

## CONTRIBUȚII PRIVIND STABILIREA TRASEULUI DE IMPLEMENTARE A CONCEPTULUI INDUSTRY 4.0 ÎN CADRUL FIRMELOR MICI ȘI MIJLOCII

**Teză de doctorat – Rezumat**  
pentru obținerea titlului științific de doctor la  
Universitatea Politehnica Timișoara  
în Domeniul de doctorat INGINERIE ȘI MANAGEMENT  
autor **Edwald-Viktor GILLICH**  
conducător științific Prof.univ.dr.ing. Marian Liviu MOCAN  
**luna aprilie anul 2023**

Modul în care s-a dezvoltat societatea actuală are la origine câteva cicluri de revoluții industriale. Progresul adus de aceste revoluții a permis în decursul timpului o globalizare a tehnologiilor industriale, ceea ce a avut drept consecință dezvoltarea unui sistem de producție economică tot mai ramificat și interconectat. În ultima perioadă transformarea digitală își pune tot mai pregnant amprenta pe modul de producție, în prezent se poate vorbi chiar de era digitală a tehnologiei industriale.

În acest context, teza își propune să analizeze stadiul în care se află o firmă românească din punct de vedere al implementării conceptului Industry 4.0, așa-numita maturitate a firmei, și să propună un traseu coerent de urmat pentru implementarea acestui concept în funcție de disponibilitatea și potențialul firmei. Din acest motiv, studiul își propune să analizeze modul în care firmele românești, parteneri ale firmei analizate, sunt pregătite pentru transformarea impusă de sistemul Industry 4.0 și disponibilitatea acestora de a colabora în noua logică de dezvoltare.

Oportunitatea cercetărilor efectuate rezidă din lipsa informațiilor legate de modul în care firmele românești abordează cea de-a patra revoluție industrială și de stadiul în care se află acestea în implementarea transformărilor impuse de această revoluție. Globalizare implică ca firmele să își adapteze și compatibilizeze sistemele și metodele de lucru, motiv pentru care este important să avem o imagine a firmelor românești în context mondial, dar mai ales regional. Lipsa reglementărilor specifice sau a programelor naționale care să încurajeze firmele să adopte conceptul Industry 4.0, precum și lipsa modelelor de succes, dacă acestea există, face ca acest studiu să fie cu atât mai important.

Pentru a determina poziția firmei în context național și internațional și a stabili un traseu coerent de implementare a sistemului Industry 4.0 am definit următoarele obiective ale tezei:

- studiul literaturii științifice și a documentelor normative care se referă la fenomenul Industry 4.0;
- identificarea principalilor factori care pot stimula managementul firmelor românești să grăbească implementarea sistemului Industry 4.0 și ierarhizarea acestora în funcție de relevanță pentru firmele românești;

- identificarea principalelor bariere care pot inhiba implementarea sistemului Industry 4.0 și ierarhizarea acestora în funcție de relevanță pentru firmele românești;
- stabilirea indicatorilor de maturitate care caracterizează cel mai bine firma analizată și definirea nivelurilor de maturitate și a nivelurilor țintă;
- definirea acțiunilor necesare a fi derulate pentru implementarea Industry 4.0 și identificarea limitărilor existente în procesul de implementare;
- definirea unui model de implementare a Industry 4.0 și exemplificarea utilizării acestuia prin stabilirea ordinii implementării acțiunilor în funcție de limitările identificate și de resursele disponibile;
- dezvoltarea unui echipament care permite transformarea unei mașini clasice în sistem cyber-fizic și stabilirea unor algoritmi de analiză și raportare a evenimentelor;
- diseminarea rezultatelor cu caracter științific și practic obținute în urma cercetării.

Teza, care prezintă cercetări prin care se urmărește îndeplinirea obiectivelor propuse, este structurată pe 5 capitole având ca punct de plecare cercetările, prezentate în literatura de specialitate. Aceasta continuă cu o analiză a stării unor firme românești privind maturitatea acestora din punctul de vedere al adoptării sistemelor și metodelor care corespund paradigmei Industry 4.0. Concluziile formulate permit trasarea unui parcurs de urmat de către firma în cauză, care să permită parcurgerea pașilor către implementarea conceptelor Industry 4.0 coerent, cu efort minim și rezultate maximizate. În încheiere se prezintă principalele concluzii desprinse în urma cercetărilor efectuate și se evidențiază contribuțiile personale. O detaliere a conținutului capitolelor tezei este redată în continuare.

Capitolul 1 - **Stadiul actual privind implementarea sistemului INDUSRTY 4.0** prezintă mai întâi aspecte istorice privind dezvoltarea industrială și etapele parcurse, desemnate în literatura de specialitate ca revoluții industriale [1]. Este apoi analizată cea de-a patra revoluție, cunoscută sub denumirea de Industrie 4.0 sau Industry 4.0, care se caracterizează prin exploatarea noilor tehnologii precum digitalizarea și lumea virtuală, senzorială și Internetul [2-6]. Acestea permit integrarea în cadrul companiilor a proceselor tehnice cu cele de afaceri rezultând fabricația inteligentă.

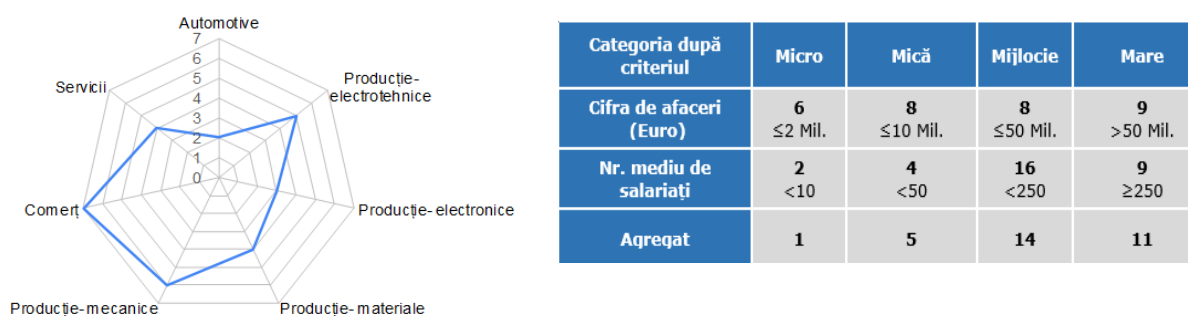
În continuare sunt prezentate abordări și strategii naționale legate de implementarea Industry 4.0, atât pentru țări din Europa [7-12] cât și pentru țări din America și Asia [13-15]. Schimbările aduse de această nouă revoluție, aflată în plină desfășurare, se doresc a avea un efect pozitiv asupra eficienței și a sustenabilității producției industriale [16], cu implicații directe asupra relațiilor sociale și a calității vieții.



