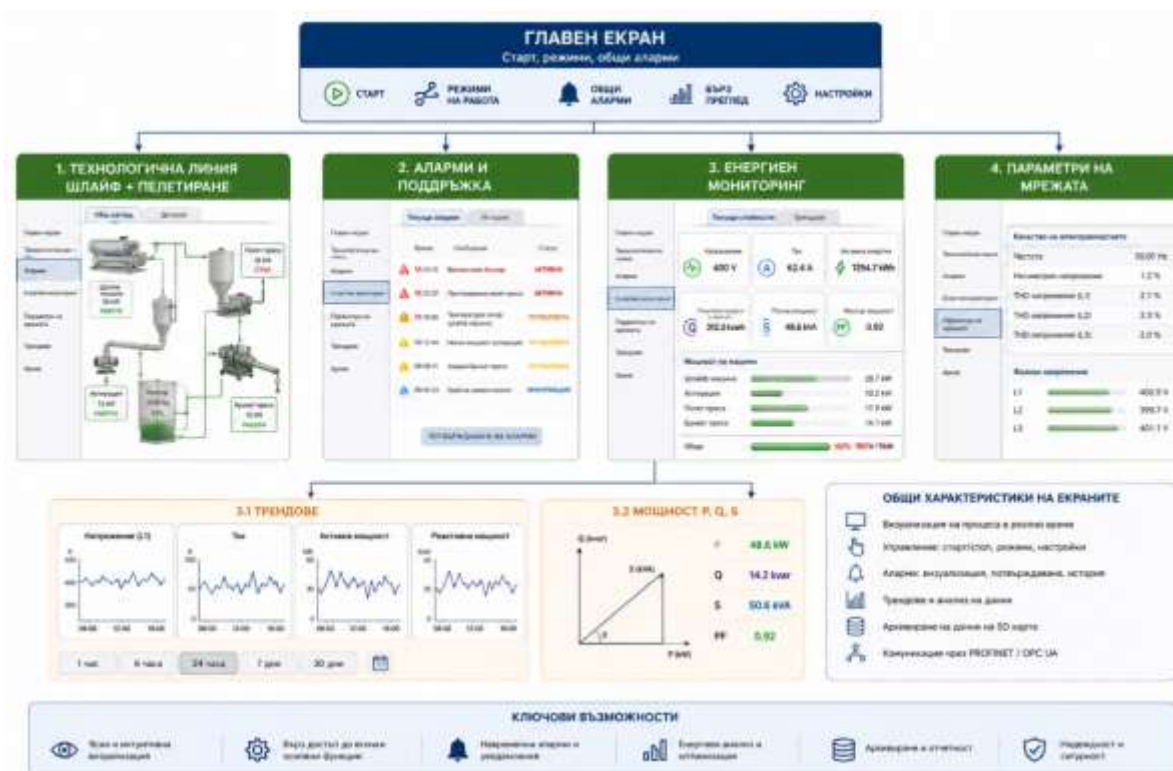
1. Архитектурата обединява производствено, PLC, SCADA/HMI, енергийно, MES и ERP равнище в единна информационно-управляваща среда.
2. MES преобразува клиентските заявки и ограниченията в изпълними задания, а обратната връзка от SCADA/PLC позволява контрол и препланиране.
3. Енергийният мониторинг е интегриран с оперативното управление и се използва не само за отчет, а и за активно ограничаване и разпределение на мощността.
4. Избраните стандартни технически средства и комуникации потвърждават практическата реализуемост на архитектурата в условията на мебелно МСП.
5. Затвореният цикъл на планиране, изпълнение, мониторинг, анализ и препланиране реализира основните признаци на интелигентно оперативное управление.



