Universitatea Națională de Știință și Tehnologie

POLITEHNICA Bucureşti

Facultatea Inginerie Industrială și Robotică

Departamentul de Roboți și sisteme de producție

Rezumat teză de doctorat

OPTIMIZAREA FLUXULUI DE ASAMBLARE CABLAJ ÎN INDUSTRIA CONSTRUCȚIILOR DE AUTOMOBILE

Doctorand:

ȘTEFAN (IORGA) Ioana

Coordonator:

Prof. dr. ing. Costel Emil COTEȚ

2025

Cuprins

Cuvânt înainte 4

Introducere 5

Legendă 6

Capitolul 1. Evoluția industriei auto și transformarea producției de cablaje electrice 13

1.1.Industria auto – context și tendințe istorice 13

1.2. Evoluția producției de cablaje electrice în industria auto 14

1.3. Principiile de organizare a producției de cablaje de-a lungul timpului 14

1.4. Evoluția arhitecturii cablajelor electrice 15

1.5. Tendințe actuale și direcții de dezvoltare..... 16

Capitolul 2. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul automatizării fluxului de asamblare cablaj în industria construcțiilor de automobile..... 18

2.1. Complexitatea cablajelor electrice și implicațiile asupra organizării liniilor de asamblare 18

2.2. Procesul de concepție cablaj electric..... 21

2.3. Procesul de producție cablaj..... 22

2.3.1. Pregătirea elementelor prefabricate..... 22

2.3.2. Depozitarea elementelor prefabricate..... 26

2.3.3. Testarea eșantioanelor reprezentative..... 27

2.3.4. Tehnologia de producție LAD (linie de asamblare dinamică)..... 30

2.3.5. Fluxul logistic al unei linii de asamblare LAD 32

2.3.6. Studiu de caz privind optimizarea fluxului de asamblare a cablajului..... 33

Capitolul 3. Perspective în automatizarea fluxului de asamblare cablaj în industria construcțiilor de automobile..... 39

Capitolul 4. Utilizarea tehnologiei RFID în cadrul sistemelor de depozitare componente cablaj..... 57

4.1. Percepția furnizorilor de componente din industria auto asupra tehnologiilor moderne de depozitare..... 58

4.2. Tehnologia RFID..... 59

4.3. Model conceptual de implementare al tehnologiei RFID în cadrul depozitelor de componente cablaj..... 63

4.4. Inventarierea automata a componentelor..... 87
4.4.1. Implementarea inventarierii automate in cadrul modelului conceptual..... 90
4.4.2. Analiza experimentala a structurii propuse..... 96
4.4.2.1. Metodologia de testare 97
4.4.2.2. Cartografierea câmpului de citire 98
4.4.2.3. Histerezis (o singura unitate de ambalare)..... 100
4.4.2.4. Histerezis (subunitati de ambalare)..... 102
4.4.2.5. Comparatie histerezis un singur tag vs. taguri multiple..... 104
4.4.2.6. Distanta si orientare (Y=0)..... 105
4.5. Concluzii..... 108

*Capitolul 5. O*ptimizarea fluxului logistic al asamblarii cablajelor prin introducerea unei noi structuri liniei de asamblare..... 110
5.1. Perspective și constatări în optimizarea cablajului 110
5.2. Studiu de caz..... 112
5.2.1. Structura initiala a liniei de asamblare..... 112
5.2.2. Simularea si analiza structurii initiala a liniei de asamblare in WITNESS Horizon 114
5.2.3. Analiza posibilităților de optimizare a structurii inițiale a liniei de asamblare folosind un mode matematic..... 117
5.2.4. Introducerea unei noi arhitecturi a liniei de asamblare..... 120
5.2.5. Simularea si analiza structurii propuse a liniei de asamblare in WITNESS Horizon 123
5.3. Metode de colectare și reciclare a deșeurilor de producție în fabricarea cablajelor electrice..... 127
5.4. Concluzii..... 130

Capitolul 6. Optimizarea asamblarii fuzibilelor în cutiile de fuzibile si relee folosind tehnologia API pentru digital twin..... 131
6.1. Introducere si obiectivele cercetarii..... 131
6.2. Stadiul actual al cercetarii..... 131
6.3. Caracteristicile fuzibilelor si specificatiile cutiilor de fuzibile si relee..... 133
6.4. Arhitectura sistemului propus..... 135
6.4.1. Configurarea parametrilor brațului robotic..... 136
6.4.2. Metodologie si implementare..... 139
6.5. Dovada conceptului pentru optimizarea asamblării fuzibilelor..... 140

6.5.1. Crearea modelului digital twin utilizând tehnologia API..... 141
6.5.2. Configurarea și integrarea robotului Ufactory Lite 6..... 144
6.6. Rezultate..... 146
6.7. Concluzii..... 148

Capitolul 7. Concluzii finale și contribuții principale la optimizarea fluxului de asamblare cablaj în industria construcțiilor de automobile..... 149
Bibliografie 152

Introducere

Industria auto trece printr-o transformare majoră, determinată de trendurile globale privind electrificarea, siguranța activă și pasivă, precum și integrarea funcțiilor de conectivitate și infotainment. Toate acestea conduc la o creștere considerabilă a complexității cablajelor electrice, care au devenit sisteme extinse, cu mii de conexiuni, zeci de kilograme de fire și sute de componente. În acest context, cablajul nu mai este doar un ansamblu pasiv, ci un element strategic pentru funcționarea vehiculului modern.

Producția de cablaje electrice rămâne însă una dintre cele mai intens dependente de factorul uman în industria auto. În pofida automatizării crescute din alte sectoare, liniile de asamblare a cablajelor se bazează în proporție de peste 80% pe munca manuală, dată fiind flexibilitatea redusă a componentelor și complexitatea operațiilor de inserție, matisare și fixare. Această dependență generează probleme precum: variații mari de timp de lucru între operatori, timpi morți în alimentare, erori de manipulare și dificultăți de standardizare a calității.

Aceste provocări se suprapun cu constrângerile impuse de industrie: termene de livrare stricte, diversitatea mare a referințelor de cablaje, spațiu limitat în fabrici și presiuni continue pentru reducerea costurilor. În plus, cerințele legate de trasabilitate și sustenabilitate fac ca procesele logistice și de asamblare să fie nu doar eficiente, ci și transparente și compatibile cu principiile economiei circulare.

Motivația prezentei cercetări derivă din nevoia de a găsi soluții integrate pentru creșterea productivității liniilor de cablaje, reducerea blocajelor și eliminarea timpi-lor morți, precum și digitalizarea fluxurilor logistice. Abordarea combină metode tradiționale de optimizare a liniilor (echilibrarea sarcinilor, reorganizarea fluxului) cu soluții digitale moderne (RFID pentru inventar automat, simulare Witness pentru testarea scenariilor) și cu perspective de automatizare parțială sau totală a unor procese critice.

Obiectivul general al tezei este creșterea productivității și flexibilității în producția de cablaje prin:

i. optimizarea distribuției operațiilor pe posturi de lucru,
ii. introducerea unei noi arhitecturi de linie de asamblare,
iii. integrarea tehnologiei RFID pentru depozitare și inventariere automată, și

iv. definirea unui cadru metodologic pentru automatizarea componentelor flexibile. Acest obiectiv este susținut de o serie de ipoteze de lucru, testate prin studii de caz și simulări.

Ipotezele de lucru ale tezei se formulează astfel:

1) redistribuirea operațiilor între posturi și echilibrarea sarcinilor conduc la eliminarea blocajelor și creșterea productivității;
2) arhitectura hibridă (linie dinamică + carusel) permite reducerea timpilor morți și stabilizarea takt time-ului;
3) tehnologia RFID, implementată la nivelul depozitului, asigură inventariere automată și trasabilitate completă;
4) reguli de proiectare orientate spre automatizare și clasificarea componentelor flexibile pot crește gradul de automatizare în procesele de asamblare.

Contribuțiile așteptate ale cercetării sunt atât teoretice, cât și practice. Din punct de vedere teoretic, lucrarea dezvoltă un model matematic de optimizare a fluxului de asamblare (programare liniară, dualitate, ecarturi complementare) și propune o clasificare a componentelor flexibile după criterii relevante pentru automatizare. Din punct de vedere practic, teza validează o nouă arhitectură de linie prin simulări Witness, descrie un model complet de implementare RFID în depozite de cablaje și demonstrează printr-un pilot avansat (inserție automată de siguranțe/relee) aplicabilitatea conceptului de Digital Twin.

