

DEZVOLTAREA PRODUSULUI PENTRU SERII REDUSE DE FABRICAȚIE ÎN INDUSTRIA DE AUTOVEHICULE, ÎN CONTEXTUL INDUSTRIEI 4.0

Rezumatul tezei de doctorat

în domeniul de doctorat Inginerie Industrială

autor ing. Adrian Ciprian Firu

conducător științific Prof. univ. dr. ing. George Drăghici

luna mai, anul 2025

Teza de doctorat, încadrată în domeniul Inginerie Industrială, are o tematică de actualitate, și anume dezvoltarea produsului pentru serii reduse de fabricație în industria de autovehicule, în contextul industriei 4.0.

Teza de doctorat este inspirată de activitatea doctorandului în cei 20 ani lucrați în companii din industria de autovehicule, de la inginer proiectant la manager general, având oportunitatea de a cunoaște și a folosi cele mai noi metode și mijloace de dezvoltare a produsului.

Dezvoltarea noilor produse reprezintă un proces complex de creativitate și capacitate de inovare, iar transformarea unei idei într-un produs finit competitiv și adaptat la cerințele pieței presupune resurse financiare și efort considerabil pentru orice organizație. În plus, atunci când seriile de fabricație sunt limitate, prin procesul tradițional de producție costurile cresc la un nivel de cele mai multe ori neacceptat în piață.

Industria de automobile a fost și continuă să fie un domeniu în care cerințele sunt din ce în ce mai diverse, iar concurența tot mai mare. Acestea impun găsirea de soluții rapide și competitive, folosind cele mai avansate tehnici.

În aceste condiții, nevoia de dezvoltare a unor produse noi, în serii mici de fabricație sau chiar personalizate și adaptate unor cerințe specifice, dar la costuri reduse, va reprezenta diferența dintre a performa sau a supraviețui în piață.

În contextul Industriei 4.0, produsele sunt concepute pentru a deveni parte activă în procesul de producție, iar procesele convenționale controlate central și monitorizate vor fi înlocuite cu control descentralizat, bazat pe capacitatea de autoreglare a produselor și unităților de lucru care comunică între ele. În acest fel se realizează un nivel superior de flexibilizare, care permite planificarea fabricației în diferite loturi mici și personalizate ale producției, cu timpi reduși de lansare a produselor de o calitate superioară în piață.

Tehnologiile avansate specifice Industriei 4.0 sunt bine cunoscute: internetul lucrurilor

(*Internet of Things*, IoT), securitatea datelor, prelucrarea datelor, tehnologia “cloud”, prelucrarea prin depunere de material (*Additive Manufacturing*, AM), realitatea augmentată, *Big Data* (BD), roboții autonomi, simularea proceselor, integrarea sistemelor pe verticală și orizontală. Capacitatea de a colecta date și de a le procesa în cantități masive (*Big Data*) într-un interval de timp scurt, reprezintă o direcție care ar trebui considerată în procesul de concepție produse noi

Un alt element esențial care joacă un rol important în alegerea temei acestei lucrări este tendința de migrare de la producția de masă, caracterizată de volume mari ale aceluiași produs, la serii reduse de produse personalizate configurabile în mai multe variante și chiar la produse individualizate cu arhitectură deschisă, la a căror dezvoltare contribuie clientul cărui îi este destinat respectivul produs. În consecință, a fost identificată nevoia unor instrumente integrate în procesul de dezvoltare produs, care să faciliteze implicarea directă a clientului și buna colaborare cu membrii echipelor de proiectare și între aceștia.

Chiar și acum, când în orice domeniu de activitate tot mai multe sarcini sunt preluate de mașini, rolul factorului uman în procesul de concepție și dezvoltare produse noi nu trebuie diminuat, deoarece creierul uman este mult mai flexibil în comparație cu orice tip de tehnologie și software existent, dar pentru calcule complexe și volum mare de informații este nevoie să apelăm la noile tehnologii, bazate pe inteligența artificială.

Obiectivul principal al cercetării constă în integrarea noilor tehnologii de dezvoltare a produsului, pentru serii reduse de fabricație și personalizate, urmărind optimizarea costurilor de producție și a investițiilor, reducerea timpului de lansare în piață.