**Fig. 1:** Țări care au implementate strategii naționale de creștere economică

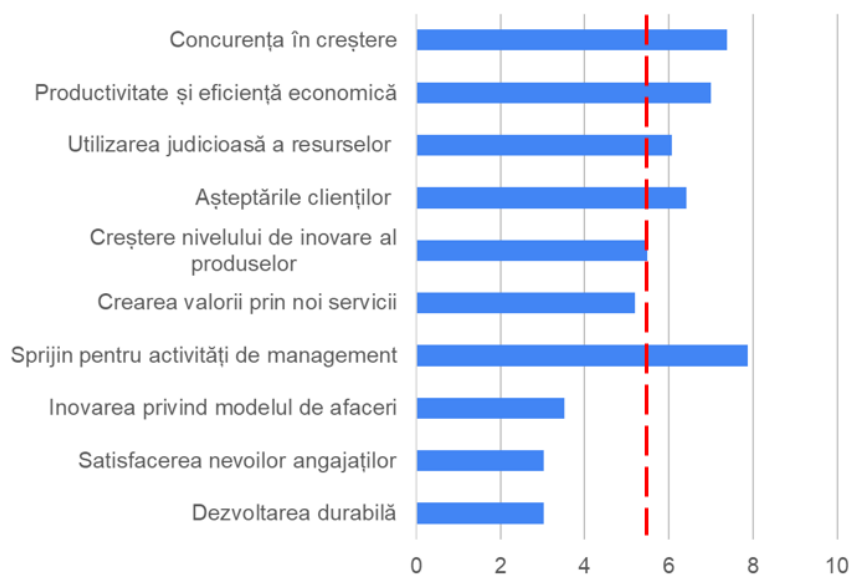
La finalul capitolului sunt prezentate principiile care stau la baza implementării Industry 4.0 și se prezintă un traseu clasic de adoptare a acestui sistem.

Capitolul 2 - **Analiza contextului în care operează firma** investighează mediul în care operează FIRMA (denumire data societății analizate pentru anonimizare) și se evaluează poziția acesteia în cadrul partenerilor. În acest demers sunt analizate 31 de companii care activează în diverse industrii și care au dimensiuni diferite. Analiza s-a efectuat prin aplicarea unui chestionar care conține trei părți distincte. În figura 2 se redă structura firmelor care au răspuns la chestionar pe domenii de activitate și tipul de companii după cifra de afaceri și număr de angajați.



**Fig. 2:** Structura firmelor care au răspuns la chestionar pe domenii de activitate și tipul de companii după cifra de afaceri și număr de angajați

În urma studiului s-a constatat că nivelul de cunoaștere legat de fenomenul Industry 4.0 este limitat, dar numeroase elemente care duc la implementarea noului sistem sunt deja abordate de firme. Disponibilitatea managerilor de a colabora în sensul propus de conceptul Industry 4.0 a fost exprimată în mod hotărât, ceea ce încurajează FIRMA în demersul de implementare a noului sistem. Factorii decisivi care determină managementul să se gândească la implementarea Industry 4.0 sunt eficiența și piața, așa cum este prezentat în figura 3.



**Fig. 3:** Percepția companiilor privind ponderea celor zece factori analizați care stimulează implementarea Industry 4.0

Dacă se grupează rezultatele pe domenii, se obține evaluarea prezentată în figura 4. Aceasta permite o comparație mai ușoară a rezultatelor studiului de față cu cele din literatura de specialitate [17-18], comparație prezentată în tabelul 1. Ca reper au fost luate lucrări care

analizează situația în țările din Europa de est, care au avut o dezvoltare socială și economică similară cu România.

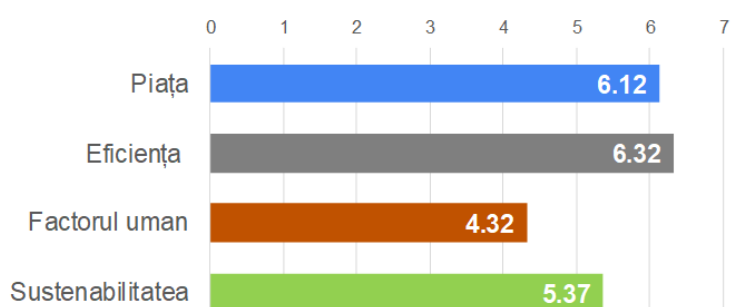


Fig. 4: Importanța acordată domeniilor care caracterizează practicile Industry 4.0

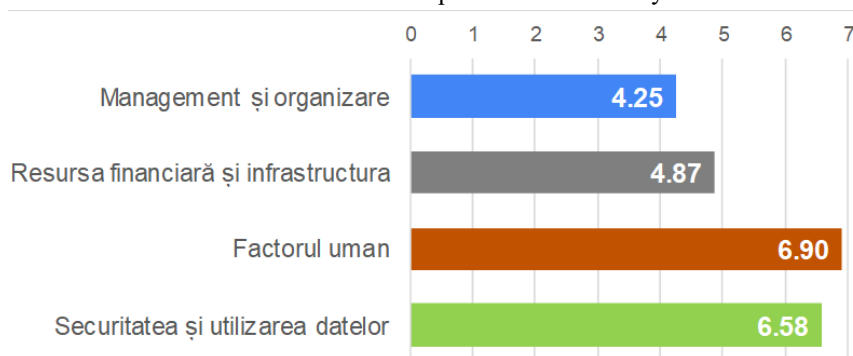
Tab. 1: Efectul factorilor agregați pe domenii asupra stimulării implementării Industry 4.0: comparație cu autori străini

Domeniul	Studiul actual	Szabó și alții	Horváth și Szabó		Domeniul
	poziție	poziție	IMM-uri	Multinat.	
Eficiența	1	2	mediu	mediu	Productivitatea
		3	scăzut	ridicat	Profitabilitatea
Piața	2	1	ridicat	ridicat	Satisfacția clienților
		6	scăzut	ridicat	Piața și competitorii
Sustenabilitatea	3	4	scăzut	ridicat	Managementul
Factorul uman	4	5	ridicat	scăzut	Resursa umană

Există însă și temeri legate de implementare, din studiul efectuat a rezultat că principalele îngrijorări sunt legate de lipsa resursei umane capabile să determine transformarea și securitatea datelor (figura 5). Un aspect pozitiv este faptul că lipsa resurselor financiare nu reprezintă o temere majoră pentru marea majoritate a managerilor firmelor analizate, ceea ce indică disponibilitate pentru colaborarea în contextul Industry 4.0.



