

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI
FACULTATEA ENERGETICĂ ȘI INGINERIE ELECTRICĂ

Cu titlu de manuscris
C.Z.U.: 621.37/.39

CAZAC VADIM

ELABORAREA SISTEMELOR ELECTROMECHANICE PENTRU
INDUSTRIA FIRELOR METALICE

Specialitatea: 222.01 "Dispozitive și echipamente electrotehnice"

Teză de doctor în științe ingineresti

Conducător științific:

NUCA Ilie,
conf. univ., dr.

Autor:

CAZAC Vadim

Chișinău, 2021

© CAZAC VADIM, 2021

CUPRINS

ADNOTARE (în română, engleză, rusă)	5
ABREVIERI ȘI NOTAȚII UTILIZATE	8
INTRODUCERE	10
1. ASPECTE GENERALE PRIVIND LINIILE TEHNOLOGICE DE TREFILARE A FIRELOR ELECTRICE	17
1.1. Aspecte generale privind procesul tehnologic de producere a cablurilor electrice.....	17
1.2. Structura liniei de trefilare cu alunecare cercetate model <i>Listrong 17DC</i>	19
1.3. Structura actuală a sistemul de acționare a trefilului cu convertizoare de frecvență.....	22
1.4. Aspecte teoretice privind principiu trefilării firelor	24
1.5. Forța și puterea necesară procesului de trefilare	27
1.6. Influența vitezei asupra procesului de trefilare	29
1.7. Analiza metodelor moderne de control în acționări electrice de curent alternativ	30
1.7.1. Utilizarea metodelor moderne de control în acționări electrice de curent alternativ de frecvență variabilă.	32
1.7.2. Necesitatea și importanța reglajului vectorial pentru motoarele asincrone.....	33
1.8. Necesitatea reglării vitezei procesului tehnologic de trefilare	38
1.9. Particularități și probleme principale în exploatarea SEM la liniile de trefilare.....	39
1.10. Cerințele principale înaintate SEM a liniei de trefilare la etapa de modernizare	40
1.11. Concluzii la capitolul 1.....	41
2. OPTIMIZAREA SISTEMULUI ELECTROMECHANIC AL LINIEI DE TREFILARE	43
2.1. Formularea obiectivelor privind optimizare SEM a liniei de trefilare.....	43
2.2. Caracteristica mecanică a trefilului și mecanismului de bobinat.....	44
2.2.1. Caracteristica mecanică a trefilului	44
2.2.2. Caracteristicile mecanice ale bobinatorului.....	46
2.3. Modelul matematic al compensatorului pendular	55
2.3.1. Elaborarea sistemului de control a unui bobinator cu compensator pendular.....	57
2.3.2. Estimarea parametrilor variabili ai bobinei	59
2.3.3. Estimarea parametrilor firului la trecerea prin compensator	59
2.4. Calculul sistemului de reglare a forței de tragere la bobinare.....	59
2.5. Analiza stabilității sistemului de reglare a acționării bobinatorului	63
2.5.1. Analiza stabilității după criteriul Routh-Hurwitz	63
2.5.2. Analiza stabilității sistemului în MatLab Simulink după Criteriul Bode și Nyquist simplificat	64
2.6. Aspecte generale privind reglarea adaptivă a sistemelor electromecanice	67
2.6.1. Probleme ale implementării algoritmilor adaptivi în controlul SEM.....	67
2.6.2. Concepte de control adaptiv al SEM	67
2.7. Strategii de reglare Fuzzy adaptive ale acționărilor electrice	71
2.7.1. Scheme generale de reglare Fuzzy adaptive a SEM.....	72
2.7.2. Sistem de reglare Fuzzy adaptiv cu model de referință.....	74
2.8. Proiectarea regulatorului hibrid Fuzzy-PID pentru reglarea vectorială a mecanismului de bobinat cu parametri mecanici variabili.....	78
2.9. Concluzii la capitolul 2	80

3. MODELAREA SISTEMULUI ELECTROMECHANIC DE ACȚIONARE A BOBINATORULUI ÎN MEDIUL MATLAB	81
3.1. Formularea obiectivelor privind cercetare SEM al mecanismului de bobinat în mediul MatLab/Sim Power System	81
3.2. Elaborarea modelului Sim Power System al sistemului electromecanic cu controlul direct al cuplului	81
3.3. Rezultatele modelării mecanismului de bobinat la control DTC cu regulator PI	85
3.4. Rezultatele modelării mecanismului de bobinat la control DTC cu regulator Fuzzy	89
3.5. Elaborarea modelului sistemului de control al mecanismului de bobinat cu control de viteză și reglatoare Fuzzy	90
3.6. Rezultatele modelării mecanismului de bobinat cu control de viteză și reglatoare Fuzzy	91
3.7. Elaborarea modelului sistemului de control al mecanismului de bobinat cu control DTC și regulator hibrid Fuzzy-PID a forței din fir	92
3.8. Rezultatele modelării mecanismului de bobinat cu control DTC și regulator hibrid Fuzzy-PID a forței din fir	95
3.9. Analiza rezultatelor simulării SEM a bobinatorului	98
3.10. Concluzii la capitolul 3	98
4. IMPLEMENTAREA PRACTICĂ A REZULTATELOR CERCETĂRIILOR TEORETICE DIN CADRUL LUCRĂRII.....	99
4.1. Proiectarea sistemului de control a liniei de trefilare în baza rețelei PROFINET și IO-Link.....	99
4.1.1. Aspecte generale privind protocolul PROFINET.....	99
4.1.2. Aspecte generale privind IO-Link	101
4.2. Proiectare sistemului de control pentru linia de trefilare utilizând protocoalele PROFINET și IO-Link	103
4.3. Elaborarea algoritmului de setare a reglatoarului din bucla de reglare a bobinatorului strungului de trefilare cu convertizoarele existente	107
4.4. Analiza rezultatelor privind productivitatea liniei de trefilare	109
4.5. Concluzii la capitolul 4	111
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI	112
BIBLIOGRAFIE	113
ANEXE.....	126
A1. Aspecte generale privind procesul de trefilare	125
A2. Eficientizarea procesului tehnologic de trefilare în câmp ultraacustic	132
A3. Necesitatea și importanța tratării termice a firului trefilat (recoacerea)	135
A4. Calculul parametrilor sistemului de reglare vectorială a mecanismului de bobinat	138
A5. Setarea Convertorului MD380 la linia de trefilare cu regulator PID fără corecții după diametrul și momentul de inerție al bobinei	145
A6. Setarea Convertorului MD380 la linia de trefilare fără regulator PID cu corecții după diametrul și momentul de inerție al bobinei	147
A7. Mențiuni	149
DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII.....	155
CURRICULUM VITAE.....	156

ADNOTARE

Autor – CAZAC Vadim. **Titlul** – *Elaborarea sistemelor electromecanice pentru industria firelor metalice*. Teză de doctor în vederea conferirii titlului științific de doctor în științe inginerești la specialitatea 222.01 *Dispozitive și echipamente electrotehnice*.

Structura lucrării: Lucrarea conține o introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 124 titluri și include 7 anexe, 113 pagini, 72 figuri, 9 tabele. Rezultatele obținute în cadrul tezei au fost publicate în 6 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: sistem electromecanic, trefilor, bobinator, control vectorial, regulator Fuzzy.

Domeniul de cercetare se referă la științele ingineriei electrice, electrotehnică și electromecanică.

Scopul lucrării constă în sinteza structurilor avansate de control și cercetarea sistemelor electromecanice pentru eficientizarea proceselor industriale de fabricare a firelor și cablurilor electrice.

Obiectivele lucrării: Analiza și identificarea problemelor sistemului electromecanic al liniei de trefilare, dezvoltarea structurilor SEM pentru îmbunătățirea performanțelor procesului de bobinare al firului trefilat, elaborarea unui nou concept al sistemului de reglare, modelarea SEM al bobinatorului în scopul determinării performanțelor sistemului.

Metodologia cercetării științifice se bazează pe teoria sistemelor electromecanice, metodele de control vectorial și adaptiv a acționărilor electrice, modelare matematică.

Noutatea și originalitatea științifică a lucrării constă în identificarea particularităților proceselor industriale de producere a firelor și cablurilor electrice și elaborarea unor noi structuri ale sistemelor electromecanice adaptive bazate pe convertoare electronice de putere și mijloace programabile de control.

Problema științifică importantă soluționată constă în sinteza sistemelor electromecanice speciale adaptabile pentru instalațiile industriale de producere a firelor metalice prin trefilare cu fiabilitate, productivitate și eficiență energetică majorată.

Semnificația teoretică a lucrării consistă în contribuții științifice importante în dezvoltarea domeniului sistemelor electromecanice adaptive pentru instalațiile de fabricare firelor electrice.

Valoarea aplicativă a lucrării este determinată de faptul că, în lucrare au fost analizată și determinată performanța sistemelor electromecanice la trefilarea firelor, fiind identificați parametri tehnologici cheie care determină eficiența procesului de trefilare.

Implementarea rezultatelor științifice: Rezultatele investigației de față au fost utilizate la ajustarea strungurilor de trefilare groasă, medie și fină în cadrul companiei *Tehelectro-SV S.R.L.* din mun. Chișinău.

ANNOTATION

Author – CAZAC Vadim. **Title:** *The electromechanical systems development of metal wires industry.* Doctoral thesis for PhD qualification in engineering sciences, 222.01. *Dispozitive și echipamente electrotehnice*, specialty.

Thesis structure: The paper comprises an introduction, four chapters, general conclusions and recommendations, 124 references, 7 annexes, 113 pages, 72 figures, 9 tables. The results are published in 6 scientific papers.

Keywords: electro-mechanical system, wire drawing, winder, vector control, fuzzy controllers.

Field of study - refers to the electrical, electrotechnical and electromechanical engineering sciences.

The main goal consists of researching electromechanical systems, synthesis of advanced control structures for the automation and increasing the efficiency of industrial processes for the manufacture of electrical wires and cables

The methodology of scientific research is based on the theory of electromechanical systems, the methods of vector control and adaptive control of electrical drives, mathematical modeling.

Objectives of the paper: Analysis and identification of the problems of the electromechanical system of the wire drawing line, development of the EMS structures for improving the performance of the process of winding of the drawn wire, elaboration a new concept of the control system, modeling the EMS of winder with scope to identifying the performance of the system.

The novelty and scientific originality of the paper consists in identifying the particularities of the industrial processes for the production of electric wires and cables and elaboration of new structures of specific adaptive electromechanical systems based on electronic power converters and programmable control means.

The important scientific problem solved consists in the synthesis of special electromechanical systems adaptable for industrial installations for the production of metal wires by wire drawing with reliability, productivity and increased energy efficiency.

The theoretical importance. The thesis brings specific scientific contributions to the adaptive electromechanical systems for the installations for the manufacture of electrical wires.

The practical value of the work. In thesis, the electromechanical systems of wire drawing lines was analyzed and estimated the performance of them, the main technological parameter that determines the efficiency of the drawing process was identified.

Implementation of research results were used when were adjusted the thick, medium and fine wire drawing lines in the Tehelectro-SV S.R.L. company from Chisinau.

АННОТАЦИЯ

Автор – КАЗАК Вадим. **Название** – *Разработка электромеханических систем для проволочной промышленности* Диссертация о присвоение докторской степени в области инженерных наук, специальность 222.01. *Электротехнические устройства и оборудование.*

Структура работы: работа состоит из введения, четырёх глав, выводов и рекомендаций, библиографии из 124 наименований и включает 7 приложений, 113 страниц, 72 рисунков и 9 таблиц. Результаты исследования опубликованы в 6 научных работах.

Ключевые слова: волочение, обмотчик, векторное управление, Fuzzy регуляторы.

Область исследования: относится к электротехническим, электрическим и электромеханическим наукам.

Цели работы: состоит из исследования электромеханических систем, синтеза современных управляющих систем для автоматизации и повышение эффективности при производстве электрических проводов и кабелей.

Задачи диссертации: Анализ и выявление проблем электромеханической системы линии волочения, разработка структур электромеханических систем для улучшения характеристик процесса намотки тянутой проволоки, разработка новой концепции системы регулирование, моделирование электромеханической системы обмотка для определения качество регулирование системы.

Научная новизна работы: заключается в выявлении особенностей производственных процессов при производстве электрических проводов и кабелей и разработке новых структур адаптивных электромеханических систем на основе силовых преобразователей частоты и программируемых средств управления.