Structura tezei este organizată astfel încât să reflecte etapele logice ale cercetării și rezultatele obținute:

Capitolul 1 prezintă evoluția industriei auto și transformarea producției de cablaje electrice, cu accent pe tendințele actuale și direcțiile de dezvoltare.

Capitolul 2 analizează particularitățile cablajelor electrice și provocările asociate organizării liniilor de asamblare, inclusiv impactul ponderii muncii manuale asupra productivității.

Capitolul 3 detaliază perspectivele în automatizarea fluxului de asamblare al cablajelor, punând accent pe particularitățile caracteristice ale acestora și pe analiza potențialului de automatizare.

Capitolul 4 abordează integrarea tehnologiei RFID în procesele logistice și propune soluții pentru inventarierea automată.

Capitolul 5 propune o noua structura a liniei de asamblare cablaj si valideaza potentialul de optimizare prin intermediului simularilor in Witness Horizon Software.

Capitolul 6 propune automatizarea inserției fuzibilelor în cutiile de fuzibile și relee, utilizând concepte de Digital Twin și robotică.

Capitolul 7 include concluziile generale și sintetizează contribuțiile originale ale cercetării.

Prin această structură, teza urmărește atât fundamentarea teoretică, cât și demonstrarea aplicabilității practice a soluțiilor propuse, contribuind la dezvoltarea unui cadru științific și tehnologic pentru optimizarea producției de cablaje electrice în industria auto.

Capitolul 1. Evoluția industriei auto și transformarea producției de cablaje electrice

Capitolul introductiv analizează evoluția industriei auto din perspectiva transformărilor tehnologice, organizaționale și arhitecturale care au influențat direct producția de cablaje electrice. Industria auto este prezentată ca un domeniu dinamic, aflat într-o permanentă adaptare la inovații, reglementări și schimbările comportamentului consumatorilor. În peste un secol de dezvoltare, producția auto a trecut de la manufactură la sisteme globalizate și digitalizate, iar cablajele electrice – inițial simple ansambluri de câteva fire – au devenit infrastructuri complexe ce interconectează mii de funcții vehiculare.

Capitolul urmărește evoluția cablajelor în paralel cu etapele industriei auto: primele vehicule dotate minimal, introducerea producției de masă, creșterea confortului și siguranței, integrarea electronicii și, în final, tranziția către vehiculul digital. Complexitatea tot mai ridicată a cablajelor a determinat atât standardizarea componentelor și proceselor, cât și necesitatea flexibilizării producției. Deși automatizarea completă este încă limitată de natura materialelor, operații critice precum tăierea, dezizolarea sau sertizarea au fost puternic automatizate.

Un accent important este pus pe evoluția organizării producției: de la metode artizanale, la taylorism și linii de asamblare, până la implementarea principiilor lean și a standardelor ISO/IATF, în contextul relocării producției către regiuni cu costuri reduse. Organizarea actuală se bazează pe o combinație între muncă manuală calificată și automatizare selectivă.

Capitolul tratează și transformarea arhitecturii electrice a vehiculului: de la conexiuni punct-la-punct, la structuri modulare cu ECU-uri, apoi la rețele distribuite și, în prezent, la arhitecturi zonale care susțin vehiculul definit de software. Evoluția vehiculelor electrice a introdus cablaje de înaltă tensiune, cu cerințe stricte de izolație, siguranță și management termic.

În final, sunt prezentate tendințele actuale: digital twin și Industria 4.0, automatizare prin roboți colaborativi, standardizare avansată, utilizarea materialelor ușoare, integrarea Ethernet automotive, sustenabilitate și orientarea către cablaje inteligente. Aceste direcții anticipează o transformare profundă a producției de cablaje, în care digitalizarea, modularitatea și eficiența devin elemente centrale.

Capitolul 2. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul automatizării fluxului de asamblare cablaj în industria construcțiilor de automobile

Capitolul 2 analizează complexitatea cablajelor electrice auto și impactul acesteia asupra posibilităților de automatizare a fluxurilor de asamblare. Creșterea numărului de funcții electrice și electronice a condus la diversificarea masivă a cablajelor, acestea incluzând mii de componente și zeci de procese diferite. Exemple precum Audi A8 sau cablajul motor Mercedes-Benz OM654 ilustrează nivelul ridicat de complexitate structurală și funcțională al produselor moderne.

Procesul de concepție al unui cablaj presupune o colaborare strânsă între echipele de studiu electric și cele mecanice. Se utilizează software specializat (ex. Capital, Catia, LDorado) pentru a defini arhitectura cablajului, traseele și interconexiunile. Restricțiile impuse sunt numeroase: spațiul disponibil, toleranțele mecanice, greutatea totală, compatibilitatea electromagnetică și cerințele de siguranță. În această etapă se definesc și codurile de identificare ale componentelor, planurile de testare și modul de integrare în vehicul.

Procesul de producție al cablajelor cuprinde mai multe etape. Prima etapă este pregătirea elementelor prefabricate: tăierea firelor la lungimi precise, dezizolarea capetelor, aplicarea terminalilor prin sertizare, inserția garniturilor și marcarea firelor pentru trasabilitate. Echipamente precum Komax Alpha sau Zeta automatizează parțial aceste operații, reducând variațiile de calitate. După pregătirea firelor, urmează depozitarea elementelor prefabricate. Aceasta este o etapă critică, deoarece firele și conectorii trebuie organizate pe loturi și trimise către liniile de asamblare în cantități exacte și la timp. Lipsa unui control strict generează întârzieri și blocaje în linie.

Capitolul descrie principalele tipuri de linii de asamblare utilizate în industrie: liniile dinamice LAD, folosite pentru module și cablaje de dimensiuni reduse, și liniile de tip carusel, utilizate pentru produse complexe și de mari dimensiuni. Alegerea tipului de linie influențează direct ergonomia, logistica internă și posibilitățile de automatizare.

Se evidențiază dificultățile majore în automatizarea integrală a procesului: flexibilitatea firelor, varietatea mare de componente, diversitatea operațiilor (sertizare, sudură ultrasonică, inserție în conectori, aplicare protecții), numărul ridicat de versiuni și necesitatea

adaptării rapide la modificările de proiect. Aceste limitări explică de ce producția de cablaje rămâne în proporție semnificativă dependentă de operarea manuală.

O parte importantă a capitolului este dedicată procesului de concepție a cablajului, care include definirea schemei electrice, alegerea diametrului firelor, protecțiilor și conectorilor în funcție de poziția pe vehicul, analiza interferențelor electromagnetice și modelarea 3D, necesară pentru validarea traseului și evitarea contactului cu zone agresive sau greu accesibile. Pe baza modelului 3D se realizează planșetele de asamblare 2D folosite în producție.

Capitolul detaliază apoi etapele procesului de producție: pregătirea elementelor prefabricate (cu cel mai ridicat nivel de automatizare), depozitarea în zona de picking și testarea eșantioanelor reprezentative. Sunt prezentate utilaje moderne precum mașinile automate de sertizat Komax Alpha, mașinile de torsadat/sertizat și echipamentele de sudură ultrasonică, evidențiind rolul lor în creșterea productivității și calității.

Fluxul de asamblare LAD este analizat în detaliu, incluzând modul de alimentare a posturilor de lucru, succesiunea operațiilor și testarea electrică 100% a produselor. Sunt descrise procedurile de verificare (continuitate, etanșeitate, prezența și conformitatea accesoriilor) și dificultățile retușului manual, care afectează semnificativ timpii de producție.

Tehnologia LAD (linie de asamblare dinamică) este una dintre soluțiile consacrate în industria cablajelor. Prezinta avantajul este că sarcinile pot fi împărțite în mod secvențial și sincronizat, reducând timpii de manipulare. Totuși, provocările constau în echilibrarea încărcării între posturi și asigurarea unei alimentări logistice fluente.
Un flux dezechilibrat poate conduce la acumulări excesive într-un buffer și la lipsuri la alte posturi, ceea ce perturbă ritmul global al liniei. De aceea, modelarea și simularea acestui flux sunt esențiale pentru a identifica blocajele și a testa scenarii de optimizare.
Un studiu de caz preliminar a fost realizat cu ajutorul software-ului Witness Horizon. Modelul includea 13 posturi de lucru, 9 buffere și 19 operatori. Rezultatele au arătat acumulări excesive după stația 4 și creșteri progresive ale timpilor de repaus la operatorii din capătul liniei. Trei ipoteze de optimizare au fost testate:

(I) reducerea timpilor de lucru,

(II) scurtarea timpilor de alimentare și

(III) redistribuirea operațiilor și reducerea numărului de operatori. Doar aceasta ipoteza a condus la deblocarea fluxului, crescând semnificativ productivitatea pe schimb și uniformizând ratele de ocupare.