**Fig. 5:** Percepția companiilor privind ponderea celor zece factori analizați care frânează implementarea Industry 4.0



**Fig. 6:** Relevanța domeniilor care pot frâna implementarea Industry 4.0

Rezultatele analizei au fost comparate, după gruparea conform figurii 6, cu cele ale unor studii prezentate în literatura de specialitate [17-18], efectuate în țări cu o dezvoltare istorică similară cu România, dar și în alte țări europene. Abordarea managerilor firmelor românești este destul de asemănătoare cu cea a managerilor din străinătate, ierarhizarea factorilor stimulativi și a barierelor fiind asemănătoare.

**Tab. 2:** Efectul factorilor agregați pe domenii asupra frânării implementării Industry 4.0: comparație cu autori străini

Domeniul	Studiul actual	Szabó și alții	Horváth și Szabó		Domeniul
	poziție	poziție	IMM-uri	Multinaționale	
Factorul uman	1	1	ridicat	mediu	Factorul uman
Securitatea și utilitatea datelor	2	-	-	-	-
Resursa financiară și infrastructura	3	2	ridicat	scăzut	Resursa financiară
		3	scăzut	ridicat	Tehnologia
Managementul și organizarea	4	4	ridicat	mediu	Managementul
		5	scăzut	ridicat	Organizarea

Din studiu s-a desprins ideea că FIRMA și partenerii acesteia supuși analizei acceptă implementarea sistemul Industry 4.0, respectiv colaborarea în acest context al organizării producției. Prin urmare, este oportună trasarea unui parcurs al implementării, care însă trebuie să țină seama pe de o parte de resursele disponibile ale FIRMEI, dar și de domeniile în care partenerii sunt pregătiți să coopereze.

Capitolul 3 - **Stabilirea traseului firmei în implementarea sistemului Industry 4.0** pornește de la rezultatele obținute în capitolul anterior. Constatându-se că partenerii FIRMEI înțeleg transformarea digitală și au deschidere pentru o colaborare conform noii paradigme, iar firma are deschiderea necesară pentru a trece la sistemul Industry 4.0 cu toate implicațiile financiare, este necesar să se stabilească întâi nivelul de maturitate la care se află firma la momentul actual. În urma unei cercetări de birou dar și a discuțiilor cu managerii și

responsabilii din diverse compartimente, au fost identificate nivelele de maturitate la care firma se încadrează în prezent, pe șase domenii împărțite pe 35 de subdomenii.

Ținând cont de factorii care stimulează implementarea Industry 4.0 dar și de barierele identificate în capitoul anterior, dar și de studiile prezentate în literatură [19-21] am propus șase domenii majore pentru analiza maturității firmei, și anume:

1. Produsele firmei
2. Infrastructura
3. Organizarea
4. Lanțul de aprovizionare și desfacere
5. Modelul de business
6. Securitatea și protecția datelor

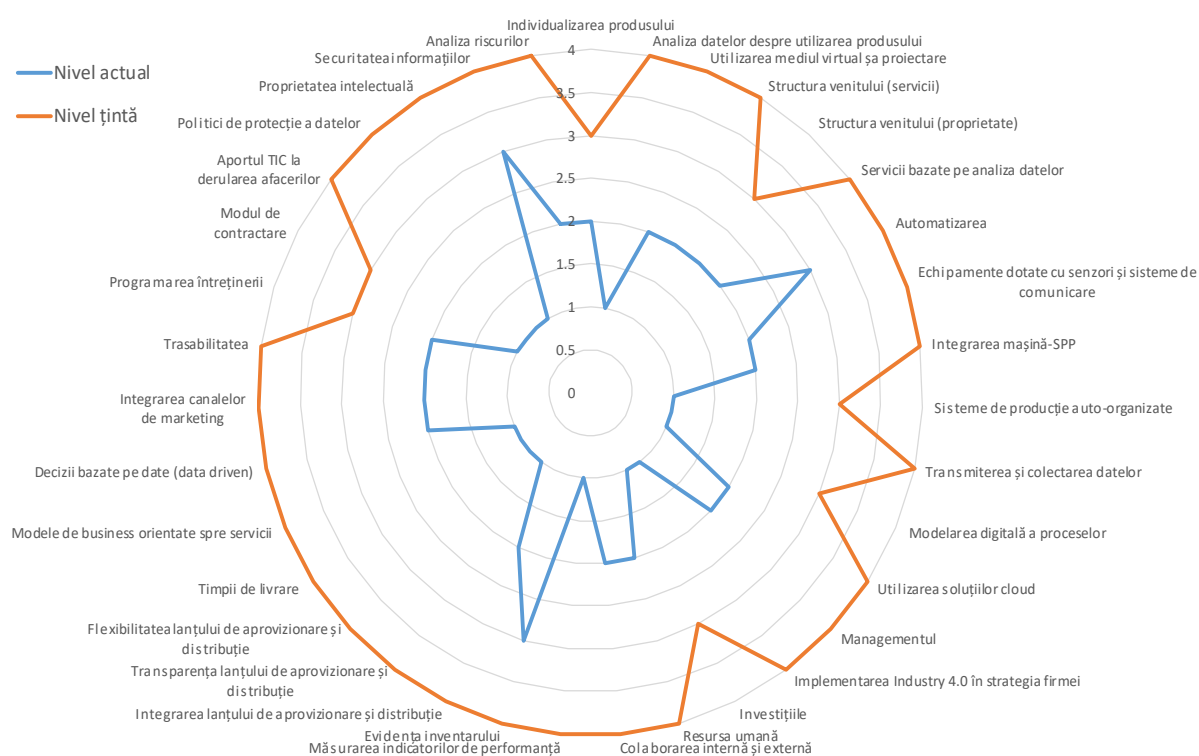
Fiecare dintre aceste domenii are sub-domenii sau componente, care sunt analizate și evaluate separat. Fiecare componentă va avea asociată patru nivele de maturitate, astfel:

Nivelul I - Novice, în care componenta nu prezintă caracteristici cerute de Industry 4.0;

Nivelul II - Intermediar, la care sunt vizibile caracteristicile ale Industry 4.0 asociate componentei analizate;

Nivelul III - Avansat, care atestă o maturitate crescută pe direcția componentei analizate;

Nivelul IV - Expert, atribuit când toate caracteristicile asociate componentei satisfac pe deplin cerințele Industry 4.0.