Решенная научная проблема: заключается в синтезе специальных электромеханических систем, адаптированных к промышленным установкам для производства металлической проволоки волочением с повышенной надежностью, производительностью и энергоэффективностью.

Теоретическая значимость. Диссертация вносит конкретный научный вклад в адаптивные электромеханические системы для линий производства электрических проводов.

Прикладное значение работы: В работе проанализированы и определены характеристики электромеханических систем при волочении проволоки, определены основные технологические параметры, определяющие эффективность процесса волочения.

Внедрение научных результатов: были использованы при наладке волочилиных станов толстых, средних и тонких проволок в компании “Техэлектро-СВ” S.R.L. из Мун. Кишинева.

ABREVIERI ȘI NOTAȚII UTILIZATE

SEM	Sistem electromecanic
F.d.t.	Funcția de transfer
CF	Convertor de frecvență
MA	Motor asincron
TV	Traductor de viteză
TC	Traductor de curent
TTF	Traductorul forței de tensionare
D	Diametrul firului până la trefilare
Lo	Lungimea firului până la trefilare
Fo	Secțiunea firului până la trefilare
Dn	Diametrul firului după trefilare
Ln	Lungimea firului după trefilare
Fn	Secțiunea firului după trefilare
Q	Comprimarea relativă a firului la trefilare
P _{tr.}	Forța de trefilare
N _{tr}	Puterea consumată la trefilare,
A	Matricea de stare
A _d	Componenta disipativă a matricei de stare
A _k	Componenta conservativă a matricei de stare
V _{vm}	Maximul vitezei de vibrație a filierei
R	Gradul de reducere a forței medii de tragere
L _{Z.D.}	lungimea zonei de deformare
Me	Cuplul electromagnetic dezvoltat de motor
Ms	Cuplul de sarcină la arborele motorului de acționare
RCA	Regulator componentei active a curentului
RV	Regulator de viteză
PI	Regulator proporțional integral
PID	Regulator proporțional integral diferențial
k _{CPT}	Coeficientul regulatorului proporțional a forței de tensionare
BCTP	Bloc de corectare a tensionării prescise
BCR _B	Bloc de calcul al razei bobinei
H _{RF}	Funcția de transfer a regulatorului de flux
H _{RCM}	Funcția de transfer a regulatorului curentului de magnetizare
H _{RT}	Funcția de transfer a regulatorului de tensionare

H_{RCA}	Funcția de transfer a regulatorului curentului activ
H_{Bob}	Funcția de transfer a bobinatorului
H_{CF}	Funcția de transfer a convertorului de frecvență
RCM	Regulatorul curentului de magnetizare
H_{ORC}	Funcția de transfer a obiectului regulatorului curentului de magnetizare
RF	Regulatorul de flux
H_{BV}	Funcția de transfer a buclei de viteză
m_B	Greutatea bobinei pline
H_{ORV}	Funcția de transfer a obiectului de reglare a vitezei
H_{BC}	Funcția de transfer a buclei incluse de curent
$T_{\mu C}$	Constanta necompensabilă a buclei de curent
T_{CF}	Constanta necompensabilă a convertorului

INTRODUCERE

Actualitatea și importanța problemei abordate: Problema de bază abordată se referă la sinteza parametrico-structurală a sistemelor electromecanice cu control avansat (vectorial, adaptiv) și cercetarea sistemelor electromecanice pentru automatizarea și eficientizarea proceselor industriale de fabricare a firelor și cablurilor electrice. Lucrarea tinde să elaboreze criteriile de calitate pentru controlul proceselor, să elaboreze cerințe către SEM a trefiloarelor la etapa de proiectare cu scopul asigurării unei funcționări eficiente.

În cazul sistemelor electromecanice reglabile clasice este bine-cunoscută importanța etapei de obținere a modelelor, a reprezentării matematice (dependenței) între diferite mărimi de intrare, intermediare și de ieșire. Aceste modele trebuie să fie cât mai exacte pentru că, ulterior în baza lor să fie identificată o metodă de proiectare corespunzătoare, pentru obținerea structurii și parametrilor regulatorului necesari îndeplinirii cerințelor de performanță impuse sistemului electromecanic.

Înainte de implementarea fizică a sistemului electromecanic cu reglare automată se realizează o simulare a motorului electric pentru studiul comportamentului și verificarea performanțelor. Precizia modelului și metoda de proiectare aleasă influențează calitatea reglării SEM în regimuri dinamice. [1, 2, 3, 4]

Modelele matematice ale mașinii de lucru, nu întotdeauna, redau cu precizie procesele care au loc și atunci devine importantă robustețea sistemului de reglare. De asemenea, pot apărea semnale perturbatoare, zgomote care influențează comportarea acționării. Printr-un sistem robust se înțelege un sistem care reușește să păstreze anumite proprietăți (stabilitate, performanțe) și în cazul apariției variației între sistemul real și modelul folosit (erori de modelare) sau în cazul perturbațiilor parametrice interne sau externe. Regulatorul robust este proiectat de obicei o singură dată, înainte de punerea în funcțiune a utilajului. [2, 5]

De multe ori, în prezența incertitudinilor parametrice și structurale în caracterizarea proceselor reale, soluțiile clasice și chiar cele robuste de reglare nu fac față și nu pot satisface condițiile de performanță impuse SEM. În acest context apare necesitatea folosirii unor noi structuri, moderne, inteligente și adaptive. În plus, actualitatea temei rezidă în faptul că, în teoria reglării SEM moderne se încearcă evitarea liniarizării sistemelor neliniare, regulatoarele fiind implementate direct pe baza modelului neliniar al procesului folosind structuri paralele cu informație distribuită de tip fuzzy (mulțimi vagi) și/sau neuronal.

Aceste structuri paralele permit proiectarea unor regulatoare numerice pentru procese complexe, caracterizate de neliniarități și incertitudini, în condițiile în care informațiile despre dinamica procesului sunt limitate, prin urmare facem referire la conceptul de “SEM cu control inteligent”.

Pe de altă parte, variațiile parametrice și structurale ale mașinii de lucru sau a mașinii electrice pot fi compensate și prin adăugarea unei bucle suplimentare în structura unui sistem de reglare clasic, alături de bucla de reglare convențională (reacției negative). Această buclă suplimentară este denumită buclă de adaptare. Rolul acesteia constă în asigurarea adaptării continue a comenzii convertorului prin modificarea parametrilor regulatorului sau a structurii acestuia prin semnale adiționale. Structurile de SEM adaptive pot fi în circuit deschis, cu răspândire mai redusă sau în circuit închis.

Actualitatea problemei rezidă și în faptul că, din punct de vedere economic, la momentul actual, pentru fiecare producător autohton, cum ar fi Tehelectro-SV S.R.L., cea mai importantă problemă este creșterea concurenței produsului fabricat atât pe piața internă cât și cea externă, iar în lucrarea dată este propusă o soluție în acest sens.

Problema reducerii consumului de energie a proceselor tehnologice industriale și sporirea competitivității produselor naționale este, în deplină, conformitate cu programul național pentru eficiență energetică 2011-2020 (HG a RM, nr. 833 din 10.11.2011), Lege nr. 139 din 19.07.2018 cu privire la eficiența energetică (Publicat: 17.08.2018 în Monitorul oficial Nr. 309-320), Planul național de acțiuni în domeniul eficienței energetice pentru anii 2013-2015 (HG nr. 113 din 07.02.2013) și pentru anii 2016-2018 (HG nr. 1471 din 30.12.2016) și în conformitate cu directiva 2012/27/UE a Parlamentului European și a Consiliului, din 25 octombrie 2012, privind eficiența energetică. [6, 7, 8]

La fel, actualitatea temei rezultă și din faptul că problema propusă se încadrează în ***Prioritatea 5 – Competitivitate industrială și materiale inovative al Programului național în domeniile Cercetării și Inovării pentru anii 2020-2023*** și a Planului de acțiuni privind implementarea acestuia aprobat prin Hotărârea Guvernului nr. 381 din 01.08.2019 [9].

Competitivitate produsului este determinat de calitatea acestuia și de cheltuielile pentru producerea acestuia. Analiza situației economice actuale ne permite să constatăm că majoritatea utilajului care este în companiile producătoare de fire electrice în Republica Moldova este vechi sau are la bază tehnologii învechite. În acest sens, utilizarea acționărilor electromecanice eficiente energetic în producerea firelor și cablurilor electrice este decisivă la obținerea unui produs competitiv pe piață.

Prețul de producere firelor electrice neizolate este format din cheltuielile care reprezintă aproximativ 60-70% costul materiei prime, munca și cheltuieli care sau format în timpul procesului de trefilare, recoacere și răsucire după caz.

Evoluția producției de cabluri electrice în Republica Moldova. Printre cele mai progresive ramuri industriale, care au determinat creșterea sectorului industrial în anul 2018 se numără: industria auto, în special, producerea de fire și cabluri electrice, de piese pentru autovehicule și motoare (cu o contribuție de circa +1,9 p.p. la IPI), producția și furnizarea de energie (+1.2 p.p.),

Industria auto. Producția de fire și cabluri electrice a crescut în primele 8 luni ale anului 2018 cu 25,1%. Creșterile înregistrate se datorează intensificării activităților economice ale investitorilor străini din cadrul Zonelor Economice Libere (ZEL), unde continuă să se dezvolte și să se extindă proiectele investiționale în domeniul industriei constructoare de mașini ale unor companii străine precum: Sumitomo (Orhei), Draexlmaier (Cahul), Coroplast (Căușeni) etc. Majoritatea producției fabricate în aceste ramuri este realizată pe piețele externe (circa 90%), ocupând o cotă de circa 18% din totalul exporturilor. O altă companie producătoare de fire și cabluri electrice este "Молдавкабель", din orașul Bender care intră în componența holdingului "Севкабель" din anul 2003. Uzina "Молдавкабель" este cea mai mare companie din Moldova care produce fire și cabluri electrice din anul 1958.

În acest context, de o importanță deosebită este modernizarea sistemelor electromecanice ale echipamentelor tehnologice din industria producerii firelor și cablurilor electrice pentru a putea concura pe piața națională și internațională, problemă care este abordată în prezenta lucrare.

O condiție necesară pentru acest lucru este modernizarea sistemelor de acționare electrică a echipamentului, care necesită dezvoltarea și implimentarea de mijloace efective de reglare.

Un instrument eficient pentru gestionarea parametrilor tehnologici ai echipamentelor industriale sunt sistemele electromecanice (SEM), care includ un convertor de putere, un motor, transmisia mecanică și organul de lucru a mașinii. Cu toate acestea, până în prezent sistemele de control automat (SCA) în instalațiile industriale mari, în cele mai multe cazuri se construiesc pe principiului cascadă în baza reguletoarelor (P, PI, PID).

Actualitatea temei rezultă și din faptul că progresul tehnologic și dezvoltarea industrială sunt asociate cu crearea și punerea în aplicare a sistemelor automatizate pentru controlul proceselor (SCA), precum și sistemelor de fabricație flexibile. Utilizarea lor contribuie la îmbunătățire calității produselor și la micșorarea prețul de producerii. Însă, utilizarea acestor sisteme poate fi realizată în condițiile construcției lor în baza unor modele matematice adecvate care descriu

caracteristicile relațiilor dintre legile proceselor de control și monitorizare automată a celor mai importanți parametri ce determină calitatea și performanța procesului. [10, 11]

La momentul actual producerea firelor și cablurilor electrice se orientează spre elaborarea liniilor tehnologice cu un nivel avansat de automatizare și cu o productivitate ridicată. De exemplu, liniile tehnologice de izolare a firelor electrice pot conține în sine procese de trefilare, recoacere, izolare (într-un strat, doua sau trei), răsucire, marcarea, controlul calității produsului finit (profil, diametru, excentricitate etc.).

Liniile de producere a cablurilor electrice la moment sunt fabricate din module standard (extruder, modul de recoacere, răcitor, bobinator). O deosebire importantă pentru liniile de producere a firelor electrice este faptul că acestea au construcție repartizată care poate atinge lungimi de sute de metri ceea ce complică mult monitorizarea și controlul procesului tehnologic.

Este evident că reglarea unei acționari electrice cu multe motoare la instalațiile de prelucrare și producere a firelor electrice în regim de arbore electric, trebuie nu numai să asigure concordanța dintre parametrii modulelor în regimuri statice și dinamice, dar și să asigure o eficiență energetică a întregului proces de producere.

Eficiențizarea procesului de trefilare prin reducerea forței de tragere la instalațiile de trefilare în urma implementării unei tehnologii neconvenționale cu ultrasunet poate avea influență mare asupra prețului de producere a produsului finit.