Concluzia acestui capitol este că liniile de asamblare manuale sau semi-automatizate se confruntă cu limitări structurale, iar soluția nu constă doar în accelerarea unor procese individuale, ci în redistribuirea inteligentă a sarcinilor și reorganizarea fluxului. Aceste rezultate justifică explorarea unor arhitecturi hibride și integrarea unor tehnologii digitale de sprijin, precum simularea și trasabilitatea RFID, ce vor fi detaliate în capitolele următoare.

Capitolul 3. Perspective în automatizarea fluxului de asamblare cablaj în industria construcțiilor de automobile

Automatizarea fluxului de asamblare a cablajelor electrice auto este o direcție strategică pentru industrie, motivată de necesitatea creșterii productivității, reducerii dependenței de resursa umană și asigurării calității constante. În prezent, peste 80% din operațiuni rămân manuale, în special cele care implică componente flexibile, ceea ce limitează ritmul de producție și crește costurile.

Un prim nivel al automatizării este reprezentat de echipamentele Komax din seria Zeta 640/650. Aceste utilaje permit procesarea completă a firelor electrice: tăiere, dezizolare, aplicarea terminalelor, inserția garniturilor, marcare inkjet și verificări de calitate (pull-test, crimp-force monitoring). Sistemul poate gestiona până la 36 de tipuri de fire diferite, cu un nivel ridicat de flexibilitate pentru loturi variate. Avantajul major este reducerea erorilor umane și scăderea timpilor de pregătire.

La un nivel superior, echipamentele Komax Omega 745/755 automatizează operații complexe precum inserția simultană a firelor în conectori multipolari, aplicarea garniturilor și închiderea leviere-lor. Controlul de forță și unghi al mișcărilor garantează precizia inserțiilor chiar și pentru componente miniaturizate, ceea ce extinde automatizarea către zone anterior inaccesibile. Aceste echipamente aduc un câștig semnificativ în consistența calității, dar implică investiții ridicate și necesită calibrare atentă.

Metodologia APA (Automation Potential Analysis), dezvoltată de Fraunhofer IPA, propune un cadru de analiză sistematică a potențialului de automatizare pentru fiecare operație. Fiecare secvență – separare, manipulare, poziționare, îmbinare – este evaluată prin indicatori tehnici și economici, iar rezultatele permit clasificarea proceselor ca fiind complet automatizabile, parțial automatizabile sau neautomatizabile.

Un rol important în viitor îl are colaborarea om–robot. Coboții (robot colaborativi) pot prelua sarcini repetitive sau ergonomice dificile (ridicarea componentelor, poziționare preliminară), lăsând operatorii umani să finalizeze operații care necesită dexteritate fină sau adaptare vizuală. Totuși, manipularea componentelor flexibile, precum firele electrice, rămâne o provocare tehnică, deoarece acestea nu își păstrează forma și se deformează ușor.

Pentru a sprijini dezvoltarea automatizării, teza propune o clasificare a componentelor flexibile după mai multe criterii: forma de bază (cubică, plată, lungă), simetrie, rigiditate (coeficient KBs), modul de aprovizionare (bulk, role), tipurile de deformare posibile. Această clasificare permite identificarea zonelor unde automatizarea este fezabilă și unde sunt necesare reproiectări.

În plus, este introdus un indicator specific – indicele pcvm (probabilitatea ca mișcările Poziționează/Controlează/Vizionează/Manipulează să fie automatizabile). Acest indice a fost aplicat pe mișcările „Poziționează” și „Eliberează”, arătând că prin reproiectarea unor componente, potențialul de automatizare crește de la ~54% la ~93%. De exemplu, înlocuirea unei laniere flexibile cu un colier rigid a simplificat manipularea și a permis utilizarea unui gripper standardizat.

Recomandările de proiectare formulate vizează adaptarea componentelor pentru manipulare robotică: includerea de zone de prindere rigide, limitarea gradelor de libertate nedorite, marcaje vizuale pentru recunoaștere optică și standardizarea dimensiunilor. Aceste reguli facilitează integrarea ulterioară a roboților și reduc costurile de automatizare.

Concluzia acestui capitol este că viitorul automatizării cablajelor electrice va combina echipamente specializate de înaltă performanță, metodologii de analiză (APA), reproiectarea componentelor și colaborarea om–robot. Astfel, se creează premisele pentru integrarea unor soluții de tip Digital Twin și pentru trecerea treptată de la producția manuală la producția asistată și, în perspectivă, la automatizarea aproape completă.

Capitolul 4. Utilizarea tehnologiei RFID în cadrul sistemelor de depozitare componente cablaj

Transformările accelerate din sectorul auto – presiunea decarbonizării, intensificarea concurenței globale și volatilitatea cererii – impun furnizorilor de componente o creștere susținută a productivității și a trasabilității. În această ecuație, depozitele de componente devin o verigă strategică: în cadrul lor se asigură disponibilitatea la timp a materialelor, integritatea calității și reziliența la șocuri de aprovizionare. Automatizarea depozitului prin tehnologii moderne (WMS, RFID, Voice/Light Picking, AS/RS) poate reduce erorile de manipulare, accelera recepțiile, oferi inventar în timp real și activa mecanisme de reaprovizionare automată, în special atunci când sistemele furnizor–client sunt interconectate. RFID iese în evidență drept tehnologie-cheie datorită identificării fără contact, a citirii simultane a mai multor etichete și a integrării facile în fluxuri logistice complexe.

Deși fiabilitatea tehnologiilor moderne este dovedită, adopția rămâne eterogenă. Un sondaj realizat în rândul furnizorilor sloveni pentru industria auto indică preferința persistentă pentru soluții tradiționale (coduri de bare), în detrimentul RFID sau Voice/Light Picking – semn al unei maturități tehnologice inegale și al constrângerilor investiționale. Această constatare, deși locală, oferă un indiciu util asupra barierelor percepute în Europa Centrală și de Est.

Tehnologia RFID (Radio Frequency Identification) oferă o alternativă performantă la codurile de bare tradiționale. Spre deosebire de acestea, etichetele RFID nu necesită contact vizual direct și permit citirea simultană a zeci sau sute de etichete. Există trei mari categorii: LF (125–134 kHz), HF (13,56 MHz) și UHF (860–960 MHz). Pentru aplicații logistice, UHF este preferat datorită distanței mari de citire (până la câțiva metri) și a vitezei ridicate

Arhitectura RFID include cititoare (fixe/mobile), antene, etichete (taguri) și o componentă software (server + middleware) ce colectează, filtrează și distribuie datele către aplicațiile organizației. Etichetele acoperă o plajă tehnologică largă: LF (raze scurte, robuste la medii dificile), HF (control acces/carduri), UHF (depozite, supply chain – raze 3–8 m tipic), până la SHF pentru aplicații speciale. Din perspectiva energiei, tagurile pasive (fără baterie) domină cost–beneficiu, semi-pasive extind citirea prin baterie dedicată logicii, iar activele oferă autonomii/distanțe mari pentru active scumpe sau mobile.

Tehnologia RFID (Radio Frequency Identification) oferă o alternativă performantă la codurile de bare tradiționale. Spre deosebire de acestea, etichetele RFID nu necesită contact

vizual direct și permit citirea simultană a zeci sau sute de etichete. Există trei mari categorii: LF (125–134 kHz), HF (13,56 MHz) și UHF (860–960 MHz). Pentru aplicații logistice, UHF este preferat datorită distanței mari de citire (până la câțiva metri) și a vitezei ridicate.