Фиг.19. Хардуерна конфигурация на програмируеия логически контролер



Фиг.20. Функционална структура на измервателния модул за електроенергия



Фиг.21. Обобщена структура на операторските екрани в SCADA/HMI системата

ОБЩИ ИЗВОДИ

1. Направеният обзор показва, че преходът към интелигентни производствени системи не се свежда до внедряване на отделни средства за автоматизация, а изисква поетапно развитие на техническата, информационната и управленската инфраструктура. Интелигентното производство надгражда умното чрез използване на данни, модели, алгоритми и методи на изкуствения интелект за анализ, прогнозиране, оптимизация и адаптивно управление.
2. Анализът на мебелното производство установява високо продуктово разнообразие, индивидуални клиентски поръчки, ограничени ресурси, технологични зависимости и необходимост от гъвкаво оперативно планиране, което обосновава специализирани методи и архитектури за микро-, малки и средни предприятия.
3. Съществуващите модели за зрялост са полезна методологична основа, но значителна част от тях са ориентирани към големи предприятия и не отчитат достатъчно ограниченията на мебелните МСП.
4. Разработеният метод за оценка на готовността позволява определяне на текущото ниво, идентифициране на слабите места и формулиране на приоритети за модернизация, автоматизация, цифровизация и интелигентно управление.
5. Реализацията на метода в Google Sheets с правила и генеративен интелект осигурява практически инструмент за визуализация, автоматизирано генериране на препоръки и формиране на пътна карта.

6. Модернизацията на осцилиращото движение, транспортната лента и главния калибровъчен вал повишава надеждността, управляемостта и наблюдаемостта на оборудването и създава основа за събиране на данни и енергиен мониторинг.
7. Доказана е необходимостта от преминаване от локално към координиращо управление на взаимосвързани процеси. Предложеният подход съгласува шлифоването, аспирацията, бункера, пелетизирането и брикетирането при технологични, материални и енергийни ограничения.
8. Задачата за оптимално планиране е формулирана като избор, подреждане и проверка на изпълнимостта на операции при ограничени ресурси, срокове, капацитет и електрическа мощност и е обоснована необходимостта от решаването ѝ на MES ниво.
9. Комбинираният подход с алгоритъм на раницата и времеви автомати позволява едновременно избор на подходящ набор от операции и проверка на тяхната технологична и времева изпълнимост.
10. Алгоритъмът на раницата позволява избор на операции или поръчки с най-голяма производствена, икономическа или срокова значимост при ограничения по машинно време, енергия, бункерен и складов капацитет.
11. Времевите автомати осигуряват формално моделиране на състоянията, преходите, технологичните зависимости и времевите ограничения и позволяват проверка на достижимостта на целевите производствени състояния.
12. Проектираната архитектура обединява производствено, PLC, SCADA/HMI, MES и ERP равнище и свързва клиентските заявки, оперативното планиране, заданията, мониторинга, енергийния мениджмънт и обратната връзка от изпълнението.
13. Интеграцията на SIMATIC S7-1200, измервателни модули, WinCC и комуникации PROFINET/OPC UA потвърждава практическата реализуемост на архитектурата.
14. Интегрираният енергиен мениджмънт създава условия за ограничаване на пиковото натоварване, рационално разпределение на мощността и по-ефективно използване на енергията.
15. Разработените методи и архитектурни решения подпомагат поетапния преход на мебелни МСП към умно и интелигентно производство и могат да бъдат адаптирани към други производства със сходни ограничения.
16. Поставената цел е постигната чрез цялостен подход, включващ оценка на готовността, модернизация, координиращо управление, интелигентно планиране и интегрирана многослойна архитектура.
17. Дисертационният труд предлага методически обосновано и практически приложимо решение за цифрова и интелигентна трансформация чрез съчетаване на модернизация, автоматизация, енергиен мониторинг, MES планиране, формални методи и информационна интеграция.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

I. Научни приноси

1. Разработен е адаптиран метод за оценка на готовността на микро-, малки и средни предприятия за преход към умно и интелигентно производство, съобразен със спецификата на мебелния сектор. Методът разширява моделите за зрялост чрез практически приложими критерии, показатели и нива за предприятия с ограничена цифрова инфраструктура и инвестиционни възможности.
2. Предложен е концептуален подход за поетапен преход от локална автоматизация към интелигентно управление, обединяващ модернизация, автоматизирано събиране на данни, координиращо управление, оперативно планиране и интеграция на производствени и информационни системи.
3. Разработен е комбиниран подход за оптимално планиране, който съчетава алгоритъма на раницата за избор и резервиране на капацитет с времеви автомати за проверка на технологичната и времевата изпълнимост и разглежда планирането едновременно като оптимизационна и верификационна задача.