**Fig. 7:** Imagine de ansamblu privind maturitatea firmei – cu linie albastră este reprezentat nivelul actual, cu linie orange nivelul țintă

La atingerea unui anumit nivel contribuie o serie de factori specifici, de regulă aparținând celor nouă piloni ai Industry 4.0. Acești factori vor fi luați în considerare atunci

când se stabilește traseul de urmat în vederea implementării transformărilor particularizate la nivelul firmei.

Trecerea la un nivel de maturitate superior presupune îndeplinirea unor cerințe, ceea ce implică acțiuni specifice. Pentru toate subdomeniile identificate au fost inventariate cerințele, care pot fi asimilate cu rezultatele așteptate. Fiecărei cerințe i s-a asociat una sau mai multe acțiuni. În cazul în care nivelul actual de maturitate este ridicat și criteriul este îndeplinit din start, acțiunile necesare nu mai sunt luate în considerare. Acțiunile sunt apoi grupate în funcție natura lor (training, achiziții, elaborare proceduri și strategii etc.) și sunt stabilite legăturile cronologice dintre acestea, precum și nivelul costurilor necesare pentru implementare.

La implementarea acțiunilor au fost stabilite patru tipuri de limitări, constând în limitări legate de: cronologia acțiunilor, durata minimă a acțiunilor, necesarul de resurse financiare și necesarul de resurse umane. Un exemplu de stabilire a succesiunii cronologice a acțiunilor este prezentat în figurile 8-11. Figura 8 reprezintă acțiunile care țin de *Colaborarea internă și externă* astfel: cu culoarea mov sunt reprezentate acțiunile care țin exclusiv de colaborarea internă și externă, iar cu culoare verde sunt reprezentate acțiuni legate de analiza internă a firmei. Figura 9 arată succesiunea acțiunilor care au în vedere funcționarea *Sistemului informatic, decizional și securitatea datelor*. Între acțiunile marcate cu albastru se observă și existența unei acțiuni marcate cu mov, care este specifică colaborării externe dar absolut necesară pentru a putea asigura accesul partenerilor la sistemul informatic propriu. În figura 10 este reflectată succesiunea acțiunilor care au în vedere *Dezvoltarea și promovarea produselor*. Acest obiectiv conține cele mai multe acțiuni, primele orientate mai mult spre domeniul tehnic, iar ultimele privesc marketingul și strategia de vânzare. Din figură se poate observa că și aici interferă acțiuni legate de colaborarea internă și externă cu cele specifice obiectivului. Organizarea producției și a acțiunilor de mentenanță, nominalizate aici *Fabricația*, impun o serie de acțiuni prezentate în figura 11. Aceste acțiuni implică transformarea mașinilor-unelte în sisteme cyber-fizice și integrează aceste echipamente în sistemul informatic al firmei. Acest obiectiv are un număr mai redus de acțiuni, dar acestea sunt de mare complexitate și importanță pentru transformarea digitală a firmei.