Modelul propus configurează depozitul pe patru zone interconectate, pentru a susține un flux logistic cu variabilitate ridicată (produse, ambalaje, versiuni, urgențe de producție). Punctele de control sunt:

- Recepția: paleții intră prin portaluri RFID; etichetele sunt citite automat, datele validate și asociate unui traseu/unei locații; ecranele HMI pot afișa „drumul optim" până la raft.
- Depozitarea: stivuitoarele, echipate cu kit RFID (cititori pasivi/activi, antene, mini-PC, semafor LED și senzor optic de palet), preiau paleții, îi duc în locații, iar etichetele rafturilor sunt scanate pentru asociere/dezasociere automată între marfă și locație
- Zona de pregătire (picking): sub-ambalajele sunt sortate, re-etichetate ierarhic (palet → subunități nivel 1 → nivel 2), astfel încât sistemul să reflecte fidel conținutul fiecărui container și să faciliteze alocările rapide pe comenzi de producție
- Expedierea internă către producție: ieșirea prin portal citește volumul și identitatea, actualizează stocul în timp real, iar middleware-ul publică evenimentele către aplicațiile

„Pucurile RFID" – etichete active dispersate în zonele cheie – adaugă o dimensiune de localizare: când stivuitorul se apropie, acestea se activează și trimit poziția (LF pentru activare precisă, UHF pentru transmisie). Corelând jurnalele de la portaluri, citirile mobile și pucurile, sistemul poate reconstrui traseele reale, detectând deviații, întârzieri sau potențiale

Un element central al modelului este standardizarea etichetării:

- etichete pasive UHF pentru cost redus și compatibilitate cu fluxuri de mare volum;
- etichete pe palet și pe subunități, cu legături ierarhice în sistem (palet ↔ nivel 1 ↔ nivel 2);
- reguli de poziționare a etichetelor (loc, înălțime, orientare) și mod de încărcare a paleților pentru a asigura vizibilitatea radio;

- obligații contractuale către furnizori: livrările să sosească deja etichetate, reducând sarcina de re-etichetare și riscul de neconformități la recepție

Arhitectura sistemului RFID propus include cititoare fixe montate la intrările și ieșirile depozitului, portaluri RFID prin care trec containerele cu componente, stivuitoare echipate RFID, etichete RFID (pucuri) atașate in puncte strategice de rafturi și un sistem software middleware conectat la baza de date ERP. Această arhitectură permite identificarea automată a fiecărui container și trasabilitatea completă a mișcărilor acestuia.

Model conceptual de implementare al tehnologiei RFID propus, descrie în detaliu configurația portalului RFID: coloană master cu mini-PC industrial, ecran HMI de 12”, cititor UHF, antene direcționale, modul RFID multiprotocol, switch Ethernet, detector de trecere și semafor LED pentru feedback vizual; o coloană slave extinde câmpul și acoperirea. Toate sunt alimentate la 24V, rezistente industrial (IP, temperatură, vibrații) și integrează protocoale Ethernet industriale. Descrie de asemenea si configuratia kiturilor RFID cu care au fost echipate stivuitoarele.

Funcționalitățile cheie ale acestui sistem sunt:

(i) asocierea automată a containerelor cu ordinele de producție,

(ii) dezasocierea acestora odată ce au fost descărcate pe linie,

(iii) rutarea automată a containerelor către secțiile corespunzătoare și

(iv) inventarierea instantanee a întregului depozit printr-o simplă interogare a bazelor de date.

Chiar dacă stocul „în timp real” derivă din evenimentele RFID curente, inventarierea periodică rămâne necesară pentru validare și calibrare. Materialul prezintă mai multe opțiuni: cititoare portabile, vehicule teleghidate sau cititoare fixe pe tavan/raft, toate având la bază estimarea distanței folosind RSSI. Se discută și abordări avansate de localizare SAR (Synthetic Aperture Radar) adaptate RFID, comparând variantele SAR-WA (traiectorii singulare) și MT-SAR (traiectorii multiple); ultima obține precizie superioară (2–4 cm) în experimente pe robot mobil într-un depozit controlat.

Modelul conceptual propune UGV cu tracțiune integrală (stabilitate, frânare servo, autonomie adecvată, protecție IP), echipat cu cititor UHF, patru antene compacte RAIN RFID și mini-PC, pentru inventarieri autonome. Fluxul recomandat: etapa de implementare (mapare laser, trasee, citiri de referință MT-SAR, calibrare la interferențe) și etapa operațională (rundă periodică de scanare, export evenimente în middleware și reconciliere automată în WMS/ERP).

Pentru validarea aplicabilității tehnologiei RFID în procesele de inventariere automată din cadrul depozitului unui producător de cablaje electrice, au fost efectuate măsurători experimentale axate pe caracterizarea câmpului de citire, determinarea limitelor de histerezis și analiza dependenței performanței de distanță și orientare a etichetelor. Obiectivele experimentului au vizat identificarea zonelor optime de citire ale antenei RFID, prin delimitarea regiunilor stabile și a zonelor moarte, analiza fenomenului de histerezis la nivelul etichetelor individuale și multiple, pentru a înțelege persistența semnalului și impactul acesteia asupra acurateței inventarierii, precum și evaluarea influenței orientării etichetelor asupra razei și fiabilității detecției.

- Cartografierea câmpului arată o zonă de intrare optimă în intervalul X ≈ 80–100 cm și Y ≈ ±30 cm (când antena este în origine), dar și „insule” și „găuri” tipice radiației UHF. Odată stabilită prima citire, menținerea detecției se poate face până aproape de antenă (~5 cm), ceea ce evidențiază histerezisul operațional: pragul de intrare este mai restrictiv decât pragul de menținere. Implicația practică: traseele obiectelor trebuie aliniate cu „coridorul de achiziție”, iar discontinuitățile se compensează prin antenne suplimentare sau ajustări de unghi
- Histerezis – un singur tag: zona centrală (X = 30–60 cm) oferă predictibilitate (diferențe 1–2 cm între intrare/ieșire); la extremități (X ≥ 90 cm) histerezisul crește (până la ~4.5 cm), mai ales pe direcția negativă a axei Y, reflectând asimetria câmpului și posibile
- Histerezis – taguri multiple (subunități ambalate): la distanțe mari, histerezisul se amplifică (până la ~9 cm la X ≈ 97 cm), cu asimetrie accentuată pe Y negativ, din cauza ecranărilor/reflexiilor induse de ambalarea complexă. Concluzie: zona optimă pentru trecerea cutiilor ambalate este proximal–centrală (X = 5–45 cm), unde pragurile sunt clare și stabile
- Distanță și orientare (Y = 0): performanța depinde pronunțat de unghi. 30°–60° oferă cele mai bune raze (până la 80–90 cm), 180° rămâne stabilă până la ~75 cm, iar 90° este nefavorabil (citiri doar 5–15 cm). Implicație: standardizarea orientării etichetelor și ghidarea fluxurilor prin zonele cu câmp stabil sunt critice pentru robustețe.

Aceste rezultate validează ideea că performanța unui sistem RFID este rezultatul interacțiunii dintre geometria câmpului, histerezis, numărul și orientarea tagurilor, precum și caracteristicile ambalajelor..

Soluțiile mobile pentru inventariere adaugă flexibilitate. Un vehicul ghidat autonom (UGV) echipat cu un cititor RFID poate parcurge depozitul și efectua inventarierea completă fără întreruperea activității. În depozitele mari, dronele echipate cu antene RFID pot survola rafturile, reducând timpul necesar inventarierii de la câteva zile la câteva ore.
Beneficiile implementării RFID sunt multiple: reducerea semnificativă a erorilor de inventar, trasabilitate completă a componentelor, integrarea digitală a fluxului logistic cu liniile de asamblare și eliminarea necesității inventarierii manuale. În plus, RFID oferă date în timp real, ceea ce facilitează planificarea producției și optimizarea resurselor.

Concluzia acestui capitol este că RFID nu reprezintă doar o tehnologie de identificare, ci un instrument strategic pentru digitalizarea depozitelor și integrarea acestora în paradigma Industry 4.0. Implementarea sa creează premisele pentru sisteme complet conectate, în care fluxurile logistice și cele de producție sunt monitorizate și optimizate în timp real.

Capitolul 5. Optimizarea fluxului logistic al asamblării cablajelor prin introducerea unei noi structuri a liniei de asamblare

Structura inițială a liniei de asamblare analizată în studiu include 13 posturi de lucru, 9 buffere și 19 operatori. În configurația de bază, fluxul de producție se confrunta cu blocaje semnificative, în special după stația 4, unde acumulările de produse semifabricate creau întârzieri și dezechilibre majore. Operatorii din capătul liniei înregistrau perioade lungi de repaus, în timp ce alții erau supraîncărcați, ceea ce indica o distribuție ineficientă a sarcinilor.

În acest context, au fost formulate trei ipoteze de optimizare. Prima ipoteză a vizat reducerea timpilor de lucru prin creșterea productivității individuale a operatorilor. A doua ipoteză a avut în vedere reducerea timpilor de alimentare, printr-o mai bună coordonare logistică și scurtarea traseelor de aprovizionare. Cea de-a treia ipoteză a propus redistribuirea operațiilor între posturi și reducerea numărului de operatori. Rezultatele simulărilor au arătat

că doar ipoteza a treia a condus la o îmbunătățire reală, eliminând blocajele și crescând productivitatea.

Pe baza acestor rezultate, a fost propusă o nouă arhitectură a liniei, cu structură hibridă care îmbină avantajele unei linii de tip LAD (asamblare dinamică) cu cele ale unui carusel. Noua linie este organizată în două laturi identice, fiecare alimentată simetric, ceea ce permite o distribuție mai uniformă a sarcinilor și o reducere semnificativă a acumulărilor în buffere.