Obiectivele operaționale care vor asigura atingerea obiectivului principal sunt următoarele:

OP1: Efectuarea unui studiu bibliografic și întocmirea unei sinteze a cunoașterii privind dezvoltarea produsului în cea de-a patra revoluție industrială;

OP2: Efectuarea unui studiu asupra procesului de dezvoltare a produsului, pentru adaptarea acestuia la condițiile impuse de a patra revoluție industrială;

OP3: Dezvoltarea unui configurator de produs;

OP4: Realizarea unui studiu de caz care să releve utilitatea instrumentului de configurare dezvoltat.

Teza de doctorat se extinde pe 149 pagini, fiind este structurată în 6 capitole.

În **capitolul 1**, „Introducere generală”, se descrie contextul, motivele și impactul cercetării, prin care se justifică abordarea temei. În urma identificării obiectivului principal și obiectivelor secundare, acestea se dezvoltă în capitolele ce urmează.

În **capitolul 2** se realizează „Sinteza cunoașterii privind dezvoltarea produsului în cea de-a patra revoluție industrială”; se evidențiază situațiile actuale, în scopul identificării problemelor și definirii direcțiilor de cercetare. Aceasta a impus în primă fază crearea unei viziuni de ansamblu asupra Industriei 4.0, a tehnologiilor folosite, apoi analizarea impactului acestora și a

perspectivelor de tranziție către Industria 5.0. Având în vedere tendințele de fabricație în serii mici, personalizate, au fost analizate caracteristicile actualelor paradigme ale producției: personalizarea în masă, individualizarea în masă, personalizarea inteligentă.

Cu ajutorul tehnologiilor avansate asociate Industriei 4.0, integrate în procesul de dezvoltare al produselor inteligente, cu funcții de comunicare și colectare de informații în timpul funcționării, se poate redefini modul actual de concepție a unui nou produs. Dezvoltarea produselor inteligente necesită tehnologii avansate, atât pentru concepție, cât și pentru fabricație, iar integrarea produselor inteligente în sisteme de fabricație inteligente, prin intermediul IoT, este unul dintre pilonii celei de-a patra revoluții industriale.

Paradigma digitală a personalizării inteligente are trei caracteristici cheie determinate de geamănul digital, cadrul de personalizare inteligentă bazat pe date folosind geamănul digital. Există trei gemeni digitali implicați în procesele de personalizare inteligentă, inclusiv geamănul digital al produsului, geamănul digital al sistemului de producție și geamănul digital al mediului de utilizator.

Au fost analizate, de asemenea, metodele de dezvoltare a produselor personalizate cu arhitectură deschisă, identificându-se criteriile care stau la baza procesului de dezvoltare a acestor produse, fiind identificate posibilitățile de îmbunătățire.

În urma analizei stadiului actual al cercetărilor privind dezvoltarea produsului în cea de-a patra revoluție industrială, au fost constatate limitele, iar concluziile au fost folosite pentru stabilirea direcției principale a prezentei lucrări.

În **capitolul 3**, „Contribuții privind procesul de dezvoltare a produsului”, se prezintă o adaptare a procesului de dezvoltare ținând cont de inovațiile specifice celei de-a patra revoluții industriale și de condițiile impuse de acesta.

În vederea adaptării metodei de dezvoltare a produsului în contextul Industriei 4.0, s-a analizat în prima fază impactul digitalizării și necesitatea ca metoda de proiectare aleasă și instrumentul de configurare dezvoltat să țină cont de standardele de siguranță funcțională și cibernetică.

Cu scopul de a găsi o soluție care să satisfacă cerințele cu privire la dezvoltarea rapidă a unor produse sigure și cu costuri mici, se propune o variantă actualizată și adaptată la contextul digitalizării procesului de dezvoltare a produsului, bazată pe utilizarea eficientă a unor sisteme de baze de date fiabile.

Se consideră că personalizarea și chiar individualizarea produselor este realizabilă prin modularizare, chiar dacă gradul de personalizare este condiționat de limitările care țin de familia de produse, de limitările de proces și de potențiale probleme de calitate generate de varietatea mare de produse.

Reluând procesul de configurare a produselor cu arhitectura deschisă, sunt identificate posibilități de îmbunătățire.

De asemenea, s-a prezentat propunerea de eficientizare care are ca țintă faza de dezvoltare și care integrează proiectarea axiomatică, ca metodă de dezvoltare și instrument de configurare a produsului.