Astfel, analiza problemei sistemelor electromecanice pentru automatizarea și eficiențizarea proceselor industriale de fabricare a firelor și cablurilor electrice rămâne a fi una actuală, atât pentru domeniul de cercetare tehnic, cât și pentru dezvoltarea industriei auto și de producere a firelor și cablurilor electrice în Republica Moldova.

Scopul acestei lucrări: constă în sinteza structurilor avansate de control și cercetarea sistemelor electromecanice pentru eficiențizarea proceselor industriale de fabricare a firelor metalice.

Pentru atingerea scopului propus în lucrare s-au formulat următoarele obiective:

- realizarea unui studiu bibliografic privind procesul tehnologic de producere a firelor și cablurilor electrice;
- Identificarea soluțiilor necesare pentru ridicarea eficienței procesului de trefilare;
- Elaborarea conceptelor de control ale acționărilor electrice cu convertoare de frecvență pentru ridicarea eficienței mecanismului de bobinat;
- Modelarea sistemului de acționare a bobinatorului cu motor asincron în MatLab SimPowerSistem;

- Elaborarea unui sistem nou pe bază de PLC.

Ipoteza de cercetare: Dezvoltarea SEM avansate și adaptabile va contribui la:

- Reducerea forței de rezistență a firului la tragere prin filiere;
- Creșterea vitezei de trefilare;
- Controlul eficient al forței din fir la bobinare;

Noutatea și originalitatea științifică a rezultatelor: Noutatea lucrării consistă în elucidarea problemei implementării sistemelor electromecanice adaptive utilizabile în industria producerii firelor și cablurilor electrice. La fel, s-a efectuat studiul sistemelor de acționare a utilajului de producere a firelor electrice prin prisma problemelor de eficiență energetică, productivitate și fiabilitate.

Printre rezultatele științifice noi se enumeră următoarele:

- A fost elaborat modelul SimScape al sistemului de acționare a bobinatorului cu motor asincron și reglare vectorială;
- În premieră, au fost calculate caracteristicile mecanice ale bobinatorului în funcție de mai multe legi de control a forței din fir;
- A fost demonstrată necesitatea ridicării vitezei de trefilare cu scopul micșorării forței de tragere a firului prin filieră și respectiv eficientizarea întregului proces de trefilare;
- A fost formulat și elaborat algoritmul de implementare a reguletoarelor hibride Fuzzy-PID în sistemele electromecanice ale bobinatoarelor;
- A fost propus un nou concept al sistemului de control al trefilării având la bază un PLC și tehnologiile *Profinet* și *IO-link*.

Metodologia cercetării: Pentru soluționarea problemelor identificate și realizarea obiectivelor propuse în lucrare s-a aplicat o abordare sistemică fiind utilizate teoria mașinilor și acționărilor electrice, teoria sistemelor de reglarea automată, modelarea matematică a sistemelor electromecanice, mediul de programare MatLab Simulink, criteriile de acordare ale reguletoarelor sistemelor de control automat.

Implementarea rezultatelor științifice și valoarea aplicativă a lucrării: Rezultatele teoretice și practice obținute în cadrul acestei lucrări au fost utilizate în:

- În cadrul companiei producătoare de fire și cabluri electrice de putere *Tehelectro-SV S.R.L* din mun. Chișinău pentru ajustarea liniilor de trefilare groasă, medie și fină.

Aprobarea rezultatelor obținute: Rezultatele de bază ale investigație realizate au fost expuse, discutate și aprobate în cadrul mai multor seminare, simpozioane și conferințe de nivel național și internațional:

- Conferințele Tehnico-științifice a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților din anii 2011, 2012,2013, 2015 Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Moldova.
- International Conference on Electromechanical and Power Systems, Chisinau Octombrie 2011.
- International Conference on Appliedand Theoretical Electricity - ICATE 2012, Craiova, october, 2012
- INTERNATIONAL CONFERENCE of SCIENTIFIC PAPER AFASES 2012 Brasov, May 2012
- 10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems SIELMEN 2015 Craiova, Chișinău October 2015.
- 11th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems SIELMEN 2017 Craiova, Chișinău October 2017.
- Annals of the University of Craiova – Electrical Engineering serie, CNCSIS 2015
- Proceeding of 5th International Conference on Modern Power Systems MPS 2013, may 2013 Cluj-Napoca, Romania.

Sumarul compartimentelor tezei: Teza de doctor a fost elaborată în conformitate cu cerințele înaintate de către Agenția Națională de Asigurare a Calității în Educație și Cercetare. Teza include introducerea, 4 capitole structurate în paragrafe, adnotarea în limbile română, engleză și rusă, lista abrevierilor utilizate, concluzii generale și recomandări, lista bibliografică în număr de 117 titluri, 7 anexe. Numărul total de pagini al lucrării este 117 (până la bibliografie), conținând 71 figuri și 10 tabele.

În **Introducere** sunt prezentate aspectele generale privind actualitatea temei și necesitatea modernizării sistemelor electromecanice ale liniilor de producere a firelor și cablurilor electrice, argumentarea alegerii temei de cercetare, scopul și obiectivele tezei, problema științifică soluționată, metodologia cercetării, importanța teoretică și valoarea aplicativă a lucrării, precum și sumarul compartimentelor tezei.

În **Capitolul I**, intitulat **Aspecte generale privind liniile tehnologice de trefilare a firelor electrice** este analizat procesul tehnologic de producere a firelor electrice unde se pune accent pe procesul de trefilare, analiza teoretică a acestuia proces, analiza metodelor moderne de control în acționări electrice cu motoare asincrone. În concluzii au fost elaborate o serie de cerințe impuse sistemului de acționare al liniei de trefilare și au fost formulate obiectivele cercetării.

Capitolul II al tezei - Optimizarea sistemului electromecanic al trefilorului – reprezintă o cercetare teoretică aprofundată a sistemelor electromecanice ale trefilorului necesară pentru eficientizarea proceselor tehnologice de bază la producerea firelor electrice. La fel, este elaborat modelul matematic al controlului vectorial al mecanismului de bobinat, iar în rezultatul calculului efectuate a fost optimizat sistemul de reglare a vitezei și forței din fir la bobinare. Capitolul conține și o analiză a stadiului curent din domeniul sistemelor de acționare electrică performante cu control adaptiv.

Capitolul III al tezei, cu denumirea Modelarea sistemului electromecanic de acționare a bobinatorului în mediu MatLab reprezintă partea aplicativă a lucrării. În acest capitol este modelat sistemul de reglare al mecanismului de bobinat. Simularea sistemului de control al mecanismului de bobinat ne permite să observăm dependența forței de tensionare la diferite moduri de comandă ale motorului asincron. Acestea acționează mecanismul de bobinat și valoarea acestei forțe în regimuri dinamice, dependența puterii consumate de acționare pentru diferite valori a forței prescrise și influența asupra stabilității sistemului.

La fel, sunt realizate ambele moduri de comandă vectorială adaptivă a motorului asincron, cu controlul DTC și controlul de viteză pentru diferiți parametri mecanici ai bobinei (greutate, rază, viteză).

Capitolul IV - Implementarea practică a rezultatelor cercetărilor teoretice din cadrul lucrării – include proiectarea unui sistem de control modern pentru linia de trefilare având la bază un PLC și tehnologiile Profinet și IO-link. Capitolul conține și o analiză a performanțelor liniei obținute după implementarea soluțiilor propuse. Tot în acest capitol au fost elaborate două metodologii sub formă tabelară pentru funcțiile care sunt necesare de a fi setate pe convertorul de frecvență care face parte din SEM al bobinatorului.

Fiecare capitol al lucrării se încheie cu expunerea concluziilor de bază și specificarea principalelor rezultate obținute.

Lucrarea finalizează cu **Concluzii generale și recomandări** care reflectă tezele principale ce au rezultat din cercetarea și aplicarea în practică a procesului de elaborarea sistemelor electromecanice pentru industria firelor metalice.

1. ASPECTE GENERALE PRIVIND LINIILE TEHNOLOGICE DE TREFILARE A FIRELOR ELECTRICE

Proiectarea sistemelor electromecanice automatizate pentru liniile tehnologice trebuie să se bazeze pe o analiză amplă a procesului tehnologic, indentificarea rezervelor pentru reducerea consumului de energie, ridicarea productivității și reducerea rebutului.

Complexul de sarcini care trebuie rezolvate trebuie să includă o descriere matematică a procesului studiat, dezvoltarea schemelor structurale și a modelelor matematice, o analiză matematică prin modelare, studii experimentale și evaluarea modelelor dezvoltate.

Formularea și rezolvarea fiecărei sarcini este efectuată după justificarea teoretică relevantă și analiza soluțiilor existente.

Aspectele sus-numite au fost luate în considerare la elaborarea primului capitol. În cadrul căruia sunt analizate problemele care apar la exploatarea trefiloarelor și bobinatoarelor, SEM existente la această linie de producere, necesitatea de a controla viteza trefilării și recoacerii firului trefilat. La fel, au fost formulate cerințele față de sistemele electromecanice ale trefilului și mecanismului de bobinat, fiind formulate scopurile și problemelor propuse spre rezolvare.

1.1. Aspecte generale privind procesul tehnologic de producere a cablurilor electrice

Echipamentul pentru producerea firelor și cablurilor electrice este format din diverse mașini specializate și unități instalate în conformitate cu tehnologia de producție în cauză. În scopul determinării componenței liniilor de producție, specificului acționării modulelor individuale, în acest capitol s-a realizat o prezentare generală a procesului tehnologic de fabricare a firelor electrice, cu o analiză detaliată a procesului de trefilare.

Ridicarea eficienței procesului tehnologic de producere a firelor electrice poate fi obținut prin eficientizarea fiecărei etape de prelucrare a materiei prime.

Principalele procese tehnologice la producerea cablurilor electrice sunt: *trefilarea, recoacerea, răsucirea, extrudarea izolației și mantalei și bronarea.*

Legătura dintre principalele etape ale procesului tehnologic de producere a firelor și cablurilor electrice sunt reprezentate în figura.1.1. Prețul de producere și calitatea produsului finit depinde într-o măsură mai mare sau mai mică de etapele parcurse de materia primă pe parcursul întregului proces tehnologic.

În ultimii ani se tinde spre ridicarea capacității de producție a firelor și cablurilor electrice prin legarea într-un flux continuu de producere a principalelor procese tehnologice *de trefilare, recoacere, izolare, împachetare*, precum și prin implementarea tehnologiilor moderne de control

adaptive a *mecanismelor de bobinare, tragere și compensare* acționate de motoare asincrone cu convertoare de frecvență [12]. Cu regret, însă, marea majoritate a utilajului este din import și destul de scump. Utilajul pe care și-l permit companiile din Republica Moldova este mai ieftin și, respectiv, de o calitate inferioară și cu un nivel scăzut de automatizare, fapt care creează probleme la exploatare.

Cercetările care se referă la implementarea acționărilor cu motor asincron la mecanismele de tragere și de bobinat sunt analizate în lucrările semnate de S.Rezvin, A. Carandaev, A. Radionov [13, 14, 15], care abordează principalele moduri de control ale forței și vitezei de bobinare cu acționări de curent alternativ cu convertoare de frecvență.

Procesul de trefilare este primul proces sub care este supus firul de cupru din lanțul procesului tehnologic de producere a firelor și cablurilor electrice.