Simulările realizate în Witness Horizo au confirmat validitatea arhitecturii propuse. Modelul parametric a evidențiat o creștere a productivității cu aproximativ 12%, linia fiind capabilă să producă 296 de cablaje în două schimburi, comparativ cu 264 în configurația inițială. Takt time-ul a scăzut de la 6,80 minute la 6,08 minute, ceea ce reflectă o sincronizare mai bună a operațiilor.

Analiza ratelor de ocupare a operatorilor a arătat o distribuție mult mai echilibrată a sarcinilor, cu reducerea timpilor de repaus și eliminarea supraîncărcării la anumite posturi. În plus, timpii de tranzit între buffere au fost reduși, iar acumulările excesive au fost eliminate. Acest lucru a permis obținerea unei stabilități mai mari a fluxului și a unui randament general superior.

Un element central al cercetării l-a constituit integrarea unui model matematic de optimizare bazat pe programare liniară. Funcția obiectiv a urmărit maximizarea productivității prin minimizarea timpilor de lucru pe posturi, sub constrângerea ca suma acestora să nu depășească takt time-ul impus. Modelul a utilizat algoritmul Simplex, iar analiza duală a permis interpretarea valorilor umbre (shadow prices) pentru a evidenția posturile critice.

De asemenea, utilizarea teoriei dualității și a ecarturilor complementare a contribuit la validarea rezultatelor simulării. Această abordare a demonstrat că soluția obținută nu este doar optimă local, ci și robustă din punct de vedere matematic. Legătura dintre modelul de simulare și cel matematic a oferit un cadru complet de analiză și validare a arhitecturii propuse.

Concluzia parțială a acestui capitol este că noua arhitectură hibridă LAD + carusel asigură o creștere semnificativă a productivității, o echilibrare mai bună a sarcinilor și o reducere a timpilor morți. Validarea atât prin simulări, cât și prin modele matematice consolidează robustețea propunerii. Aceste rezultate creează premisele pentru extinderea spre implementarea unui Digital Twin și pentru integrarea unor soluții avansate de automatizare în fluxul de asamblare.

Producția de cablaje electrice generează cantități semnificative de deșeuri, atât sub formă de resturi de fire și cabluri, cât și de conectori respinși, terminale defecte sau materiale izolatoare neutilizabile. În contextul reglementărilor europene tot mai stricte privind economia circulară și protecția mediului, managementul acestor deșeuri nu mai este doar o obligație legală, ci și o oportunitate de reducere a costurilor și de creștere a sustenabilității.

Tipurile de deșeuri rezultate din procesele de producție includ:

(i) resturi de fire de cupru sau aluminiu,

(ii) piese defecte precum conectori sau siguranțe,

(iii) reziduuri de materiale izolatoare, în special PVC și compuși HFFR (Halogen Free Flame Retardant) sau LSZH (Low Smoke Zero Halogen).

O parte din aceste deșeuri pot fi reciclate prin procedee mecanice, iar altele necesită tratamente chimice sau termice.

Pentru a sprijini reciclarea, este necesară organizarea colectării selective încă din zona de producție. În acest sens, punctele de colectare trebuie să fie integrate direct în layout-ul liniei de asamblare, iar operatorii trebuie instruiți să sorteze resturile de fire, conectorii respinși și materialele plastice în containere distincte. Utilizarea etichetelor RFID pentru trasabilitatea deșeurilor este o soluție inovatoare, care permite monitorizarea cantităților și a traseului acestora.

Metodele de reciclare sunt variate. Mărunțirea mecanică și separarea electrostatică reprezintă o soluție frecvent utilizată pentru separarea conductorilor metalici de materialele izolatoare. Astfel, cuprul și aluminiul pot fi recuperați și reutilizați în circuitul industrial. În cazul materialelor izolatoare pe bază de HFFR, cercetările au arătat că $Mg(OH)_2$, componentă principală cu rol de retardant de flacără, poate fi recuperată prin tratamente chimice și reintegrată în compuși noi.

O altă direcție o constituie piroliza, prin care materialele plastice sunt supuse unor procese termice controlate pentru a produce combustibili sau materii prime secundare. Această metodă are avantajul valorificării energetice a deșeurilor, dar necesită investiții ridicate și un control strict al emisiilor.

Studiile experimentale citate în literatură arată că prin mărunțire și separare electrostatică se poate obține o rată de recuperare a metalelor de peste 95%, ceea ce face aceste procese atractive din punct de vedere economic. În plus, reintegrarea materialelor plastice reciclate reduce dependența de resurse primare și contribuie la obiectivele de sustenabilitate ale companiilor.

Concluzia acestui capitol este că reciclarea deșeurilor din producția de cablaje trebuie privită nu doar ca o obligație de conformare la reglementările de mediu, ci ca o parte integrantă a optimizării fluxului logistic și a competitivității economice. Prin colectare selectivă, trasabilitate digitală și aplicarea unor metode moderne de reciclare, se pot reduce costurile, se poate crește sustenabilitatea și se poate alinia industria cablajelor la principiile economiei circulare.

Capitolul 6. Optimizarea asamblării fuzibilelor în cutiile de fuzibile și relee folosind tehnologia API pentru digital twin

Deși producția de cablaje beneficiază de anumite forme de automatizare, multe operații rămân manuale, mai ales cele ce implică componente miniaturizate. Inserarea fuzibilelor este o etapă critică, care poate genera defecte greu detectabile în testele ulterioare: unghi greșit, forță insuficientă la apăsare, contact electric imperfect sau deteriorări ale componentelor. Studiul propune o soluție robotică flexibilă ce abordează aceste probleme prin control precis al unghiului și al forței. Asamblarea corectă a fuzibilelor și releelor în cutiile electrice auto este un proces critic, deoarece orice eroare poate conduce la defecte majore de funcționare ale vehiculului și la costuri ridicate de reparație sau rechemare. Procesele tradiționale, bazate pe verificări vizuale manuale, sunt predispuse la erori umane și au un nivel redus de trasabilitate.

Literatura de specialitate include încercări de automatizare parțială precum manipularea firelor cu roboți senzoriali, automatizarea procesului de rutare, sisteme pentru acoperirea cablurilor sau testarea electrică automatizată. Persistă însă zone neacoperite de soluții industriale, una dintre acestea fiind asamblarea fuzibilelor, încă realizată manual în majoritatea fabricilor.

Sunt analizate caracteristicile fuzibilelor și cerințele impuse de producători pentru inserare: unghi perpendicular de 90°, aliniere corectă cu contactele, limite de forță (sub 40–55 N, în funcție de tip) și necesitatea evitării inserțiilor oblice care duc la contacte imperfecte. Pentru prevenirea erorilor, unii producători recomandă măști de ghidare.

Soluția propusă integrează robotul colaborativ Ufactory Lite 6, configurat și calibrat prin definirea parametrilor Denavit–Hartenberg și utilizarea matricilor de transformare pentru poziționarea precisă a efectorului. Cinematica riguroasă, împreună cu repetabilitatea de 0,5

mm, permite robotului să execute operații fine precum manipularea și inserarea componentelor fragile.

Metodologia include trei etape majore:

1. Crearea modelului digital twin – utilizând Onshape și tehnologia API pentru generarea unei replici virtuale a cutiei de fuzibile; acest model permite simularea operațiilor, extragerea coordonatelor exacte ale pozițiilor de inserție și monitorizarea în timp real.
2. Configurarea și integrarea robotului – calibrarea gripperului 3D printat, definirea poziției inițiale, programarea mișcărilor în Python folosind xArm API, conectarea cu Digital Twin și sincronizarea datelor.
3. Integrarea viziunii computerizate – utilizând OpenCV și DepthAI pentru detecția fuzibilelor în funcție de formă și culoare și pentru validarea prezenței acestora în cutie. Viziunea artificială contribuie la adaptarea la variații de poziționare ale cutiei fără a fi necesar un șablon fix.

Dovada conceptului (POC) confirmă fezabilitatea integrării digitale:

- Modelele 3D ale fuzibilelor și cutiei au fost realizate prin reverse engineering.
- Gripperul a fost proiectat astfel încât să prindă sigur fuzibilele fără deteriorări.
- Conectori virtuali au fost adăugați în modelul CAD pentru a determina coordonatele precise ale fiecărei locații de inserție.
- Algoritmii de viziune au permis identificarea tipului și poziției fuzibilelor din zona de stocare.
- Secvența de inserare a fost optimizată pentru a evita erorile: apropiere, poziționare la 2 mm de locaș, rotire, inserție controlată perpendicular.