În ultima parte a acestui capitol, au fost identificate și analizate câteva dintre contribuțiile inteligenței artificiale aduse procesului de dezvoltare a produsului. Potențialul său este în continuă creștere și se va realiza odată cu avansul tehnologiei și a algoritmilor AI.

În **capitolul 4**, „Contribuții privind dezvoltarea configuratoarelor de produs”, este prezentat modelul instrumentului de configurare propus ca răspuns la dezavantajele și limitările identificate în raport cu instrumentele de configurare existente.

Personalizarea în masă (MP) a motivat companiile să treacă de la proiectarea produselor individuale la dezvoltarea familiilor de produse. În MP, accentul este pus pe dezvoltarea unei arhitecturi generice modulare de produs, din care vor deriva mai multe variante din aceeași familie. Odată ce nevoile clienților sunt înțelese corect, este dezvoltată o variantă de produs în cadrul arhitecturii generice de produs dezvoltate anterior, pentru a le satisface nevoile. Acest lucru se realizează prin configurarea produsului.

Configuratoarele de produse sunt instrumente indispensabile, care oferă posibilitatea de a crea un produs personalizat conform unor specificații exacte, reducând timpul și costurile de dezvoltare. Eficiența și eficacitatea unui astfel de configurator este dependentă de principiile de proiectare robustă integrate și de strategiile de gestionare a datelor.

Configuratorul propus oferă flexibilitate și eficiență în procesul de dezvoltare a produselor personalizate și individualizate. Acesta permite implicarea directă a clientului în faza de dezvoltare a produsului, facilitând colaborarea între membrii echipelor de proiectare. Instrumentele de configurare existente au dezavantaje și limitări, cum ar fi costurile ridicate și timpul îndelungat necesar pentru concepție și dezvoltare. De asemenea, piața de desfacere se restrânge, deoarece produsele individualizate satisfac nevoile specifice unui anumit client.

Au fost analizate cele două abordări în dezvoltarea configuratoarelor de produs: abordarea bazată pe atribute și abordarea bazată pe alternative. Într-o abordare bazată pe alternative, clienții sunt invitați să-și creeze produsul dintr-un set de mai multe părți de produs (module) alternative, în timp ce în abordarea bazată pe atribute, clienții sunt întrebați despre preferințele lor privind atributele produsului și, pe baza răspunsurilor lor este aleasă o propunere întreagă de produs, dintr-un set mare de opțiuni.

Modelul configuratorului de produs personalizat este conceput în contextul produselor cu arhitectură deschisă și are la bază metodologia *Axiomatic Design* (AD). Configuratorul este conceput astfel încât să nu limiteze alegerile făcute la modulele preexistente, ci atunci când cerințele clientului nu sunt acoperite de module disponibile să existe posibilitatea dezvoltării unuia sau mai multor module și integrării lor cu cele existente, cu scopul de a genera o soluție de proiectare nouă. Această abordare are ca punct central principiul independenței modulelor.

În final se prezintă premisele de dezvoltare a configuratoarelor de produs.

În **capitolul 5**, este prezentat un „Studiu de caz în industria de autovehicule”, care demonstrează modul de utilizare a configuratorului în procesul de dezvoltare a produsului și utilitatea sa în faza de colectare a cerințelor clientului, dar și în reducerea în ansamblu a timpului necesar lansării unui produs.

Configuratorul de produs dezvoltat este aplicat pentru configurarea produsului „Lampă de lucru” folosită la autovehicule utilitare.

Este evidențiată importanța utilizării configuratorului în dezvoltarea produselor, arătând cum acesta poate eficientiza procesul de colectare a cerințelor și poate reduce semnificativ timpul de lansare pe piață. Aceasta demonstrează că implementarea unor astfel de instrumente poate aduce beneficii considerabile în termeni de timp și resurse economisite, contribuind la succesul proiectelor de dezvoltare a produselor.

Capitolul 6 prezintă „Concluzii finale, contribuții personale și perspective de cercetare” viitoare.

Teza de doctorat intitulată "Dezvoltarea produsului pentru serii reduse de fabricație în industria de autovehicule, în contextul Industriei 4.0" a evidențiat importanța integrării noilor tehnologii digitale în procesul de dezvoltare a produselor, în special pentru serii reduse de fabricație. Industria 4.0 oferă un cadru inovator care permite un nivel superior de flexibilizare și personalizare a producției, reducând timpii de lansare pe piață și optimizând costurile de producție.