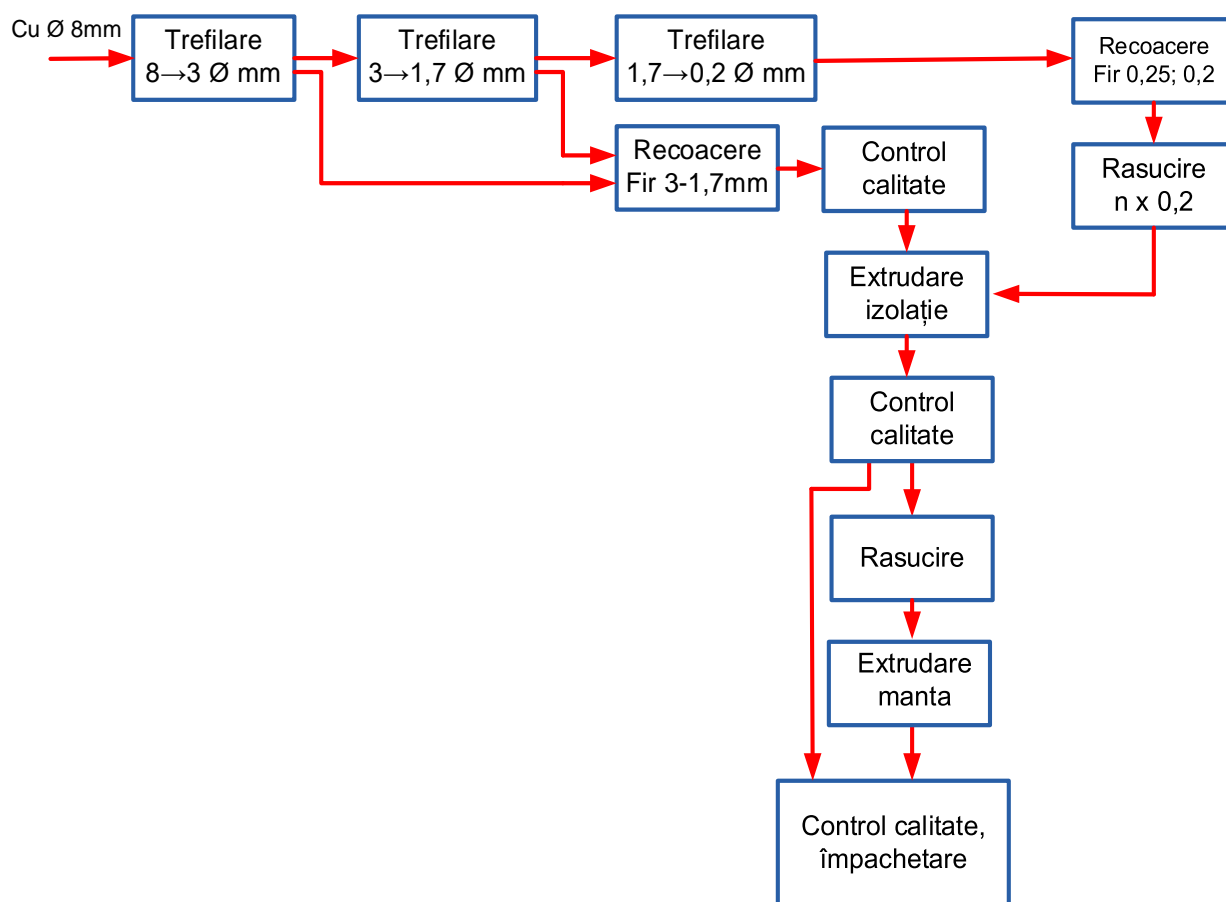


Figura 1.1. Etapele procesului tehnologic de producere a firelor și cablului electric

Analiza lanțului procesului tehnologic de producere a firelor și cablurilor electrice permite de a evidenția etapele principale cu un consum mare de energie.

În ANEXA A1 este descris în detalii procesul tehnologic de trefilare și etapele pe care le parcurge firul înainte și după trefilare.

1.2. Structura liniile de trefilare cu alunecare cercetate model *Listrong 17DC*

Linia de trefilare a firelor conține în mod obișnuit: *debobinatorul, sistemul de răcire cu emulsie, bobinatorul, mecanismul de aranjare a firului pe bobina și instalația de recoacere.*

Principalele componente ale SEM a liniei de trefilare sunt: motorul trefilorului, motorul de acționare a debobinatorului, motorul de acționare a bobinatorului și motorul de acționare a mecanismul de aranjare a firului.



Figura 1.2. Vedere generală a liniei tehnologice de trefilare medie cu instalație de tratare termică cu acțiune directă în flux continuu *Listrong 17DC+350T*

Motorul principal care acționează trefilorul funcționează la cuplu constant. Acționarea trebuie să asigure un cuplu mare de pornire și la viteză redusă.

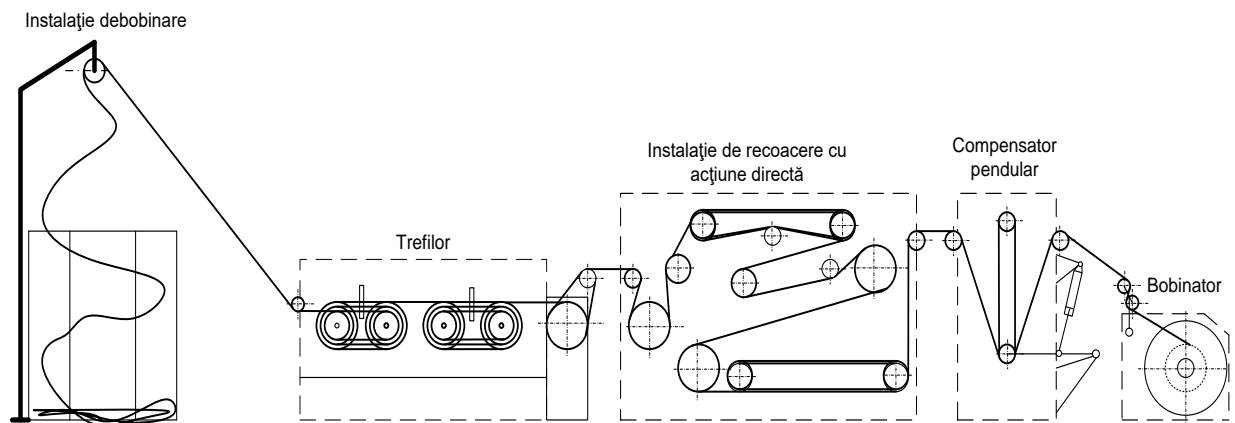


Figura 1.3. Traseul firului prin linia de trefilare

Instalațiile principale din componența liniei de trefilare:

Instalația de debobinare a firului: În ceea ce privește trimiterea firului de metal în trefilor, controlul acestei acționări nu impune cerințe mari de precizie față de întreaga legătură electromecanică între componentele liniei de trefilat.

La multe tipuri de linii de trefilare moderne controlul acționării debobinatorului este realizată de o mașină asincronă controlată vectorial, care funcționează în regimuri de accelerare-frânare, pentru a exclude influența momentului de inerție al bobinei cu fir supra firului care intră în trefilor. Dar la majoritatea liniilor de trefilare firul este preluat liber din ladă specială (Figura. 1.4).



Figura 1.4. Fir de cupru pregătit pentru etapa a doua de trefilare

Trefilorul: Procesul de trefilare a firelor este cea mai importantă etapă de lucru a liniei de trefilat. Trefilarea firelor se diversifică foarte mult în ceea ce privește diferitele produse metalice utilizate. Din puncte de vedere al dinamicii acționării electrice, caracteristic pentru procesul de trefilare este producerea acestuia la viteză și cuplu constant. Reglarea vitezei motorului de acționare are loc în buclă deschisă (fără buclă tehnologică).



Figura 1.5. Vederea generală a trefilurii cercetate

Instalația de tratarea termică (recoacerea) reprezintă etapa la care firul trefilat este prelucrat termic pentru a fi eliberat de tensiunile interioare ce apar în urma procesului de trefilare.

Tratarea termică poate fi realizată în mai multe moduri în funcție de proprietățile materialului prelucrat și proprietățile impuse produsului finit. Cea mai răspândită metodă este tratarea termică în flux continuu ceea ce presupune utilizarea unei instalații intermediare între trefilor și mecanismul de bobinat. Reglarea fluxului de putere la aceste instalații se produce în funcție de

viteza liniară a firului sau de instalația de recoacere cu acțiune directă (Figura.1.6) ori inducție (la puteri mici).



a)

b)

Figura 1.6. Instalație de recoacere a firului model 350T a); redresorul instalației de recoacere-b)

Instalația de bobinare: Viteza de lucru a bobinatorului (Figura.1.7) determină eficiența de fabricație a întregii linii de trefilare a firului. Această instalație reprezintă, de asemenea, mecanismul cel mai dificil de controlat în sistem.



Figura 1.7. Vedere generală a obiectului cercetat, compensator – bobinator.

În procesul de bobinare, SEM trebuie să asigure controlul sincron al vitezei liniare a bobinei în funcție de diametru, viteza liniară a firului la ieșirea din trefilor și controlul forței din fir.



a)

b)

Figura 1.8. Mecanismul de aranjare a firului pe bobină-a); Vederea generală a bobinatorului model WS630-b).

1.3. Structura actuală a sistemului de acționare a trefilorului cu convertizoare de frecvență

În figura 1.9 este reprezentată schema utilizată la acționarea trefilorului mediu din cadrul companiei Tehelctro-SV.

În sistemul dat ambele motoare de acționare sunt comandate vectorial, cu control de viteză. Prescrierea vitezei motorului care acționează trefilorul se realizează de către operator, de la pupitru, prin intermediul unui potențiomtru. Viteza motorului de acționare a bobinatorului este prescrisă de convertorul principal care acționează motorul trefilorului prin intermediul ieșirii analogice MO. Valoarea acestui semnal depinde de raportul de transmisie dintre viteza liniară a firului la ieșirea din trefilor și viteza liniară a firului la bobinator.

Ajustarea ulterioară a vitezei de bobinare a firului se realizează cu potențiomtrul conectat la intrarea analogică IS, care indică poziția brațului de compensare. De asemenea, se produce forța de tensionare din fir cu ajutorul unui piston cu aer comprimat. Acest semnal se utilizează ca semnal de corecție.

Frânarea liniei în regim de avarie, de exemplu, când firul la intrarea în trefilor s-a încălțit sau s-a rupt, precum și pentru excluderea ruperii acestuia în filiere sau în instalația de recoacere, trebuie efectuată în etape și anume: mai întâi este necesar să primească comanda de stop de avarie mecanismul de bobinat, concomitent cu instalația de prelucrare termică, ulterior, când bobinatorul practic și-a redus viteza la zero, să primească comanda și convertorul care acționează trefilorul. Astfel, se va exclude influența momentului de inerție al bobinei cu fir, respectiv, se va exclude ruperea firului în trefilor și în instalația de recoacere.

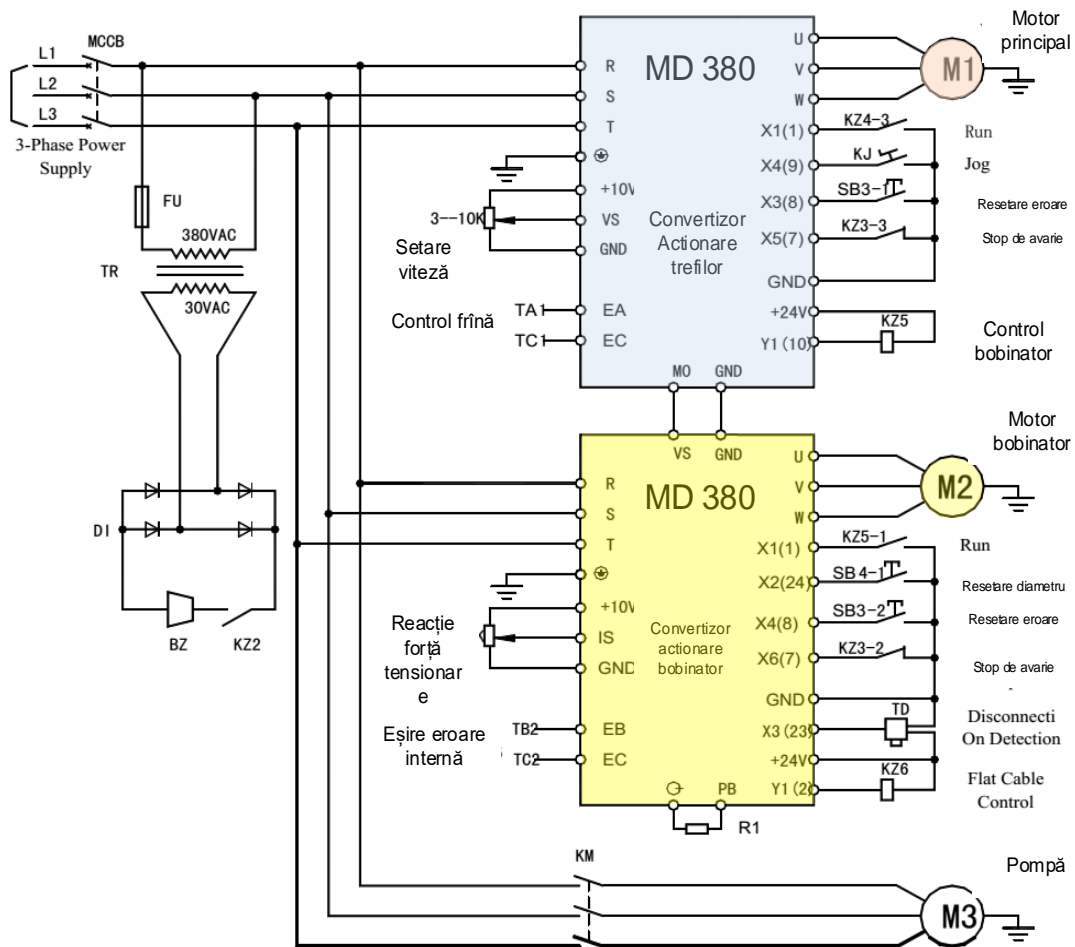


Figura 1.9. Schema de forță și comandă a liniei de trefilare cu convertoare de frecvență INOVANCE MD 380 [16, 17, 18]



Figura 1.10. Panoul de forță cu convertoarele de frecvență a trefilorului și bobinatorului

1.4. Aspecte teoretice privind principiul trefilării firelor

În Figura. 1.11. este prezentată schema de principiu a procedului de trefilare a firelor și de tragere a barelor de simetrie cilindrică (figura.1.11 a) în corespundere cu stările de tensiune și de deformare (figura.1.11 b).