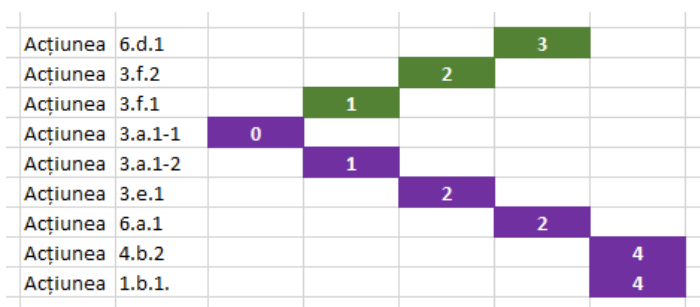


Fig. 8: Acțiuni ce au în vedere *Colaborare internă și externă*

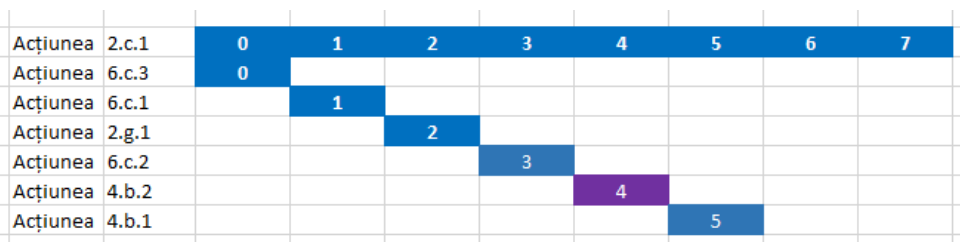


Fig. 9: Acțiuni ce au în vedere *Sistemul informatic, decizional și securitatea*

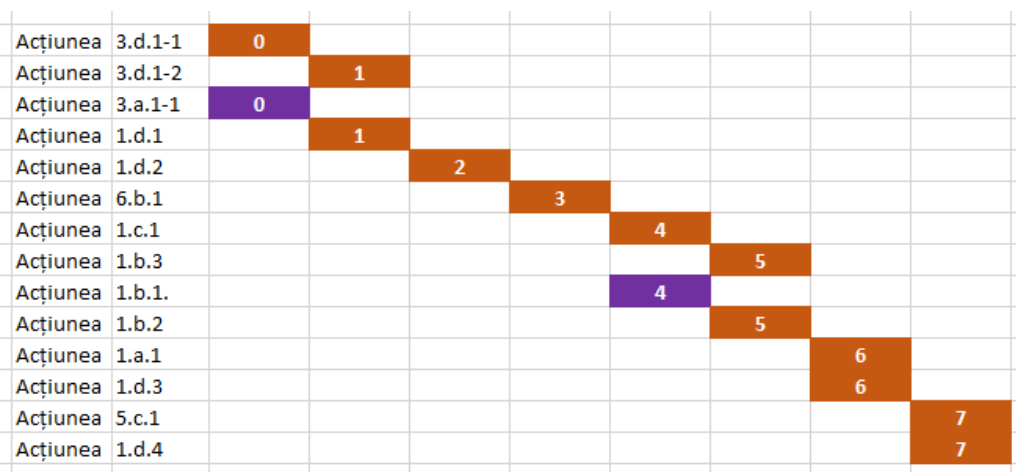


Fig. 10: Acțiuni ce au în vedere Dezvoltarea și promovarea produselor

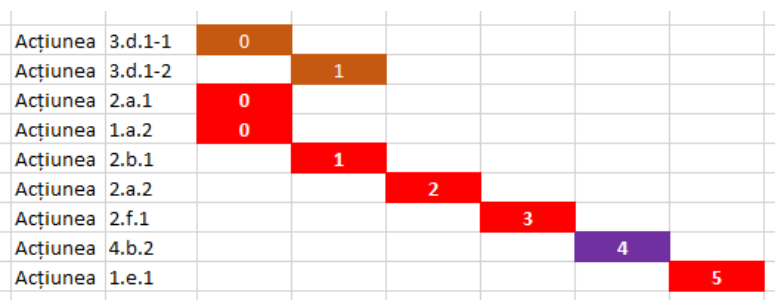


Fig. 11: Acțiuni ce au în vedere Fabricația

Utilizând informațiile legate de acțiunile necesare pentru implementarea Industry 4.0 se elaborează un model care permite eșalonarea acțiunilor în timp în condiții suportabile de utilizare a resurselor financiare și umane.

		luna 1	luna 2	luna 3	luna 4	luna 5	luna 6	luna 7	luna 8	...	luna M		
		j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	j=6	j=7	j=8	...	j=M		
acțiunea 1	i=1	$c_{11}$	$c_{12}$									$c_1$	cost acțiunea 1
acțiunea 2	i=2			$c_{23}$	$c_{24}$	$c_{25}$						$c_2$	cost acțiunea 2
acțiunea 3	i=3	$c_{31}$	$c_{32}$	$c_{33}$								$c_3$	cost acțiunea 3
acțiunea 4	i=4				$c_{44}$	$c_{45}$	$c_{46}$	$c_{47}$				$c_4$	cost acțiunea 4
acțiunea 5	i=5								$c_{58}$			$c_5$	cost acțiunea 5
acțiunea 6	i=6	$c_{61}$	$c_{62}$									$c_6$	cost acțiunea 6
acțiunea 7	i=7			$c_{73}$	$c_{74}$							$c_7$	cost acțiunea 7
...	...											...	...
acțiunea N	i=N											$c_N$	cost acțiunea N
		$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	...	$k_M$		
		chelt. luna 1	chelt. luna 2	chelt. luna 3	chelt. luna 4	chelt. luna 5	chelt. luna 6	chelt. luna 7	chelt. luna 8	...	chelt. luna M		

Fig. 12: Matricea-program de stabilire a momentului implementării acțiunilor

Pentru fiecare acțiune se face o estimare a costului, iar valoarea se trece în ultima coloană din matrice (ex. în celula cost acțiunea 1 din figura 12). Se defalcă apoi costul fiecărei acțiuni pe perioadele de timp în care se implementează respectiva acțiune, ținându-se cont de relația matematică:



$$c_i = \sum_{j=1}^M c_{ij} \quad (1)$$

În relația de mai sus termenul reprezintă costul total al acțiunii  $i$ , iar  $c_{ij}$  reprezintă costul acțiunii  $i$  în luna  $j$ . Valorile  $c_{ij}$  se trec în matricea-program în celulele colorate aferente acțiunii  $i$ , iar suma  $c_i$  trebuie să corespundă cu valoarea cost acțiune  $i$  care a fost inițial trecută la capătul rândului. Există activități care pot fi fragmentate și derulate premergător momentului în care nevoia utilizării rezultatelor acestora. Această fragmentare amână o serie de cheltuieli, asigurând totodată o continuitate a acțiunilor.

Costul total al implementării acțiunilor,  $c_{total}$ , se determină astfel:

$$c_{total} = \sum_{i=1}^N c_i = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} \quad (2)$$

Pentru a constata dacă există resursele financiare disponibile la momentul programării acțiunilor și efectuării obligațiilor de plată, se calculează costul implementării pe lună, cu relația matematică:

$$k_j = \sum_{i=1}^N c_{ij} \quad (3)$$

unde  $k_j$  reprezintă cheltuielile efectuate în luna  $j$ , iar  $c_{ij}$  reprezintă costul acțiunii  $i$  în luna  $j$ . Valorile calculate se trec pe penultimul rând al matricei și se verifică încadrarea în limitele stabilite pentru lunile respective. În cazul în care limitele impuse cheltuielilor se depășesc în anumite luni, există posibilitatea de a rearanja acțiunile prin decalare sau extindere în timp. În funcție de modul de finanțare a firmei, limitele impuse cheltuielilor se pot stabili și pe perioade de timp mai luni, de exemplu pe trimestru sau pe semestru. În acest caz trebuie avut în vedere ca suma cheltuielilor pe lunile aferente perioadei de timp vizate să nu depășească suma alocată acelei perioade de timp. Cheltuielile totale efectuate pe durata transformării digitale se calculează cu relația matematică:

$$k_{total} = \sum_{i=1}^N c_{ij} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N c_{ij} \quad (4)$$

Deoarece  $c_{total}$  are aceeași semnificație ca și  $k_{total}$  cele două valori trebuie să fie egale, deci matricea-program oferă o cheie de verificare a corectitudinii procesului de calcul și implicit a eșalonării acțiunilor în timp.

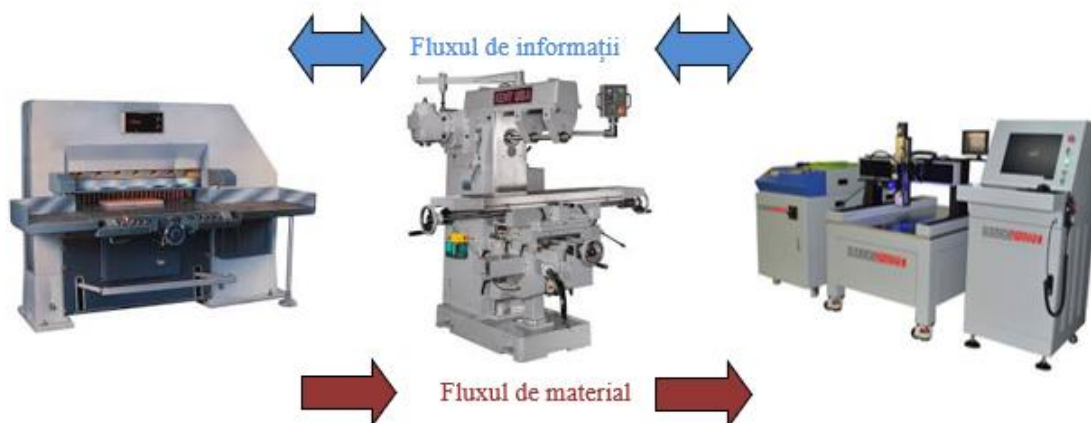
În cazul flexibilității perioadei de implementare a acțiunilor, se acordă prioritate acelor acțiuni sau șir de acțiuni care au ca finalitate un efect imediat. Acest efect imediat nu este neapărat de natură financiară, dar finalmente duce la efecte financiare pozitive.