Teza a subliniat necesitatea colaborării între diferite departamente și actori implicați în procesul de dezvoltare a produselor, pentru a asigura o integrare eficientă a noilor tehnologii și pentru a răspunde cerințelor pieței într-un mod competitiv.

În concluzie, cercetările privind dezvoltarea produselor pentru serii reduse de fabricație și personalizate, bazate pe principiile Industriei 4.0, reprezintă o oportunitate semnificativă pentru companiile din industria de autovehicule, care își doresc creșterea competitivității și dezvoltarea de produse inovatoare, personalizate, de înaltă calitate, care să răspundă nevoilor specifice ale pieței, urmărind optimizarea costurilor de producție și a investițiilor, reducerea timpului de lansare în piață.

Astfel, se consideră că obiectivele propuse au fost îndeplinite.

Principalele contribuții aduse la procesul de dezvoltare a produselor pentru serii reduse de fabricație în industria de autovehicule, în contextul Industriei 4.0 sunt:

În domeniul cunoașterii, pe baza cercetării literaturii de specialitate: sinteza privind Industria 4.0 – definiții, caracteristici, tehnologii; inventarierea și analizarea paradigmelor actuale ale producției – personalizarea în masă, individualizarea în masă, personalizarea inteligentă; analizarea obiectivelor strategice ale fabricației circulare; definirea și caracterizarea produselor inteligente; analizarea procesului de dezvoltare de noi produse, a produselor inteligente și a cadrului de personalizare inteligentă bazată pe date, folosind geamănul digital; analizarea procesului de dezvoltare a produselor cu arhitectură deschisă pentru personalizare și individualizare în masă, în vederea configurării.

În domeniul cercetării conceptuale: adaptarea metodei de dezvoltare a produsului în contextul Industriei 4.0, bazat pe digitalizare, luând în considerare rolul bazelor de date și a modularității, pentru personalizarea produselor; propunerea de eficientizare a procesului de dezvoltare a produsului, cu accent pe faza de pre-dezvoltare; punerea în evidență a rolului inteligenței artificiale în procesul de dezvoltare a produsului; configuratorul conceput, ca soluție integrată a două metode de configurare - *Configure to Order* și *Engineering to Order*; integrarea *Axiomatic Design* în arhitectura configuratorului de produs cu arhitectură deschisă.

În domeniul cercetării aplicative: validarea conceptelor elaborate prin realizarea unui configurator de produs folosit pentru colectarea cerințelor clientului, implicarea directă a acestuia în procesul de dezvoltare, asigurând personalizarea și individualizarea produsului și reducând timpul necesar lansării în fabricație. Produsul configurat a fost o lampă de lucru folosită la autovehicule utilitare.

Aceste contribuții evidențiază eforturile de a integra noile tehnologii și de a optimiza procesele de dezvoltare a produselor în industria de autovehicule, în contextul Industriei 4.0.

Lucrarea evidențiază mai multe direcții de cercetare viitoare, în special în contextul utilizării inteligenței artificiale (AI) la dezvoltarea produselor și optimizarea proceselor de fabricație.

Inteligența artificială poate fi utilizată pentru a analiza datele colectate de la produsele inteligente și pentru a identifica oportunități de îmbunătățire a designului și funcționalității acestora. Prin utilizarea algoritmilor de *Machine Learning*, se pot dezvolta modele predictive care să anticipeze cerințele clienților și să optimizeze procesul de dezvoltare a produselor.

AI poate facilita personalizarea produselor prin analiza datelor de la clienți și identificarea preferințelor acestora. Geamănul digital (*Digital Twin*) este o tehnologie cheie în acest context, permițând simularea și optimizarea produselor în mediul virtual înainte de producția efectivă. Aceasta poate duce la o personalizare mai eficientă și la reducerea costurilor de producție.

În egală măsură, AI poate contribui la dezvoltarea produselor inteligente, care să fie capabile să se adapteze la condițiile de utilizare și să ofere informații în timp real despre starea lor. Aceste produse pot fi integrate în sistemele de fabricație inteligente, contribuind la creșterea eficienței și a productivității.

Aceste perspective de cercetare subliniază importanța integrării AI în procesul de dezvoltare a produselor și optimizarea proceselor de fabricație, contribuind la creșterea competitivității și la dezvoltarea unor produse inovatoare și de înaltă calitate.