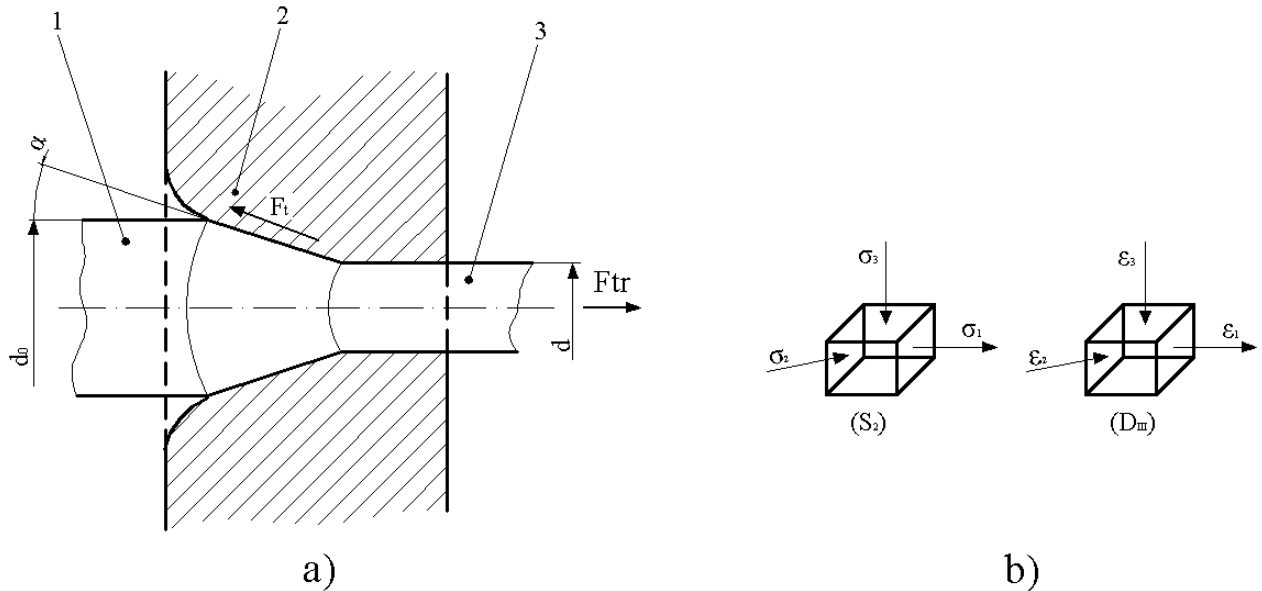


Figura 1.11. Procedul trefilării firelor și tragerii barelor:

a) schema de principiu: 1 – semifabricat; 2 – filieră (matriță); 3 – produs tras

b) starea de tensiune și de deformare la tragerea firelor/barelor cilindrice. [19, 20, 21,115,120]

În rezultatul analizei figurii 1.11 constatăm că tensiunile care conduc la deformarea plastică în procesele de tragere sunt: tensiunea principală σ_1 , pozitivă, dată de forța de tragere F_{tr} ; tensiunile principale $\sigma_2 = \sigma_3$, negative, date de reacțiunea sculei de deformare F și de forța de frecare F_f , care acționează pe direcția razei în cazul trefilării firelor și tragerii barelor. Relația între tensiunile principale este cea cunoscută din teoria deformării plastice în baza relației: $\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1$.

În cazul procesării firelor și barelor prin tragere, tensiunea longitudinală σ_1 crește continuu în zona de deformare, pe lungimea deschiderii conicității filierei sau matriței, figura. 1.12.

Creșterea tensiunii principale σ_1 este mult mai pronunțată decât creșterea rezistenței la deformare a materialului metalic (determinată, în special, de ecruisarea dobândită în procesul tragerii). În schimb tensiunea principală σ_2 , egală cu tensiunea σ_3 , scade continuu datorită reducerii de secțiune.

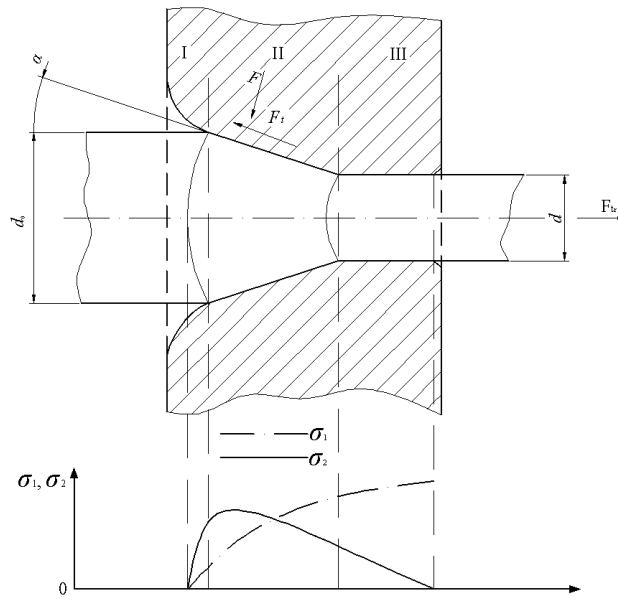


Figura 1.12. Variația tensiunilor principale σ_1 și $\sigma_{2(3)}$ în zona de deformare la trefilarea firelor și tragerea barelor. [19, 22, 119, 120]

În timpul procesului de trefilare metalul obține anumite forme, dimensiuni necesare și, de regulă, caracteristici specifice.

Schema principiului de trefilare este reprezentat în Figura 1.12. În baza analizei acesteia constatăm că la trecerea firului sau tijeii prin filieră, acesta se subțiază, lungimea firului sau tijeii se mărește, iar volumul metalului înainte și după trefilare rămâne constant [19, 20, 21, 22].

În acest context susținem că dacă însemnăm prin d_0, l_0, S_0 corespunzător diametrul, lungimea și aria suprafeței perpendiculare până la trefilare, iar prin d_n, l_n, S_n – diametrul, lungimea și aria secțiunii transversale după trefilare, atunci comprimarea relativă Q în procente va fi [23]:

$$Q = \frac{S_0 - S_n}{S_0} \cdot 100\% = \frac{d_0^2 - d_n^2}{d_0^2} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

Unde:

$$\mu = \frac{l_n}{l_0} = \frac{S_0}{S_n} = \frac{d_0^2}{d_n^2} \quad (1.2)$$

De aici, valoarea relativă a alungirii λ în procente este:

$$\lambda = \frac{l_n - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

Relațiile scrise mai sus sunt interdependente și asigură posibilitatea de trecut de la una la alta. Această legătură este întemeiată pe faptul că volumul este constant al metalului prelucrat se exprimă cu relațiile:

$$Q = \frac{d_0^2 - d_n^2}{d_0^2} = \frac{\lambda}{1 + \lambda} = \frac{\mu - 1}{\mu} \quad (1.4)$$

$$\lambda = \frac{d_0^2 - d_n^2}{d_n^2} = \frac{Q}{1-Q} = \mu - 1 \quad (1.5)$$

$$\mu = \frac{l_n}{l_0} = \frac{d_0^2}{d_n^2} = \frac{1}{1-Q} = \lambda + 1 \quad (1.6)$$

Coeficientul de întindere μ și analogicul lui, coeficientul de alungire, caracterizează mai exact gradul de deformare a metalului la trefilare decât valoarea relativă a comprimării Q , în deosebi, la deformări plastice esențiale. În practică, frecvent se utilizează valoarea relativă a comprimării.

În general, deosebim comprimări unitare – numai la o singură filieră și comprimarea totală – la toate filierele strungului.

Relația dintre deformarea totală Q , diametrul inițial d_0 , diametrul final d , valoarea medie unitară a deformării Q_{unmed} , și numărul de trageri n este calculată cu relația:

$$Q = \frac{d_0^2 - d_n^2}{d_0^2} = 1 - (1 - Q_{unmed})^2 \quad (1.7)$$

Forța, necesară pentru tragerea materialului prin filieră, se numește **forță de trefilare**. Valoarea forței de trefilare depinde de natura metalului, de starea canalului filierei, a emulsiei, valoarea coeficientului de comprimare, viteza de trefilare ect. Valoarea acestei forțe are o importanță practică deosebită.

Totodată, trebuie să constatăm că cu cât este mai dur materialul cu atât este mai mare forța de trefilare. Metalele curate și aliajele, cu o structură omogenă, se trefilează cu o forță mai mică. Calitatea suprafeței metalului trefilat depinde de forța de frecare, care influențează asupra forței de trefilare.

Asupra forței de trefilare influențează tipul materialului din care este confecționată filiera, forma geometrică și calitatea prelucrării canalului filierei. O rezistență mai mică la trefilare o au filierele cu canalul de formă conică și radială. Unghiul optimal al suprafeței de lucru a conului pentru diverse materiale este diferit și are valori între 6 și 16°. Odată cu mărirea zonei cilindrice a canalului și a coeficientului de comprimare unitar forța de trefilare crește. Utilizarea unei comprimări mai mici de 5-7% duce la ridicarea neomogenităților în proprietățile metalului în secțiune. O alegere corectă a lubrifianțului micșorează forța de frecare în filieră și respectiv, se micșorează și forța de trefilare. Emulsia folosită la trefilare trebuie să fie activă cu materialul filierei și cu materialul tras. Aceasta trebuie să formeze la suprafața filierei și metalului tras o peliculă care să cuprindă o parte din canalul filierei.

În literatura de specialitate este dovedit că o dată cu creșterea vitezei de trefilare forța de trefilare scade.

1.5. Forța și puterea necesară procesului de trefilare

Pentru o evaluare rapidă a forței în procesele de deformare plastică prin tragere, deseori, în practică se apelează la relații empirice de calcul.

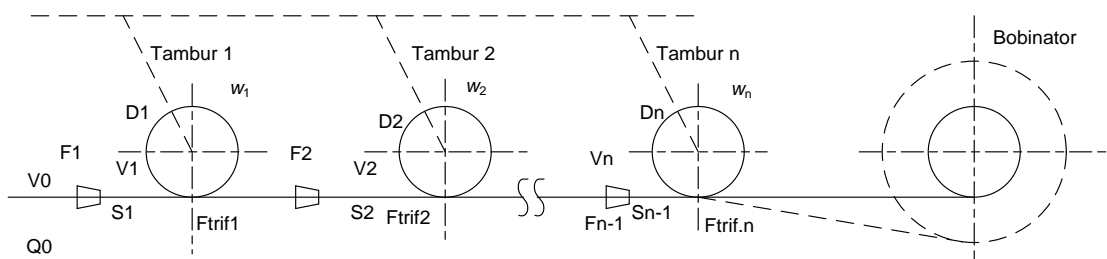


Figura 1.13. Schema cinematică de calcul a procesului de trefilare [18, 27]

Pentru trefilarea firelor și tragerea barelor de secțiune rotundă se poate utiliza relația lui Gavrilenco (1.8) sau a lui Perlin (1.9) [18,27]:

$$F_{tri} = \alpha_{cmi} \cdot s(\lambda_i - 1) \cdot S_i, \quad [daN] \quad (1.8)$$

$$F_{tri} = \alpha_{cmi} \cdot S_i \left[\ln \left(\frac{S_{i-1}}{S_i} \right) \right] (1 + \mu \cdot ctg \alpha), \quad [daN] \quad (1.9)$$

unde: S_i și S_{i-1} – secțiunile după și înainte de trecerea „ i ”;

α_{cmi} – media aritmetică pentru limita de curgere înainte și după trecere „ i ”;

s – expresia $s = (1 + \mu \cdot ctg \alpha)$,

unde: μ – coeficientul de frecare (de tip Coulomb);

α – semi unghiul deschiderii conicității filierei sau matriței;

λ_i – alungirea $\lambda_i = \frac{S_{i-1}}{S_i}$

δ_i – reducerea de secțiune, $\delta_i = 100 \left[1 - \left(\frac{1}{\lambda_i} \right) \right]$

k_1, k_2 și k_3 – parametrii definiți de următoarele relații:

$$k_1 = \frac{(tg \alpha + \mu)}{(1 - \mu \cdot tg \alpha) tg \alpha}; \quad k_2 = k_1 + \left(\frac{\mu}{tg \alpha} \right); \quad k_3 = k_1 - \alpha_1 \left(\frac{\mu}{tg \alpha} \right)$$

unde: $\alpha_1 = \frac{(D_i - 2g_i)}{(D_i - g_i)} = 0,89 \dots 0,90$;

D_i și g_i – diametrul și, respectiv, grosimea de perete după trecerea „ i ”.