Spre deosebire de modelele existente, modelul propus privește tranziția în mod global și are avantajul că elimină redundanțe și necesitatea corectării și ajustării acțiunilor în funcție de istoricul tranziției.

Capitolul 4 - **Studiu de caz privind integrarea unei mașini-unelte clasice într-o linie de fabricație auto-organizată conform sistemului Industry 4.0** prezintă un exemplu de transformare a producției pe o linie de fabricație clasică într-una controlată cu ajutorul sistemelor instrumental-informatic, capabilă să se organizeze autonom și să stabilească nevoia

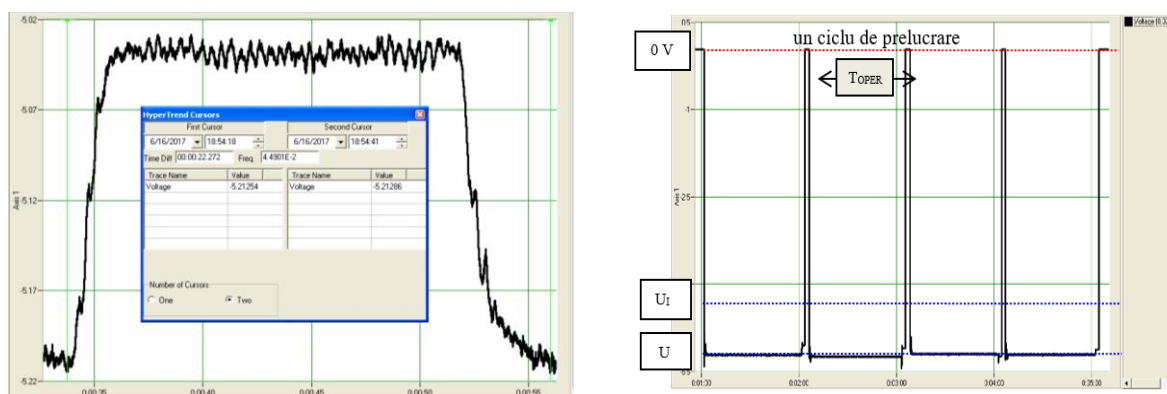
de intervenție umană în cazul funcționării anormale sau pentru a asigura mentenanța. Această transformare este găsită ca fiind necesară în studiul prezentat în capitolul trei, la domeniul infrastructură.

Linia de fabricație utilizată ca un prim exemplu constă din trei utilaje, reprezentate în figura 13, constând dintr-o mașină de debitat, o freză universală și o mașină pe care se assemblează componente dintre care unul este produs pe freză. Scopul cercetării îl constituie implementarea unui senzor optic și dezvoltarea algoritmului ALSO într-un program informatic care să permită mașinii să cunoască starea proprie și să genereze date care pot fi transmise către diverse compartimente ale firmei (producție, contabilitate, mentenanță etc.).



**Fig. 13:** Schema fluxului de material și de informații pentru linia de fabricație analizată

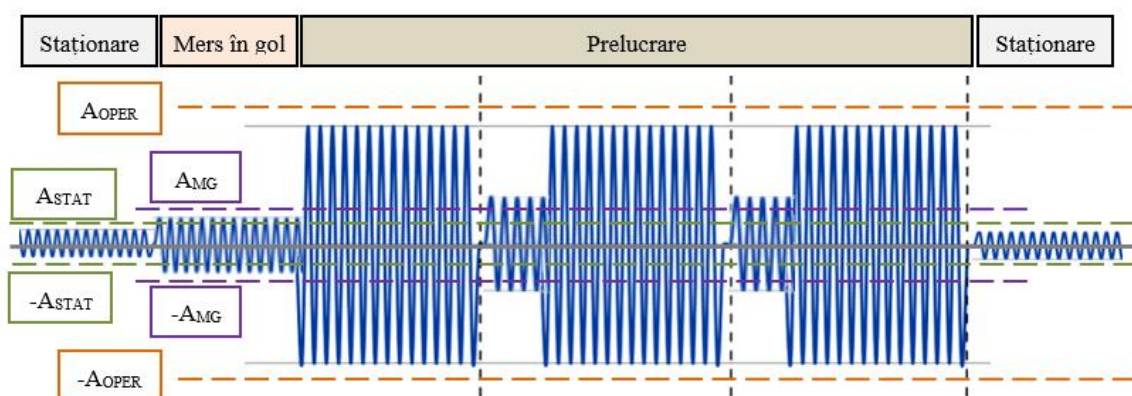
Utilizând algoritmul ALSO se pot genera periodic, la intervale de timp stabilite, rapoarte legate de numărul de produse realizate, de cantitatea rebuturilor, respectiv de timpii de funcționare, mentenanță și staționare. În esență, algoritmul se bazează pe un semnal dat de un senzor optic focusat pe spațiul de lucru (piesa de prelucrat). Prin analiza semnalului achiziționat se poate stabili numărul de treceri, timpul necesar pentru o trecere, numărul de piese executate, timpul de încărcare-descărcare, timpul de staționare a mașinii, etc. Transmiterea în timp real a informațiilor către un sistem centralizat permite luarea, chiar autonomă, a deciziilor privind operarea celorlalte mașini din fluxul de producție.