Testele experimentale au confirmat performanțele sistemului:

- Precizie de 99,5% în inserția fuzibilelor, superioară procesului manual.
- Control fin al forței eliminate problemele asociate forței insuficiente sau excesive în operația umană.
- Flexibilitate ridicată, sistemul adaptându-se la mici modificări de dimensiuni ale cutiilor sau fuzibilelor.
- Fiabilitate în operare continuă, robotul funcționând fără erori majore în cicluri repetate.

- Rezultatele au fost validate prin multiple cicluri de testare și analiză statistică (medie, deviație standard). Limitarea principală identificată este folosirea unui robot educațional; pentru aplicații industriale se recomandă roboți specializați, cu precizie și viteză superioare.

Concluziile evidențiază contribuțiile majore ale cercetării:

- introducerea unei soluții complet noi pentru automatizarea inserției fuzibilelor, proces până acum neautomatizat în industrie;
- stabilirea unui cadru metodologic în care digital twin nu doar simulează, ci controlează direct procesul fizic prin feedback în timp real;
- demonstrarea unui model scalabil ce poate fi extins la alte procese critice de asamblare manuală din industria auto;
- contribuția directă la dezvoltarea producției inteligente și a paradigmei Industrie 4.0, prin integrarea roboticii, viziunii artificiale și digital twin.

Capitolul 7. Concluzii finale şi contribuţii principale la optimizarea fluxului de asamblare cablaj în industria construcțiilor de automobile

1. Concluzii generale

Teza și-a atins obiectivele formulate, demonstrând că optimizarea fluxului de asamblare al cablajelor electrice auto poate fi realizată printr-o abordare integrată care combină reorganizarea liniilor, utilizarea tehnologiilor digitale și orientarea spre sustenabilitate.

Analiza stadiului actual a evidențiat dependența ridicată de factorul uman și vulnerabilitățile liniilor manuale și semi-automatizate.

Perspectivele de automatizare au arătat că echipamentele Komax, metodologia APA și colaborarea om–robot deschid direcții promițătoare, cu condiția reproiectării componentelor flexibile.

Integrarea RFID în depozitare s-a dovedit o soluție eficientă pentru inventariere automată, trasabilitate și conectare la sistemele ERP.

Noua arhitectură de linie hibridă LAD + carusel, validată prin simulări Witness și modele matematice de programare liniară, a demonstrat o creștere de productivitate de 12% și o reducere a takt time-ului de la 6,80 la 6,08 minute.

Studiul privind reciclarea a arătat că sustenabilitatea nu este doar o obligație legală, ci o oportunitate de reducere a costurilor și de integrare a principiilor economiei circulare.

2. Contribuții originale

- Definirea unei metodologii integrate pentru optimizarea fluxului de asamblare a cablajelor electrice, care îmbină analiza stadiului actual, simulări software, modele matematice de redistribuire a operațiilor și integrarea tehnologiilor digitale (RFID, Digital Twin).
- Propunerea și validarea unei noi structuri de linie de asamblare, capabilă să reducă blocajele de producție și să crească productivitatea, confirmată prin simulări și analize comparative între structura inițială și cea propusă. Noua structura a liniei de asamblare a condus la o creștere a productivității cu 12% și la reducerea takt time-ului de la 6,80 la 6,08 minute.
- Introducerea unei noi structuri a zonei de depozitare componente pentru a facilita integrarea tehnologiei RFID în sistemele logistice, cu impact asupra trasabilității, acurateței inventarului și eficienței fluxurilor de aprovizionare.
- Elaborarea unor soluții privind colectarea și reciclarea deșeurilor din producția de cablaje, în acord cu obiectivele de sustenabilitate și reducere a impactului asupra mediului.
- Contribuția la dezvoltarea unei metodologii de aplicare a conceptului de Digital Twin în producția de cablaje, cu accent pe monitorizarea în timp real și ajustarea dinamică a proceselor industriale. Utilizand tehnologiei API pentru conectarea Digital Twin la procesele de asamblare a fuzibilelor, s-a obținut o acuratețe de peste 99,5% la inserarea fuzibilelor.
- Contribuția la dezvoltarea conceptelor de producție inteligentă și Industrie 4.0, deschizând noi perspective pentru aplicarea acestor tehnologii și în alte procese complexe de asamblare manuală.
- Evidențierea limitărilor actuale ale proceselor de automatizare și formularea unor direcții de cercetare viitoare care vizează creșterea gradului de integrare a colaborării om-robot și dezvoltarea unor algoritmi de optimizare adaptivi.

3. Limitări ale cercetării

- Validarea experimentală a fost realizată pe un singur caz industrial (linie de cablaj motor pentru K9K).
- Simulările au avut un caracter predominant determinist, fără a include variații stocastice pentru a reflecta incertitudinea din producția reală.
- Automatizarea completă a fluxului este limitată de costurile ridicate ale echipamentelor și de disponibilitatea componentelor reproiectate pentru manipulare robotică.

- Impactul asupra resursei umane (formare, recalificare) nu a fost evaluat detaliat în cadrul acestei teze.

Bibliografie

[1] Olbrich S., Lackinger Julia., Manufacturing Processes of automotive high-voltage wire harnesses: State
of the art, current challenges and fields of action to reach a higher level of automation, Procedia CIRP 107 (2022) 653–660, DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.041.

[2] Lorenz N., Mayer R., Approaches for automated wiring harness manufacturing: function integration with additive manufacturing, Automotive and Engine Technology (2023) 8:227–237/ Springer, 2023, DOI: https://doi.org/10.1007/s41104-023-00137-9.

[3] Rosa, E. S., Godina R., Rodrigues E.M.G., Matias J.C.O., An Industry 4.0 Conceptual Model Proposal for Cable Harness Testing Equipement Industry, Procedia Computer Science 200 (2022) 1392–1401, DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.340.

[4] Guerrero R., Serrano-Hernandez A., Pascual J., Faulin J., Simulation Model for Wire Harness Design in the Car Production Line Optimization Using the SimPy Library, Sustainability (2022), 14, 7212, DOI: https://doi.org/10.3390/su14127212.

[5] Wang H., Björn J., Deep Learning-Based Connector Detection for Robotized Assembly of Automotive Wire Harnesses, 2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (2023), DOI: 10.1109/CASE56687.2023.10260619.

[6] Burkacky O., Deichmann J., Stein J.P., Automotive software and electronics 2030: Mapping the sector's future landscape, https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/mapping-the-automotive-software-and-electronics-landscape-through-2030 (accesare la 25.08.2025)

[7] International Energy Agency (IEA), Global EV Outlook 2022, IEA Report, 2022

[8] Trommnau J., Kühnle J., Siegert J., Inderka R., Bauernhansl T., Overview of the State of the Art in the Production Process of Automotive Wire Harnesses, Current Research and Future Trends, Procedia CIRP. 81. 387-392 (2019), DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.067.

[9] ***, Poză linie de asamblare cablaj, https://jobs.diez.md/articles/o-fabrica-de-cablaje-auto-din-cahul-va-angaja-circa-1500-de-persoane-pana-in-toamna-anului-viitor (accesare la 16.01.2021)

[10] ***, Poză linie de asamblare cablaj, https://timponline.ro/trei-detectivi-mercedes-benz-bistrita-descoperit/ (accesare la 14.01.2021)

[11] Warnecke H.J., Walther J., Schlaich G. (1985), Flexible Automated Wiring Harness Assembly, In: Bullinger, HJ., Warnecke, H.J. (eds) Toward the Factory of the Future. Springer, Berlin, Heidelberg, 453–460 (1985), DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-82580-4_76

[12] **Stefan (Iorga) Ioana,** Popescu C.A., Popa C.L., Coteț C.E., Research regarding assembly flow optimization of wiring harness in automotive industry, MATEC Web of Conferences 343:02003 (2021), DOI: 10.1051/matecconf/202134302003.