Valorile pentru σ_{cmi} se consideră în $[daN/mm^2]$, pentru S_i și S_{1-i} în $[mm^2]$, iar α în grade.

Odată cu cunoașterea mărimii forței de tragere F_{tri} , determinată pe cale analitică sau pe cale experimentală, utilizând sonde tensometrice, putem determina lucrul mecanic util de deformare: (L_{di})

$$L_{di} = F_{tri} \cdot L, [daN \cdot m] \quad (1.10)$$

Unde: L_i – lungimea produsului procesat.

De asemenea, lucrul mecanic de deformare mai poate fi determinat și cu relația:

$$L_{di} = V_i \cdot \sigma_{cmi} \cdot \ln \frac{S_{i-1}}{S_i}, [daN \cdot m] \quad (1.11)$$

Totodată, dacă se ține seama de pierderile prin frecare exterioară la contactul metal-sculă (L_{fi}) și de pierderile interioare (L_i') putem determina lucrul mecanic total consumat în procesul tragerii:

$$L_{ti} = L_{di} + L_{fi} + L_i' = V_i \cdot \sigma_{cmi} \left\{ \ln \left(\frac{S_{i-1}}{S_i} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{\mu}{\alpha} \right) \right] + 0,77 \cdot \alpha \right\}, [daN \cdot m] \quad (1.12)$$

În aceste condiții putem calcula și puterea necesară în procesul de deformare plastică prin tragere (P_{ti}):

$$P_{ti} = \frac{L_{ti}}{t} = F_{tri} \cdot \frac{L_i}{t} = F_{tri} \cdot \frac{v}{102}; [kW] \quad (1.13)$$

- se consideră în – F_{tri} [daN];

- timpul în – t [s];

- viteza în – v_{tri} [m/s].

Puterea reală necesară în procesul tragerii (P_{tr}) se determină luându-se în considerare randamentul total al tragerii (η_t).

Randamentul total al tragerii este produsul dintre randamentul deformării ($\eta_d = 0,75 \dots 0,90$) și randamentul transmisiei utilajului de tras sau al mașinilor de trefilat ($\eta_{tr} = 0,85 \dots 0,95$).

$$P_{ti} = \frac{L_{ti}}{\eta_t} = F_{tri} \cdot \frac{v_{tri}}{102 \cdot \eta_t}; [kW] \quad (1.14)$$

Consumul specific de energie W_i pentru tragere se poate evalua cu ajutorul relației[124]:

$$W_i = \frac{P_{ti}}{P_s}; [kW / t] \quad (1.15)$$

în care P_s este producția specifică a utilajului de tras sau mașinilor de trefilat în $[t/h]$.

1.6. Influența vitezei asupra procesului de trefilare

Procesul de tragere/trefilare este un proces tehnologic complex și dependent de o serie de factori care țin de natura, compoziția și structura materialului, geometria, materialul și uzura sculelor de deformare, lubrifierea, temperatura și gradul de deformare, viteza de tragere etc. Factorii menționați influențează parametrii de forță ai tragerii, schema de lucru, uzura sculelor de deformare, calitatea și precizia dimensională a produselor finite obținute.

Din graficele prezentate în figura.1.14. se constată o scădere pronunțată a forței de tragere în intervalul 6÷50 [m/min] (viteze care, în general, nu se folosesc în practica industrială), ca ulterior diminuarea forței să fie mult mai redusă.

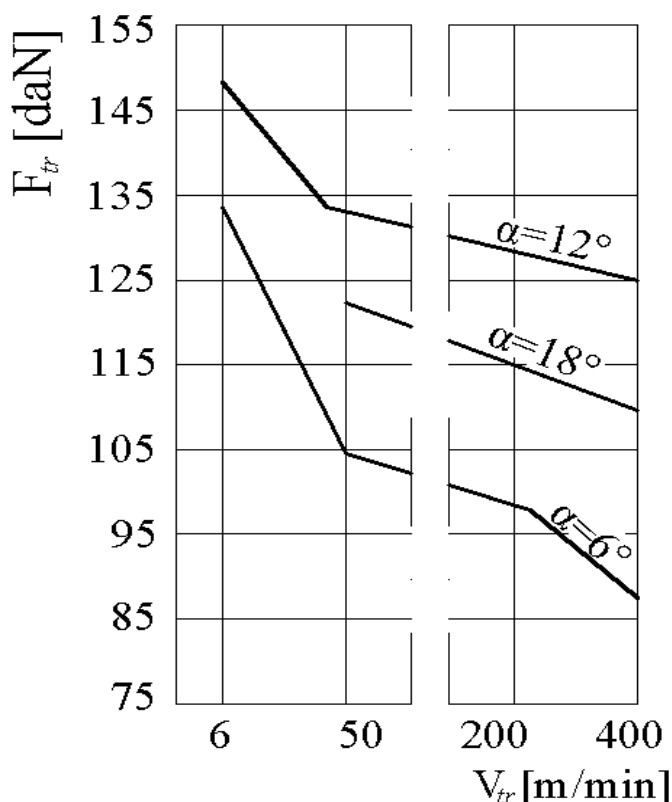


Figura 1.14. Dependența forței de trefilare în funcție de viteza de tragere și de unghiul α al deschiderii conicității filierei. [18, 19]

Diminuarea forței de tragere odată cu creșterea vitezei se explică, pe de o parte, printr-o lubrifiere mai bună în procesul tragerii și, pe de altă parte, prin creșterea temperaturii firului și a filierei. Lubrifierea se consideră mult mai bună la viteze mari de tragere, deoarece, odată, cu creșterea vitezei este antrenată și o cantitate mai mare de lubrifianț în conul de deformare al filierei. La viteze de tragere >200 [m/min], pentru produsele trase s-a constatat și o diminuare a numărului de îndoiri alternative și de răsuciri.

De asemenea, odată cu creșterea vitezei de tragere scade și raportul σ_{tr}/R_m , fig. 1.15. [19, 24]

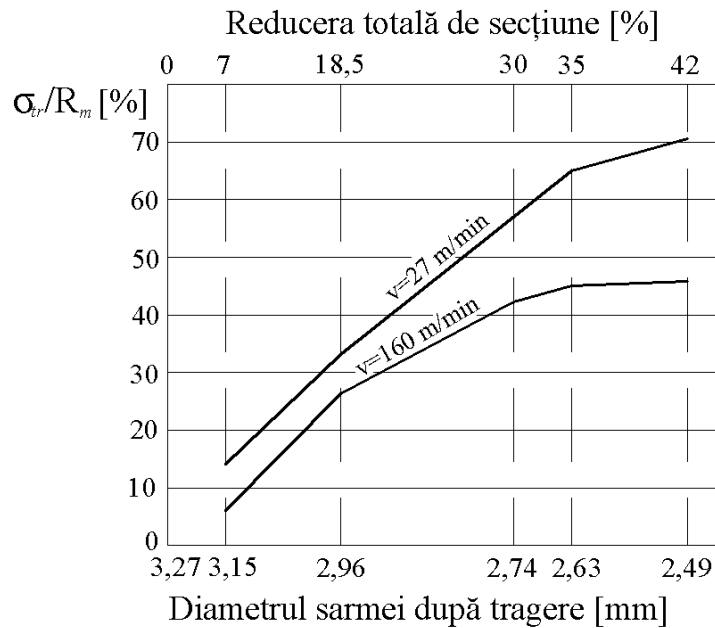


Figura 1.15. Variația raportului σ_{tr}/R_m în funcție de viteza de tragere și gradul de reducere a secțiunii pentru fire de oțel cu procent mic de carbon. [18, 19, 24, 29]

Luând în considerație efectul vitezei de tragere putem afirma că materialele metalice nu pot fi trefilate la viteze mici de tragere, fapt ce demonstrează că pot fi deformate la viteze mari de tragere.

Anume din aceste considerente, în practică, se caută metode de creșterea vitezei de tragere în scopul măririi productivității.

Viteza de tragere poate fi mărită numai dacă este asigurată o „rezervă” de plasticitate a metalului, calitate corespunzătoare a lubrifianului la vitezele și temperaturile de tragere realizate și scule de tragere corespunzătoare.

O altă metodă de eficientizare în câmp ultraacustic a procesului tehnologic de trefilare este descrisă în ANEXA A2.

1.7. Analiza metodelor moderne de control în acționări electrice de curent alternativ

Un sistem de acționare de înaltă performanță trebuie să aibă răspunsuri dinamice rapide pentru urmărirea comenzii de viteză și reglare la șocuri de cuplu, iar performanțele să fie cât mai puțin sensibile la modificarea parametrilor acționării. Teoriile moderne de control, dezvoltate pentru sisteme de reglare complexe, sunt, în prezent, aplicate pentru proiectarea și analiza reglatoarelor din sistemele de acționări electrice. Acest lucru este datorat unor cauze precum [2, 25, 26]:

- necesitatea impunerii unor cerințe tot mai puternice în ceea ce privește performanțele SEM industriale, precum și a creșterii complexității acestora;

- accesul din ce în ce mai facil la procesoare de calcul moderne, care permite implementarea strategiilor de control sofisticate cu timp de execuție redus și costuri acceptabile;
- posibilitatea utilizării unor surse de putere (convertoare electronice) și traductoare din ce în ce mai performante, ca urmare a dezvoltărilor tehnologice în domeniul componentelor electronice;
- teoriile moderne de control s-au orientat spre cerințele de aplicabilitate practică în sisteme industriale, permițând impunerea unor condiționări relative la variabilele fizice ale procesului (intrări, variabile de stare, ieșiri, perturbării, etc.). [27]

Tehnicile de control pot fi analizate și clasificate, utilizând trei sisteme de referință, după cum urmează:

Din punct de vedere al *structurii sistemului fizic* care urmează a fi reglat. Evoluția de la teoriile de control clasice la cele moderne înseamnă trecerea de la sisteme *mono variabilă, invariante în timp*, la sisteme *multe variabilă, variante în timp*, și care pot fi *liniare* sau *neliniare*. De asemenea, înseamnă trecerea de la analiza în *domeniul complex* la analiza în *domeniul timp - continuu* sau *discret*, bazată pe conceptul de *stare a sistemului*. Deci, în concluzie înseamnă trecerea de la utilizarea unor tehnici bazate pe *proceduri de încercare*, la tehnici bazate pe *controlul optimal* printr-o proiectare sistematică a reglatoarelor, ținând cont de *indici de performanță* impuși. În plus teoriile moderne de control permit proiectarea regulatorului pentru o *clasa de mărimi de intrare*, în locul unei singure *funcții de intrare*, precum și includerea în procesul de proiectare a unor *condiții inițiale*. Evoluția teoriilor moderne de control tind spre *controlul optimal*, atât pentru sisteme *deterministice*, cât și pentru sisteme *stohastice*. [2, 5, 33, 34, 35, 36, 37]

Utilizând ca referință *obiectivele controlului*, pot fi considerate două clase de obiective, și anume cele de *robustețe*, respectiv de *optimizare*. Prin obiectivele controlului se înțelege determinarea acelor intrări ale unui sistem fizic, încât, să se obțină scopurile dorite. Obiectivul de robustețe presupune *analiza sensibilității* sistemului de reglare și *analiza stabilității* acestuia. În aceasta clasă intră, în special, tehnicile de *control robuste* și metodele de *comanda și control adaptive*. Obiectivul de optimizare înseamnă realizarea unui *control optim* al procesului, din punctul de vedere al unuia sau mai multor *criterii*, cum ar fi: *precizia (acuratețea) răspunsului*, *timpul de răspuns*, *urmărirea unei traiectorii și reacții la perturbată*, etc. În aceasta clasă se regăsesc metodele cu *alocare poli-zero* și cu stabilirea unor *indecși de performanță min max* sau tehnici bazate pe *model de referință*.