II. Научно-приложни приноси

1. Разработен е модел за интелигентно координиращо управление на взаимосвързани производствени възли, отчитащ технологичните зависимости, състоянието на оборудването, запълването на бункера, енергийното натоварване и ограниченията при паралелна работа.
2. Формулирана е постановка на задачата за детайлно оперативно планиране при ограничени ресурси, срокове, машинен капацитет, складови ограничения и ограничение по електрическа мощност и е показана необходимостта от решаването ѝ на MES ниво.
3. Предложена е многослойна архитектура на интелигентна система, интегрираща ERP/заявки, MES, SCADA/HMI, PLC, енергиен мониторинг и производствени възли, която осигурява обратна връзка от изпълнението и възможност за адаптивно препланиране.
4. Разработена е логика за формиране на пътна карта за цифрова и интелигентна трансформация на мебелни МСП въз основа на резултатите от оценката на готовността.

III. Приложни приноси

1. Реализирана е модернизация на системите за управление на осцилиращото движение, транспортната лента и главния калибровъчен вал на широколентова шлифовъчна машина.
2. Разработена е SCADA/HMI система за визуализация, операторско управление, алармена диагностика, архивиране и енергиен мониторинг.

3. Реализирана е хардуерна и софтуерна конфигурация на базата на SIMATIC S7-1200, разширителни и измервателни модули, WinCC и комуникации PROFINET/OPC UA.
4. Разработен е инструмент в Google Sheets за оценка на готовността, генериране на препоръки и формиране на пътна карта чрез правила и генеративен интелект.
5. Показана е приложимостта на методите и архитектурните решения към мебелни МСП и към други производствени системи с ограничени ресурси, остаряло оборудване, необходимост от модернизация, енергиен контрол и гъвкаво оперативно планиране.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Белев Й., Бачкова И., Попов Г. (2014). Подобряване на енергийната ефективност на дървообработваща шлифовъчна машина. Сп. „Автоматика и информатика“, бр. 1, с. 20–24, ISSN 0861-7562.
2. Белев Й., Бачкова И., Попов Г. (2015). Енергоефективна система за управление на транспортната лента на широколентова шлифовъчна машина. Сп. „Автоматика и информатика“, бр. 3, с. 99–102, ISSN 0861-7562.
3. Белев Й., Бачкова И., Попов Г. (2016). IEC 61131 базирано управление на процесите в мебелна фабрика. Сп. „Автоматика и информатика“, бр. 1, с. 12–16; бр. 2, с. 45–51, ISSN 0861-7562.
4. Белев Й., Бачкова И., Попов Г. (2017). Интелигентен подход за оптимално планиране на операциите в мебелно производство. Сп. „Автоматика и информатика“, бр. 2, с. 35–43, ISSN 0861-7562.
5. Vasilev P., Belev Y., Ivanova T. (2022). Schedule process modelling of a wood processing SME based on IEC/EN 62264 standard. International Scientific Journal „Mathematical Modeling“, 6(4), 127–130, WEB ISSN 2603-2929; PRINT ISSN 2535-0986.

АПРОБАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Резултатите от дисертационния труд са апробирани чрез пет публикации, доклади на четири международни симпозиума, участия в научните постерни сесии на ХТМУ и работа по научноизследователски проекти. Апробацията обхваща модернизацията и енергийната ефективност на широколентова шлифовъчна машина, координиращото управление, оценяването на готовността за Индустрия 4.0, моделирането по IEC/EN 62264 и интелигентното оперативно планиране. Практическите резултати са представени в реална производствена среда и на научни форуми в областта на автоматизацията, енергийното управление, киберфизическите системи и Индустрия 4.0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторефератът представя цялостната логика на дисертационния труд: от анализ на зрелостта и определяне на приоритетите, през модернизация на съществуващите машини и координация на взаимосвързаните процеси, до интелигентно оперативно планиране и интегрирана архитектура. Основният резултат е практически приложим модел за поетапна цифрова и интелигентна трансформация на мебелно предприятие.

Предложеният подход съчетава инженерни решения и интелигентни методи, без да изисква незабавна подмяна на цялото оборудване. Използването на стандартни PLC, SCADA/HMI, енергийни измервателни модули и комуникационни протоколи осигурява реалистична основа за внедряване. Алгоритъмът на раницата и времевите автомати добавят оптимизационна и формално-верификационна функционалност на MES ниво.

Разработката показва, че интелигентното производство в МСП може да бъде постигнато чрез последователни и измерими стъпки: оценяване, модернизация, събиране на данни, координация, оптимално планиране, интеграция и обратна връзка. Така се създават условия за по-висока ефективност, гъвкавост, надеждност, енергийна устойчивост и конкурентоспособност.