[13]***, Harness the full potential of wiring systems, https://www.leoni-wiring-systems.com/ (accesare la 11.10.2020)

[14]***, Test procedures, https://www.leoni-machinery-sensors.com/en/about-us/quality/test-procedures/, (accesare la 04.10.2020)

[15]***, Harness manufacturing, https://www.komaxgroup.com/en/products/wire-processing/higher-automation-platforms/harness-manufacturing, (accesare la 20.12.2020)
[16]***, Analysis of automation potentials in assembly processes, https://www.ipa.fraunhofer.de/en/expertise/robot-and-assistive-systems/assembly-automation/analysis-of-automation-potentials-in-assembly-processes.html, (accesare la 10.08.2021)
[17] Trommnau J., A.N., Limp Component Design for Automatic Assembly - Classification Ratting System and Design Rules, 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 1139 - 1144. Procedia CIRP 93 (2020), DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.067.
[18] Trommnau J., A.F., Design for Automatic Assembly: A new Approach to Classify Limp Components. CIRP Design 2020 49 - 54. Procedia CIRP 91(2020)
[19] Škerlič S., Muha R., Sokolovskij E., Application of modern warehouse technology in the Slovenian automotive industry, Transport, Vol. 32, no. 4, (2017), 415–425.
[20] Popescu A., Enciu G., Popescu Emilia, Tache Irina, Architecture of the RFID systems used in production systems, Proceedings in Manufacturing Systems, Vol. 12, Issue 4, (2017), pp. 155–160.
[21] Naija Y., Secured Digital Architectures for Low Cost Full-fledged HF RFID Tags, National Engineering School of Sousse (2018).
[22] Junhong M., Research on Intelligent Warehouse Management System Based on RFID, Proceedings of the 2020 9th International Conference on Applied Science, Engineering and Technology (ICASET 2020), Atlantis Press, 29–32,(2020).
[23] ***, RFID Systems, https://www.ia.omron.com/support/guide/47/introduction.html (accesare la 21.03.2021)
[24] Lindsay J.D., Reade W., Cascading RFID Tags, https://www.jefflindsay.com/rfid3.shtml (accesare la 21.03.2021)
[25] **Stefan (Iorga) Ioana**., Popescu A.C., Popa C.L., Dobrescu T.G., Cotet C.E., The usage of RFID technology in wiring component storage systems. Proc. Manuf. Syst. 2021, 16, 109–116, (2021)
[26] ***, RFID Middleware Introduction, https://rfid4u.com/rfid-middleware-introduction (accesare la 12.05.2021)
[27] Choojan T., Chutima P., Part Transportation Improvement in Warehouse of an Automotive Factory, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 131, No. 1, IOP Publishing, 1–7, (2016)
[28] ***, IER SAS, Solution D'identification Kit Rfid Pour Chariot Élévateur (Rfid Kit Identification Solution For Forklift Truck), https://market.ier.com/464-kit-rfid-pour-chariot-elevateur.html, (accesare la 10.05.2021)
[29]***, IER SAS, Solution D'identification Totem Rfid (Totem Rfid Identification Solution), https://market.ier.com/451-totem-rfid.html, (accesare la 10.05.2021)
[30] R. O'Byrne, Solution D'identification Warehouse Design – Rules of Thumb… And a Checklist, https://www.logisticsbureau.com/warehouse-design-rules-of-thumb, (accesare la 12.05.2021)
[31] ***, Zebra Technologies, FX9600 Fixed RFID Reader Support, https://www.zebra.com/us/en/support-downloads/rfid/rfid-readers/fx9600.html#knowledgearticlesear, (accesare la 14.05.2021)
[32] ***, AtlasRFIDstore, Kathrein Wide Range 30° RFID Antenna (FCC/ETSI), https://www.atlasrfidstore.com/kathrein-wide-range-30-rfid-antenna-fcc-etsi, (accesare la 14.05.2021)
[33] ***, Advantech Co, WA-HT3120T, https://www.advantech.com/products/ff03268d-575b-4fe0-83b8-3add57792b9d/wa-ht3120t/mod_e1ce4106-8966-4a18-8b01-dd94a53ee0e8, (accesare la 14.05.2021)
[34] ***, Turck Group, TBEN-LL-4RFID-8DXP RFID Interface, https://www.turck.de/attachment/100013753.pdf, (accesare la 10.05.2021)

[35] ***, WERMA Signaltechnik, Completely pre-assembled Signal Towers, https://www.werma.com/en/s_c1505i2610/K37_plug_EM_Pulse_tone_24VAC/DC_GN/YE/RD/69921075.html, (accesare la 08.11.2021)
[36] ***, MTI Wireless Edge Ltd, Circular Antennas, https://www.mtiwe.com/?CategoryID=278&ArticleID=284, (accesare la 12.05.2021)
[37] ***, Impinj, Impinj Speedway RAIN RFID Readers for Flexible Solution Development, https://www.impinj.com/products/readers/impinj-speedway, (accesare la 12.05.2021)
[38] ***, Panasonic Corporation of North America, Adjustable Range Reflective Photoelectric Sensor Amplifier Built-in EQ-30 SERIES, https://b2b-api.panasonic.eu/file_stream/pids/fileversion/2292, (accesare la 12.05.2021)
[39] ***, ELA Innovation, Sciel Reader Ip2 / Wf2, https://elainnovation.com/wp-content/uploads/2021/01/FP-SCIEL-READER-IP2-WF2-05B-EN-2.pdf, (accesare la 12.05.2021)
[40] ***, ELA Innovation, Active DOT RFID Tag Activator, https://elainnovation.com/wp-content/uploads/2021/01/FP-TAG-ACTIVATOR-02C-EN.pdf, (accesare la 12.05.2021)
[41]***, ELA Innovation, PUCK DOT User Guide, https://elainnovation.com/en/catalogue/puck-dot-en, (accesare la 12.05.2021)
[42] Svub J., Stasa P., Benes F., Vojtech L., Neruda M., et al.., Autonomous System for UHF RFID Signal Measurement in Industrial Environment, 11th IFIP Wirelessand Mobile Networking Conference (WMNC2018), 81-86., hal-01995443, (2018)
[43] Bernardini F., Motron A., Nepa P., Buffi, Alice, Tellini B., SAR-based Localization of UHF-RFID Tags in Smart Warehouses, Conference: 2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies,1-6, DOI: 10.23919/SpliTech49282.2020.9243755 (2020)
[44]***, AgileX Robotics SCOUT 2.0, https://global.agilex.ai/products/scout-2-0, (accesare la 22.05.2021)
[45] **Iorga, Ioana**, Popa, C. L., Popescu, C.-A., Chiscop, Florina, Dobrescu, T. G., Cotet, C. E., Automatic Inventory of Wiring Harness Components Using UHF RFID Technology. Logistics, 10(2), 33, (2026) https://doi.org/10.3390/logistics10020033
[46] Popa, C.L., **Iorga, Ioana,** Cotet, C.E., Ifrim, Ana Maria, Popescu, C.-A., Dobrescu, T.G., Optimization of Wiring Harness Logistics Flow in the Automotive Industry. Appl. Sci. 2024,14, 10636, (2024), DOI: https://doi.org/10.3390/app142210636
[47] Fernandes, M.M., de Almeida, I.A., Junior, H.M. Automotive Miniaturization Trend: Challenges for Wiring Harness Manufacturing; Technical Report; SAE Technical Paper: Warrendale, PA, USA, 2010.
[48] Rius Rueda, A. A Novel Optimisation Methodology of Modular Wiring Harnesses in Modern Vehicles: Weight Reduction and Safe Operation; Universitat Politècnica de Catalunya: Barcelona, Spain, 2017.
[49] Beloglazov, I., Krylov, K. An Interval-Simplex Approach to Determine Technological Parameters from Experimental Data.Mathematics 2022, 10, 2959.
[50] Vagaská, A., Gombár, M., Straka, L'. Selected Mathematical Optimisation Methods for Solving Problems of Engineering Practice.Energies 2022, 15, 2205.
[51] Syifa, E.A., Istiqomah, T.N., Puspita, N.P., Ratnasari, L., Khabibah, S., Anggoro, P.W., Bawono, B. The application of linear programming for the optimal profit of pt. Maruna using the simplex method. Manag. Syst. Prod. Eng. 2023, 31, 138–143.
[52] Galankashi, M.R., Helmi, S.A., Hashemzahi, P. Supplier selection in automobile industry: A mixed balanced scorecard–fuzzy AHP approach. Alex. Eng. J. 2016, 55, 93–100.
[53] Wang, Q.Z., Chen, J.M., Tseng, M.L., Luan, H.M., Ali, M.H. Modelling green multimodal transport route performance with witness simulation software. J. Clean. Prod. 2020, 248, 119245.