Din punct de vedere al *funcției metodei de reglare* se poate considera o axa pe care să fie ordonate în raport cu creșterea complexității sistemului de reglare, pornind de la sistemele de comandă cele mai simple – cele în buclă deschisă – și încheind cu tehnicile de control inteligente.

O ordonare și clasificare precisă după acest criteriu este dificilă, datorită controverselor care există în literatura de specialitate, privind încadrarea unei metode de comandă și control în una sau alta dintre clase sau datorită combinării unor metode din clase diferite. Se consideră important cel puțin din unghiul de abordare al acestei lucrări, să prezentăm următoarea clasificare a metodelor de comandă și control pe o astfel de axa:

- 1) sisteme de comanda în buclă deschisă;
- 2) sisteme de comandă și control cu reacție (metode liniare, alocare poli-zero-uri, cu alunecare "sliding-mode", tehnici de zerorizare);
- 3) metode de comandă și control adaptive (cu cistig programabil, cu model de referință, cu reglatoare auto acordabile);
- 4) metode de comandă și control robuste (tehnici liniar-pătratică, tehnici bazate pe spațiile Hardy);
- 5) metode de control inteligent (tehnici repetitive cu învățare, cele bazate pe sisteme "fuzzy", cu rețele neurale, tehnici bazate pe algoritmi genetici).

Dintre tehnicile existente, cea mai utilizată rămâne, în continuare, cea bazată pe reglatoarele de tip P, PI și PID, care este ușor de implementat. Totuși, având un grad de libertate, nu poate asigura simultan performanțe ridicate, atât pentru reglarea de viteză, cât și pentru cel de cuplu. Din acest motiv, în lucrarea de față vom aborda două metode moderne de control pentru comanda unor sisteme de acționare cu mașini de curent alternativ, și anume, cu reglatoare robuste și cu reglatoare "fuzzy". Rezultatele obținute vor fi comparate cu rezultatele dobândite pentru aceleași sisteme de acționare, însă prin utilizarea reglatoarele de tip PID. [28, 29, 30, 31, 32, 33]

1.7.1. Utilizarea metodelor moderne de control în acționări electrice de curent alternativ de frecvență variabilă.

Ca beneficiar direct al dezvoltării teoriei comenzii și controlului, piața tehnologică actuală și, în special, automatizările industriale ocupă un loc important. Astfel, nevoia de integrare ușoară și precisă a elementului de execuție în procesul automatizat și-a găsit răspunsul adecvat în performanțele dinamice ale acționărilor de frecvență variabilă. [34, 35]

Acestea s-au impus datorită faptului că acționările cu mașini electrice reprezintă cea mai bună soluție în cel puțin două clase de aplicații:

- în acele cazuri unde o utilizare optimă și eficientă a energiei electrice este dorită, ceea ce se poate obține înlocuind procesele mari consumatoare de energie cu acționare, în general, la viteză constantă, cu sisteme de acționare de viteză reglabilă, utilizând mașinile de curent alternativ alimentate în tensiune și frecvență variabilă;

- datorită tendinței de integrare a elementului de execuție în sistemul de automatizare și a dinamicii superioare, tot mai multe sisteme de automatizare cu acționări hidraulice sau pneumatice sunt, în prezent, înlocuite de acționări electrice. Acestea asigură o viteză și precizie sporită de comandă, un raport putere/greutate superior precum și o robustețe mai mare.

Cele două clase de aplicații în care acționările electrice s-au impus, necesită strategii de comandă și control diferite. Aplicațiile cu acționări de viteză variabilă, în procese cu mult consum energetic, utilizează, în general, scheme de comandă scalare în buclă deschisă sau închisă, în timp ce aplicațiile care necesită performanțe dinamice înalte au scheme de comandă și control mai complexe, bazate pe controlul vectorial separat al cuplului electromagnetic, respectiv, al fluxului (inclusiv cu slăbire de flux pentru viteze suprasincrone). [2, 5, 30, 46, 47,123]

Controlul scalar oferă performanțe dinamice mai scăzute datorită dificultății proiectării optime a sistemului de reglare. Prin modificarea parametrilor mașinilor de curent alternativ, ca urmare a variației temperaturii și a fenomenului de saturație, răspunsul sistemului la diferite comenzi se deteriorează pe măsură ce ne depărtăm de punctul de operare pentru care sistemul de reglare a fost proiectat. În acest sens, s-a introdus metoda controlului scalar decuplat pentru a obține performanțe dinamice mai ridicate la aplicații cu precizie mai mare. Această metodă se bazează pe un control separat al fluxului respectiv al cuplului din motor, însă, necesită cunoașterea atât a curenților cât și a tensiunilor din mașina de curent alternativ.

Controlul vectorial este fundamentul pentru majoritatea sistemelor de acționare moderne și de înaltă performanță cu mașini de curent alternativ, permițând un control independent al cuplului respectiv al fluxului prin descompunerea fazorului de curent statoric în două componente perpendiculare, într-un sistem de referință legat rigid de fluxul de orientare. Pentru a utiliza metoda controlului vectorial este necesară măsurarea, calcularea sau estimarea, atât a amplitudinii, cât și a poziției fluxului de orientare. Utilizând acest model putem trata mașina de curent alternativ integrată în sistemul de comandă, ca pe o mașina de curent continuu și să aplicăm strategiile de comandă și control moderne, dezvoltate, în general, pe modele simple cu bucle de reglare independente.

1.7.2. Necesitatea și importanța reglajului vectorial pentru motoarele asincrone

Mult timp, motoarele de c.c. au reprezentat unica soluție pentru realizarea acționărilor electrice reglabile. Aceasta din două motive [2, 30, 48]:

- posibilitatea reglării separate a fluxului de excitație și a cuplului electromagnetic dezvoltat, prin intermediul curentului de excitație, respectiv al curentului prin indus. În mod normal,

cei doi curenți pot fi reglați independent, putându-se, astfel, obține simplu sisteme de acționare cu gamă mare de reglare;

- datorită principiului constructiv, cuplul electromagnetic, care este determinat, după cum se demonstra în continuare, de produsul vectorial dintre fluxul de excitație și curent, devine în cazul motoarelor de c.c. produs scalar. Aceasta, deoarece în cazul motoarelor de c.c., fluxul de excitație și curentul din indus sunt în permanență ortogonale. Mai mult chiar, ortogonalitatea celor două mărimi face ca, pentru aceleași valori ale fluxului și curentului, rezultatul produsului vectorial să fie maxim.

Motoarele de curent alternativ, (asincron și sincron) sunt superioare motorului de c.c. din punct de vedere al dimensiunilor, greutateii, inerției rotorului, randamentului, costului, fiabilității, cheltuielilor de exploatare, etc., mai ales, cel asincron cu rotor în scurtcircuit. De remarcat faptul că, motoarele sincrone cu magneți permanenți sunt caracterizate la ora actuală de cea mai mare densitate de putere (raport putere/greutate, putere/volum), ceea ce face să fie deosebit de atrăgătoare pentru aplicații de tipul celor din industria aeronautică. [36]

Aceste tipuri de motoare sunt, datorită avantajelor enumerate, cele care sunt practic „consacrate” în cazul aplicațiilor cu viteză constantă. Totuși, doar dezvoltările recente din domeniul acționărilor cu viteză variabilă au făcut posibilă aplicarea pe scară largă a acționărilor reglabile cu motoare de c.a.(asincron și sincron). Este vorba de două direcții de dezvoltare, aparent separate, dar care concurează la obținerea unor sisteme de acționare reglabile competitive, cu motoare de c.a.:

- sursele de tensiune și frecvență variabile;
- sistemele de reglare performante.

Din punctul de vedere al surselor de tensiune și frecvență variabile, strict necesare în cazul sistemelor de acționare reglabile, trebuie avute în vedere câteva aspecte. În primul rând, menționăm costul convertoarelor statice ce alimentează motoarele de c.a., care este mai mare decât al celor ce alimentează motoarele de c.c. Până nu demult, costul introducerii acționărilor cu viteză variabilă cu motoare de c.a. a fost restrâns. În plus, complexitatea controlului a determinat dezvoltarea dificilă a acestor tipuri de acționări. Din punctul de vedere al topologiilor (schemelor) convertoarelor statice, putem afirma că lucrurile s-au cristalizat în mare măsură, în perspective urmărindu-se îmbunătățirea calității energiei furnizate, prin tehnici de modulare perfecționate.

Dezvoltările continue în domeniul componentelor semiconductoare de putere cu care sunt realizate convertoarele statice, au condus la îmbunătățirea permanentă acestora, părând neîncetat elemente caracterizate de performanțe mai eficiente (viteze de comutație și curenți de conducție mari, tensiuni de blocare foarte mari, capacitate de blocare prin comandă). Ele sunt încapsulate, în

cazul ultimelor tipuri de elemente semiconductoare de putere, împreună cu circuitele de comandă și protecție, într-o formă modulară. [5, 37]

De asemenea, prețul accesibil al componentelor, a făcut ca problema sursei de tensiune și frecvență variabilă să nu mai reprezinte principalul obstacol în obținerea sistemelor de acționare variabile cu motoare de c.a., fiind disponibile azi surse care să furnizeze energie de calitate (conținut redus de armonici).

Din punctul de vedere al sistemelor de reglare automata a vitezei, trebuie avut în vedere o abordare diferită de cea din cazul motoarelor de c.c.

În cazul acestora, fluxul și curentul din circuitul indusului sunt decuplate (independente), iar ca urmare a ortogonalității dintre cele două mărimi (fluxul de excitație și curentul rotoric), au putut fi realizate scheme de reglare simple, pe deplin controlabile și cu bune performanțe dinamice.

În cazul motoarelor de c.a., însă, modelele matematice sunt mai dificile, fiind reprezentate de sisteme de ecuații complexe, de cele mai multe ori neliniare și cu parametri variabili. Sistemele de reglare trebuie să controleze tensiunea și frecvența statorică, care trebuie să fie corelate între ele. Mărimea controlată putând fi viteza rotorului, poziția acestuia, cuplul electromagnetic, fluxurile statoric, rotoric sau de magnetizare, curenții statoric, rotoric sau de magnetizare sau combinații ale acestora.

În cazul acestora, datorită interacțiunilor dinamice mult mai complexe, fluxul și solenația ne fiind staționare, ci mișcându-se cu diferite viteze, nu este posibilă simpla transpunere a schemelor de reglare clasice, cunoscute de la acționările cu motoare de c.c.

Dificultatea constă și în faptul că, spre exemplu, în cazul motorului asincron cu rotor în scurtcircuit alimentat de la convertor static, acesta din urmă trebuie să asigure motorului atât puterea activă cât și puterea reactivă necesară magnetizării, neexistând surse externe de excitație ca în cazul motorului sincron, de exemplu. Deci ambii curenți, de excitație (reactiv) și generator de cuplu(activ) trebuie să coexiste în fluxurile statorice ale motorului asincron.

Problema a putut fi depășită prin, așa numita, comandă vectorială, utilizând fazorii spațiali pentru modelarea motoarelor de c.a., structura complexa acestora putând fi transformată, astfel, într-una similară motorului de c.c., caracterizată de ortogonalitatea dintre flux și curent.

Reglajul vectorial constă, în primul rând, în obținerea unui model matematic al mașinilor de c.a. adecvat, iar controlul diferitelor comenzi să fie realizat în așa fel, încât, să fie menținută ortogonalitatea dintre flux și curentul activ. În consecință, cuplul electromagnetic dezvoltat de motor are în permanență o expresie de produs scalar, similar cuplului dezvoltat de motoarele de c.c. cu excitație separată și deci valoare maximă. Acesta este principiul pe care se bazează toate sistemele de reglare vectorială a vitezei motoarelor de c.a. este: de a controla diferitele comenzi,

încât, să fie menținută ortogonalitatea între fazorii fluxului și curentului activ, iar cuplul electromagnetic dezvoltat de motor având, astfel, o expresie similară celei a cuplului dezvoltat de motorul de c.c. cu excitație separată, respectiv, de produs scalar între flux și curent. Expresia cuplului electromagnetic poate fi scrisă în diferite sisteme de referință, solidare cu fluxul statoric, rotoric sau de magnetizare, rămânând similară celei a cuplului motorului de c.c. Acest fapt sugerează posibilitatea reglării cuplului motorului prin decuplarea componentelor activă și reactivă ale curenților statorici, generatoare de cuplu, respectiv de flux.