**Fig. 14:** Interfața reprezentând deplasarea capătului liber al piesei pentru o trecere, respectiv pentru un ciclu complet

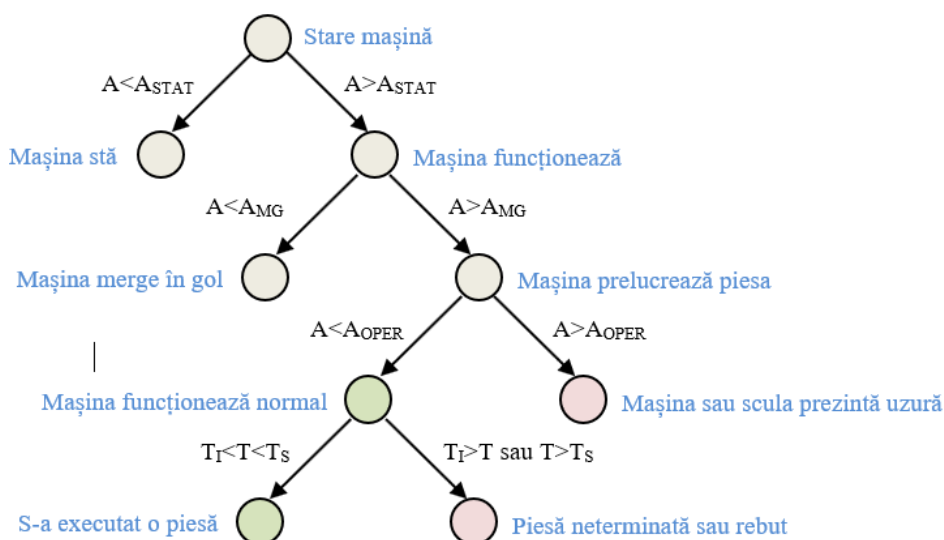
Un al doilea exemplu constă în utilizarea accelerometrelor amplasate pe mașini cu comandă numerică și dezvoltarea unui algoritm (ALMA) bazat pe un arbore de clasificare și decizie care a fost realizat pentru a permite identificarea și transmiterea informațiilor legate de starea mașinii, a producției și a gradului de utilizare a mașinii. Semnalul, achiziționat cu un accelerometru, este analizat în domeniul timp. În funcție de amplitudinea accelerațiilor se pot distinge diferite stări ale mașinii și sculelor, respectiv a producției. Un exemplu pentru un semnal achiziționat în timpul procesului de fabricație și limitele amplitudinilor pentru diverse stări ale mașinii este prezentat în figura 15.

Datele obținute și prelucrate în acest fel excedează cele obținute în mod obișnuit pentru mașini chiar complexe și dotate cu senzori standard, care oferă doar informații despre parametrii mașinii (presiune ulei, consum energie electrică etc.), fiind utile și unor departamente care nu au legătură nemijlocită cu producția.



**Fig. 15:** Exemplu pentru un semnal achiziționat de la accelerometru în timpul procesului de fabricație și limitele amplitudinilor pentru diverse stări ale mașinii

Starea mașinii și regimul de funcționare se identifică cu ajutorul parametrilor mășurați, introduși în arborele de clasificare și decizie prezentat în figura 16. Algoritmul permite și evidențierea numărului de piese procesate, a numărului de rebuturi sau piese pentru care nu au fost efectuate toate operațiile de prelucrare.



**Fig. 16:** Arborele de clasificare și decizie care stă la baza algoritmului ALMA

Informațiile pot fi transmise și altor mașini în timp real, iar dacă programele informatice sunt înglobate într-un program global de organizare a producției, fluxul de producție devine auto-organizat. S-a constatat faptul că este mai simplu ca algoritmi să fie dezvoltați individual, specific pe aplicație, iar apoi se pot agrega într-un sistem complex a cărui structură se poate concepe a priori.

Capitolul 5 - **Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de dezvoltare ale cercetărilor** reflectă rezultatele studiilor efectuate, prezentând principale concluzii desprinse în urma cercetărilor efectuate și contribuțiile originale relevante. Se evidențiază următoarele contribuții relevante:

- Definierea și ierarhizarea în funcție de relevanță a principalilor factori care pot stimula managementul firmelor românești să grăbească implementarea sistemului Industry 4.0;
- Identificarea principalelor bariere care pot frâna implementarea sistemului Industry 4.0 și ierarhizarea acestora în funcție de percepția managerilor firmelor românești;
- Stabilirea unui sistem compus din 35 de indicatori de maturitate structurat pe șase domenii adaptat firmei analizate și definierea indicatorilor caracteristici celor patru nivele de maturitate;
- Stabilirea nivelurilor țintă de maturitate pe domenii și indicatori;
- Definierea acțiunilor necesare a fi derulate pentru implementarea Industry 4.0 și identificarea limitărilor existente în procesul de implementare;
- Definierea unui model de implementare a Industry 4.0 și exemplificarea utilizării acestuia prin stabilirea ordinii implementării acțiunilor în funcție de limitările identificate și de resursele disponibile;
- Definierea unor reguli de prioritizare a acțiunilor desfășurate în vederea stabilirii celui mai rațional traseu de implementare a Industry 4.0
- Dezvoltarea unui echipament care permite transformarea unei mașini clasice în sistem cyber-fizic și stabilirea unor algoritmi de analiză și raportare a evenimentelor.

Rezultatele cercetărilor au fost publicate în reviste de specialitate (3 articole în reviste indexate ISI și 3 în reviste indexate BDI) și în volume ale conferințelor de profil (1 indexat ISI, 2 indexate Scopus și 1 indexat BDI). Lista lucrărilor care au ca tematică elemente din teză este prezentată în continuare.

1. Gillich EV, Nedelcu D, Popescu C, Self-management of machines in smart factories via advanced algorithms, *Annals of the „Constantin Brancusi” University of Targu-Jiu. Engineering Series 1*, 2019, pp. 65-69 (**Index Copernicus**)
2. Gillich EV, Mocan M, Mituletu IC, Korca ZI, Process Monitoring in Precision Machining using Optical Sensors, *Romanian Journal of Acoustics and Vibration 14 (1)*, 2017, pp. 50-53 (**ISI**)
3. Hațegan C, Gillich EV, Vasile O, Nedeloni MD, Pădureanu I, Finite Element Analysis of thin plates clamped on the rim of different geometric forms. Part I: Simulating the Vibration Mode Shapes and Natural Frequencies, *Romanian Journal of Acoustics and Vibration 12(1)*, 2015, pp. 69-74 (**ISI**)
4. Hațegan C, Gillich EV, Vasile O, Nedeloni MD, Jurcu M, Magheti P, Finite Element Analysis of thin plates clamped on the rim of different geometric forms. Part II: The Absolute and Relative Variation of Natural Frequencies, *Romanian Journal of Acoustics and Vibration 12(1)*, 2015, pp. 81-86 (**ISI**)