[54] Wenjing, L., Shichang, L. Optimization of Automotive Wire Harness Production Process Based on Lean Manufacturing. In Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Management and Information Science, EMIS 2023, Chengdu, China, 24–26 February 2023.
[55] Heisler, P., Utsch, D., Kuhn, M., Franke, J. Optimisation of wire harness assembly using human–robot-collaboration. Procedia CIRP 2021, 97, 260–265.
[56] Palomba, I., Gualtieri, L., Rojas, R., Rauch, E., Vidoni, R., Ghedin, A. Mechatronic Redesign of a Manual AssemblyWorkstation into a Collaborative One for Wire Harness Assemblies. Robotics 2021
[57] Salunkhe, O., Stahre, J., Romero, D., Li, D., Johansson, B. Specifying Task Allocation in Automotive Wire Harness Assembly Stations for Human-Robot Collaboration. Comp. Ind. Eng. 2023, 184, 109572.
[58] Szajna, A., Stryjski, R., Woźniak,W., Chamier-Gliszczyński, N., Kostrzewski, M. Assessment of Augmented Reality in Manual Wiring Production Process with Use of Mobile AR Glasses. Sensors 2020, 20, 4755
[59] Bi, Z.; Pomalaza-Ráez, C., Hershberger, D., Dawson, J., Lehman, A., Yurek, J., Ball, J. Automation of Electrical Cable Harnesses Testing. Robotics 2018, 7, 1.
[60] Yang, F., Wang, P., Zhang, R., Xing, S., Wang, Z., Li, M., Fang, Q. A*–Ant Colony Optimization Algorithm for Multi-Branch Wire Harness Layout Planning. Electronics 2024, 13, 529.
[61] Nguyen, H.G., Habiboglu, R., Franke, J. Enabling deep learning using synthetic data: A case study for the automotive wiring harness manufacturing. Procedia CIRP 2022, 107, 1263–1268.
[62] Song, J., Kumar, P., Kim, Y., Kim, H.S. A Fault Detection System for Wiring Harness Manufacturing Using Artificial Intelligence. Mathematics 2024, 12, 537.
[63] Yamano, Y., Hosokawa, T., Hirai, H., Ono, J., Otsuka, T., Tabata, M.; Otsuka, Y., Nishikawa, T., Kitamura, S., Yoshimoto, J., Development of the aluminium wiring harness. SEI Tech. Rev. 2011, 73–80.
[64] Wedrychowicz, M., Kurowiak, J., Skrzekut, T., Noga, P. Recycling of Electrical Cables—Current Challenges and Future Prospects. Materials 2023, 16, 6632.
[65] Blinová, Lenka, Godovcin, P. Importance of Recycling the Waste-Cables Containing Copper and PVC. Res. Pap. Fac. Mater. Sci. Technol. Slovak Univ. Technol. 2021, 29, 1–21.
[66] Zackrisson, M. Recycling Production Cable Waste-Environmental and Economic Implications; WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities; 2nd International Conference; CVR—Centre for Waste Valorization: Braga, Portugal, 2013.
[67] Czarnecka-Komorowska, D., Kanciak,W., Barczewski, M., Barczewski, R., Regulski, R., Sedziak, D., Jedryczka, C. Recycling of Plastics from Cable Waste from Automotive Industry in Poland as an Approach to the Circular Economy. Polymers 2021, 13, 3845.
[68] Zackrisson, M., Jönsson, C., Olsson, E. Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost ofWaste Management—Plastic CableWaste. Adv. Chem. Eng. Sci. 2014, 4, 1–12.
[69] Jebbor, I., Benmamoun, Z., Hachimi, H., Raouf, Y., Haqqi, M., Akikiz, M. Improvement of an Assembly Line in the Automotive Industry: A case study in wiring harness assembly line. ICIEA 2023, 35, 62–71.
[70] Lakhal,W. Etude, Mise en Place et Amélioration de L'efficience de Processus de Montage de Câblage Au Sein de LEONI; Diplôme National d'Ingénieur en Génie Electromécanique, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax: Sfax, Tunisia, 2019
[71] Ruppert, T., Abonyi, J. Software Sensor for Activity-Time Monitoring and Fault Detection in Production Lines. Sensors 2018, 18, 2346.
[72] Katsumata, M., Suzuki, H. Method For Recycling Waste Wire Harness. U.S. Patent US20030115989A1, 15 February 2005. pp. 1–5.
[73] Arslan, F., Arslan, C. Recycling of waste electrical cables. Mater. Sci. Eng. Int. J. 2019, 3, 107–111.

[74] Cazacu, Carmen-Cristiana., **Iorga, Ioana**., Parpală, R.C., Popa, C.L., Cotet, , C.E. Optimizing Assembly in Wiring Boxes Using API Technology for Digital Twin. Appl. Sci. 2024, 14, 9483. DOI: https://doi.org/10.3390/app14209483
[75] ***, T.E., instruction sheet:crfb, 36 miniature fuses ("cabin relay and fusebox"), https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtrv&DocNm=408-15007&DocType=Specification%20Or%20Standard&DocLang=English&DocFormat=pdf&PartCntxt=1801764-1, (accesare la 09.02.2024).
[76] Eheim, M., Kaiser, D., Weil, R. On Automation Along the Automotive Wire Harness Value Chain. In Advances in Automotive Production Technology—Theory and Application; Weißgraeber, P., Heieck, F., Ackermann, C., Eds.; ARENA2036; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021; pp. 178–186.
[77] Govoni, A., Laudante, G., Mirto, M., Natale, C., Pirozzi, S. Towards the Automation of Wire Harness Manufacturing: A Robotic Manipulator with Sensorized Fingers. In Proceedings of the 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Rome, Italy, 3–6 July 2023.
[78] Heisler, P., Steinmetz, P., Yoo, I.S., Franke, J. Automatization of the Cable-Routing-Process within the Automated Production of Wiring Systems. Appl. Mech. Mater. 2017, 871, 186–192.
[79] Heisler, P., Kuhn, M., SüßWolf, R., Franke, J. Innovative Solutions for the Covering Process in the Manufacturing of Wire Harnesses to Increase the Automation Degre. In Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT), Cape Town, South Africa, 20–22 January 2020.
[80] Navas-Reascos, G., Romero, D., Stahre, J., Caballero-Riuz, A. Wire Harness Assembly Process Supported by Collaborative Robots: Literature Review and Call for R&D. Robotics 2022, 11, 65
[81] Román-Ibáñez, V., Pujol, F.A. Collaborative robotics in wire harnesses spot taping process. Comput. Ind. 2021, 125, 103370.
[82] Thelen, A., Zhang, X., Fink, O., Lu, Y., Ghosh, S., Youn, B.D., Todd, M.D., Mahadevan, S., Hu, C., Hu, Z. A comprehensive review of digital twin—Part 1: Modeling and twinning enabling technologies. Struct. Multidiscip. Optim. 2022, 65, 354.
[83] Garg, G., Kuts, V., Anbarjafari, G. Digital Twin for FANUC Robots: Industrial Robot Programming and Simulation Using Virtual Reality. Sustainability 2021, 13, 10336.
[84] Barricelli, B.R., Casiraghi, E., Fogli, D. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. IEEE Access 2019, 7, 167653–167671.
[85] Erdei, T.I., Krakó, R., Husi, G. Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm. Appl. Sci. 2022, 12, 8862
[86] Popescu, D., Dragomir, M., Popescu, S., Dragomir, D. Building Better Digital Twins for Production Systems by Incorporating Environmental Related Functions—Literature Analysis and Determining Alternatives. Appl. Sci. 2022, 12, 8857.
[87] Iliută, Miruna-Elena, Moisescu, M.A.; Pop, E.; Ionită, Anca-Daniela, Caramihai, Simona-Iuliana, Mitulescu, T.C. Digital Twin—A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields. Appl. Sci. 2024, 14, 5454.
[88]***,Ufactory Lite 6—User Manual V2.0.0., https://www.ufactory.cc/wp-content/uploads/2023/05/Lite6-User-Manual-V2.0.0.pdf, (accesare la 03.02.2024).
[89]***,Ufactory Lite 6—DH Parameters, https://www.ufactory.cc/wp-content/uploads/2023/04/Kinematic-and-Dynamic-Parameters-of-UFACTORY-Lite-6.pdf (accesare la 03.02.2024).
[90] Modi, P.P., Sunny, M.S.H., Khan, M.M.R., Ahmed, H.U., Rahman, M.H. Interactive IIoT-based 5DOF Robotic Arm for Upper Limb Telerehabilitation. IEEE Access 2022, 10, 114919–114928

[91]***, Onshape Digital Twins|Digital Transformation in Education, https://ptc-education.github.io/docs/solutions/onshapedx (accesare la 04.02.2024).
[92]***, Swe-Check−Blade Fuse Sizes., https://www.swe-check.com.au/editorials/blade_fuse_sizes.php (accesare la 15.02.2024).
[93]***, Onshape−Mate Connectors., https://cad.onshape.com/help/Content/mateconnector.htm (accesare la 04.03.2024).