5. Muntean F, Hatiegan C, Popescu C, Gillich EV, Iancu V, Study regarding the determining of the natural frequencies and modal shapes of the column type structures with additional mass, *Annals of the „Constantin Brâncuși” University of Târgu-Jiu. Engineering Series 3*, 2015, pp. 52-55 ([Index Copenicus](#))

6. Nedelcu D, Gillich EV, Iancu V, Muntean F, Theoretical and Experimental Research Performed on the Tesla Turbine – Part II, *Analele Universitatii "Eftimie Murgu". Fascicula de Inginerie 22(2)*, 2015, pp. 264-272 ([Index Copernicus](#))

7. Gillich EV, Mocan M, Korca ZI, Gillich GR, Hamat CO, Real-time assessment of machine performance through the use of an intelligent sensorial system, *The 10th International Symposium Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering (KOD 2018) 6–8 June 2018, Novi Sad, Serbia*, Publicat in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 393, 2018, Art.ID 012082 ([Scopus](#))

8. Mocan M, Gillich EV, Mituletu IC, Korca ZI, An evolutionary sensor approach for self-organizing production chains, *International Conference on Applied Sciences (ICAS2017) 10–12 May 2017, Hunedoara, Romania*, Publicat in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 294, 2017, Art.ID 012092 ([Scopus](#))

9. Gillich EV, Mocan M, Cei nouă piloni ai noii revoluții industriale – INDUSTRY 4.0, publicat in *Știința și Inginerie 31*, 2017

10. Negru I, Gillich GR, Praisach ZI, Tufoi M, Gillich EV, Nondestructive evaluation of piers, *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2015*, Art.ID 943817 ([ISI](#)).

Cercetările efectuate pe parcursul studiilor doctorale au condus la elaborarea unui model de tranziție la sistemul Industry 4.0 aplicabil unei firme medii care activează în domeniul producției de echipamente electrice. Datele avute la dispoziție au fost relevante și durata studiului suficient de concentrată pentru a se putea genera o imagine de ansamblu asupra firmei și a mediului în care activează.

O direcție pentru cercetări ulterioare se referă la stabilirea viabilității metodologiei și efectuarea de corectări sau calibrări în urma monitorizării modului de implementare în contextul transformărilor tehnologice actuale și ale derulării proceselor într-un mediu economic aflat într-o dinamică continuă.

Studiile efectuate deschid de asemenea o direcție de cercetare legată de găsirea unor algoritmi de analiză a datelor, eventual cu includerea de elemente de inteligență artificială, care să permită luarea automată a deciziilor pentru structuri de producție mai complexe.

Teza se încheie cu lista referințelor bibliografice și cu anexele, care prezintă programele naționale legate de Industry 4.0 din țările Uniunii Europene, lista firmelor și chestionarul aplicat acestora și nivelele de maturitate actuale versus cele propuse a fi atinse de FIRMĂ.

## BIBLIOGRAFIE

[1] Mokyr J., (1985). *The New Economic History and The Industrial Revolution*, Rowan & Littlefield Publishers Inc., USA.

[2] Rojko A.: *Industry 4.0 Concept: Background and Overview*, *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, Vol. 11, nr. 5, 2017, pp. 77-90.

- [3] Bauernhansl T.: *Die vierte industrielle Revolution. Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma*, Industrie 4.0, Produktion, Automatisierung und Logistik, Springer, Wiesbaden, 2014, pp. 3-35.
- [4] Ustundag A., Cevikcan E.: *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*, Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer International Publishing, 2017.
- [5] Schlaepfer R., Koch M.: *Industry 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies*, Deloitte Report, 2015.
- [6] Roblek V., Meško M., Krapež A.: *A complex view of Industry 4.0*, SAGE Open, Vol. 6, Nr. 2, 2016.
- [7] Larosse J.: *Analysis of national initiatives on digitising European industry. The Netherlands: Smart Industry*, Report produced for DG CNECT, Revised on October 10th, 2017.
- [8] Kagermann H., Wahlster W., Helbig J.: *Securing the future of German manufacturing industry. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*. Frankfurt: Acatech-National Academy of Science and Engineering, 2013
- [9] Basl J.: *Pilot study of readiness of Czech companies to implement the principles of Industry 4.0*, Management and Production Engineering Review, Vol. 8, Nr. 2, 2017, pp. 3–8
- [10] Cadix A., *Industrie du futur: du système technique 4.0 au système social*, Rapport de l'Académie des technologies, 8 novembre 2017
- [11] Lazaro O.: *Analysis of National Initiatives for Digitising Industry. Spain: Industria Conectada 4.0*, EU report, 2017.
- [12] Mattauch W.: *Digitising European Industries - Member States Profile: Poland*, EU Report, 2017.
- [13] Liao Y., Loures E.R., Deschamps F., Brezinski G., Venâncio A.: *The impact of the fourth industrial revolution: a cross-country/region comparison*, Production, Vol. 28, 2018, art. e20180061.
- [14] NISC: *Vision of New Industrial Structure - Japan's strategies for taking the lead in the Fourth Industrial Revolution*, New Industrial Structure Committee Interim Report, April 27th, 2016.
- [15] Jeong Eun Ha: *Smart Industry in Korea*, Report for Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, September 27, 2015
- [16] de Sousa Jabbour A.B.L., Jabbour C.J.C., Foropon C., Filho M.G.: *When titans meet – can Industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors*, Technological Forecasting and Social Change, Vol. 132, 2018, 18–25.
- [17] Szabo R.Z., Vuksanović Herceg I., Hanák R., Hortovanyi L., Romanová A., Mocan M., Djuričin D.: *Industry 4.0 Implementation in B2B Companies: Cross-Country Empirical Evidence on Digital Transformation in the CEE Region*, Sustainability, Vol. 12, 2020, art. 9538
- [18] Horváth D., Szabó R.: *Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities?*, Technological Forecasting and Social Change, Vol.146, 2019, pp. 119–132

- [19] Gracel J., Łebkowski P.: *Concept of Industry 4.0 related manufacturing technology maturity model (ManuTech Maturity Model, MTMM)*, International Conference on Decision Making Manufacturing and Services, September 2017, Zakopane, Poland
- [20] Schuh G., Anderl R., Gausemeier J., ten Hompel M., Wahlster W.: *Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies*, acatech STUDY, 2017.
- [21] Schumacher A., Erol S., Sihn W.: *A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises*, Procedia CIRP, Vol. 52, 2016, pp. 161 – 166.