Implementarea comenzii vectoriale, orientate după fluxul statoric, rotoric sau de magnetizare, necesită informații despre fluxurile respective. Comanda se realizează într-un sistem de referință solidar cu fluxul respectiv, curenții statorici ortogonali fiind obținuți în sistemul de referință corespunzător. Astfel, componentele curentului statoric, în acel sistem de coordonate, sunt similare curenților de excitație și respectiv din indus, din cazul motorului de c.c.

Obținerea valorilor curenților statorici în sistemul fix de coordonate, solidar cu statorul (pentru elaborarea comenzii corespunzătoare a invertorului) se face printr-o simplă transformare de coordonate, în funcție de sistemul în care a fost elaborată comanda. Există variante de scheme de reglare pentru fiecare tip de comandă.

Datorită, însă, avantajelor practice de implementare, cel mai frecvent se utilizează comanda cu orientare după câmpul rotoric. [2, 3, 5, 30, 48, 51, 52]

Comanda cu orientare după câmpul statoric are dezavantajul necesității măsurării tensiunilor statorice, care în cazul invertoarelor cu modulație în durată (PWM), generalizate în practică datorită avantajelor pe care le prezintă, sunt foarte puternic distorsionate și dificil de măsurat.

În literatură de specialitate, de asemenea, sunt prezentate variante de comandă cu orientare după fluxul de magnetizare. Uneori pot fi utilizate combinat diferite modele de flux ale mașinii, utilizându-se și un model adaptiv al rotorului. Varietatea comenzilor vectoriale este foarte mare, indiferent de tipul orientării, există metode directe, cu măsurarea fluxului și indirecte, în care determinarea poziției și amplitudinii fluxului se realizează pe baza mărimilor măsurate (curent și, tensiuni). [38, 39, 40]

Metodele directe (comanda cu reacție de flux) au reprezentat prima abordare a comenzii vectoriale și utilizează măsurarea directă mărimilor specifice (cu sonde Hall, inductivități de măsură), dar au fost abandonate datorită dezavantajelor pe care le prezintă:

- sondele Hall, montate ortogonal, măsoară semnale puternic distorsionate datorită efectelor creștăturilor rotorice și sunt solicitate mecanic și termic. Metoda necesită motoare de construcție specială;

- bobinele de măsură elimină efectele creștăturilor rotorice prin mediere geometrică, însă sunt necesare motoare speciale. Totuși, cel mai mare dezavantaj îl constituie faptul că bobinele de măsură sesizează variațiile fluxului, ceea ce determină o comportare slabă la frecvențe mici;
- utilizarea înfășurărilor statorice ca bobine de măsură elimină necesitatea unor motoare speciale, dar acest avantaj este diminuat de necesitatea compensării căderii de tensiune rezistive înainte de integrare.

Totodată, datorită faptului că rezistența statorică se modifică semnificativ în funcție de temperatură, acest fapt limitează viteza inferioară realizabilă. [4, 51, 56]

Metodele indirecte de comandă se bazează pe determinarea amplitudinii și poziției fazorului fluxului din așa-numitul, model al fluxului. Aceste metode, în pofida sensibilității la variația parametrilor mașinii și a necesității traductorului de viteză precis și costisitor, are cea mai mare aplicabilitate datorită faptului că nu necesită traductoare de câmp (deci motoare speciale) și celorlalte avantaje majore. [41, 42]

Avantajele constau în necesitate semnalelor măsurate de reacție pentru doi curenți statorici și viteză, celelalte semnale de reacție fiind calculate în timp real din modelul "în curent" al motorului. Aceasta înseamnă că parametrii statorului nu afectează modelul, deoarece curenții statorici sunt mășurați. În cazul motorului asincron, singurul parametru important al mașinii care se poate modifica este constanta de timp rotorică T_r care crește în domeniul de viteză mare (scăderea fluxului), datorită desaturației mașinii și scade cu creșterea rezistenței, la temperaturi mari. Gradul de saturație al mașinii se poate modifica rapid, dar se poate compensa bine în buclă deschisă, utilizând măsurători realizate în procesul de punerea la punct al acționării, iar efectul temperaturii este lent și poate fi corectat prin adaptare în timp real. [43, 44, 45, 46]

Din acest motiv, vor fi prezentate cu preponderență metodele indirecte de reglare vectorială a vitezei motoarelor de c.a. Acesta se explică prin faptul că, deși, metodele date necesită calcularea mărimilor de reacție, existența microprocesoarelor (ieftine și competitive), dar, în special, a procesoarelor digitale de semnal (DSP), care permit implementarea funcțiilor de control complexe specifice motoarelor de c.a., prin utilizarea mijloacelor de software în locul celor de hardware, scumpe, au permis proiectarea unor scheme de comandă din ce în ce mai sofisticate, dar cu performanțe deosebite. Toate tipurile de comandă cu orientare după câmp prezintă variante diferite în funcție de tipul inverterului care alimentează motorul:

- inverter de tensiune;
- inverter de curent;
- cicloconvertor (curenții sunt puțin distorsionați).

Marea diversitate a variantelor de comandă cu orientare după câmp este ilustrată în figura 1.16.

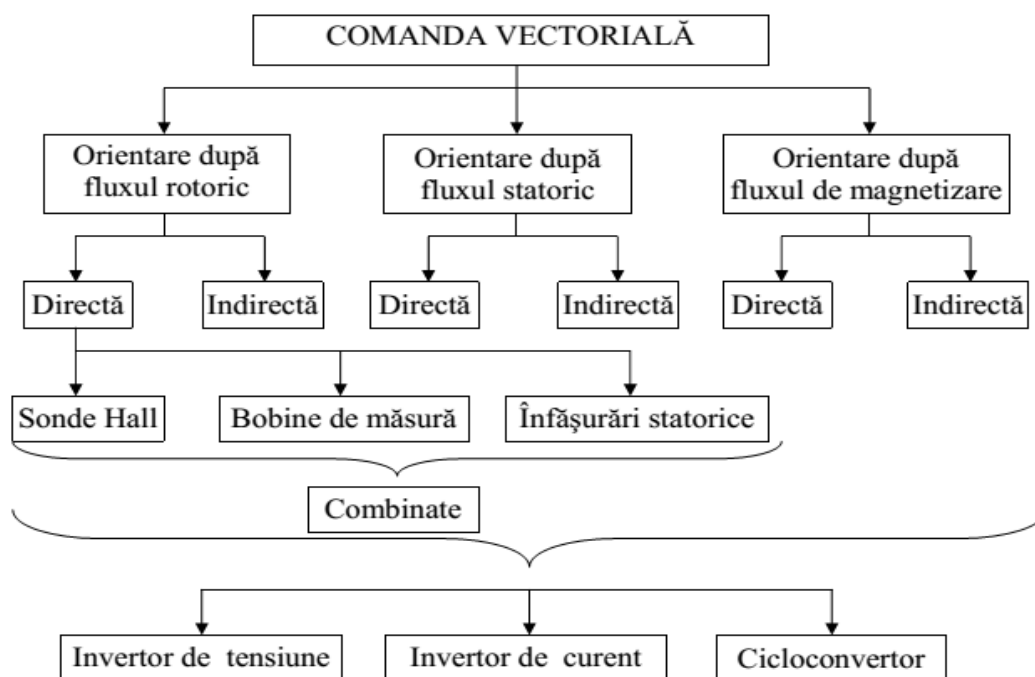


Figura 1.16. Tipuri de comenzi vectoriale [2, 47]

1.8. Necesitatea reglării vitezei procesului tehnologic de trefilare

Viteza de tragere este un parametru tehnologic deosebit de important, deoarece definește productivitatea procedurii de trefilare.

Odată cu creșterea vitezei de trefilare, în funcție de tipul strungului, traseului prin care trece firul prin filiere și tipul materialului din care este firul poate crește forța de trefilare, temperatura firului trefilat, precum și se schimbă condițiile de ungere a filierelor cu emulsie și scade rezistența la deformare a firului în filieră. Acești factori în complex influențează stabilitatea procesului tehnologic de trefilare. [19, 23, 27, 28, 62]

La anumiți parametri tehnologici impuși totdeauna există un maximum al vitezei procesului tehnologic, la depășirea acestuia procesul de trefilare devine instabil, care are drept rezultat ruperea firului. Totodată, cu cât materialul din care este confecționat firul este mai dur cu atât maximum de viteză este mai jos. Factorii tehnici ai vitezei de trefilare sunt determinați de parametrii echipamentului mecanic și electric al trefilului, puterea motoarelor electrice, SEM, construcția transmisie și caracteristicile de rezistență ale filierelor.

Alți factori care influențează procesul sunt cei economici, care includ salariile angajaților întreprinderii, costul energiei electrice și amortizarea echipamentului. Iar factorul rezultat este prețul de producere produsului. În ultima perioadă un factor destul de important este cererea pe piață a produsului.

Odată cu creșterea vitezei de trefilare la strung crește și productivitatea muncii și scade cota salarială pe o unitate de producție. Cheltuielile la energie electrică sunt practic proporționale cu productivitatea, considerent din care cheltuielile de energie electrică la o tonă de fir trefilată sunt constante. La majorarea vitezei de trefilare crește uzura liniei de trefilare și, respectiv, cresc cheltuielile de amortizare. Trebuie însă, să menționăm că în calculele economice rata cheltuielilor de amortizare nu depinde de productivitate și, respectiv, odată cu creșterea productivității cheltuielile de amortizare vor scădea. Respectiv, odată cu creșterea vitezei de trefilare pentru orice fel de strung de trefilare la prelucrarea unui tip de fir, la anumită secțiune, va avea drept rezultat scăderea prețului produsului finit.

Din factorii enumerați mai sus, constatăm că estimarea vitezei maxime se determină complicat. Maximul tehnologic al liniei de trefilare se determină în baza mai multor experimente. Considerent din care viteza optimală de funcționare se alege în baza analizei funcționării liniilor ce se află în exploatare și, respectiv, în dependență de cerințele față de produsul obținut la linia dată.

Pentru îndeplinirea cerințelor tehnologice și economice acționarea liniei de trefilare cu alunecare trebuie să asigure accelerare lină și frânarea, iar la regimurile de funcționare prestabilite să asigure eficiență maximă și fiabilitate.

Reieșind din cerințele înaintate: fiabilitate, reglare lină la accelerare și frânare, la moment, le poate asigura sistemul de acționare *Motor asincron-convertor de frecvență*.

1.9. Particularități și probleme principale în exploatarea SEM la liniile de trefilare

Procesul tehnologic de trefilare groasă, medie și fină rezultă din următoarele regimuri de funcționare a trefilorului și bobinatorului:

- montarea bobinei goale în mecanismul de bobinat cu acționarea trefilorului și bobinatorului oprite;
- agățarea firului pe bobină în regim de jog și controlul separat al acționării mecanismului de bobinat;
- setarea valorii prescrise a forței de tensionare din fir la viteza lineară de trefilare egală cu zero și controlul concomitent al trefilorului și bobinatorului (regim control de viteză);
- pornirea lină a liniei de trefilare până la viteza nominală;
- regimul de lucru al trefilorului cu bobinarea firului pe bobină de o lungime prescrisă de operator;
- oprirea trefilorului cu frânare lină la comanda contorului de lungime a firului trefilat, apoi tăierea firului și schimbarea bobinei.

La bobinatoarele cu bobine duble nu este necesară oprirea liniei de trefilare pentru a schimba bobina, dar cu toate acestea tipurile date de bobinatoare nu au găsit o răspândire largă în industrie din cauza complexității lor și a fiabilității scăzute.

În afară de regimurile principale de funcționare mai sunt utilizate și alte regimuri cum ar fi:

- Oprirea liniei pentru schimbarea bobinei goale de la mecanismul de desfășurare a firului și montarea unei bobine pline cu fir, sudarea firului de pe bobină cu firul din linie;
- Oprirea liniei pentru schimbarea cursei de trefilare, care constă în ascuțirea firului la capăt și tragerea acestuia prin fiecare filieră în regim de jogging – funcționează acționarea trefilorului cu posibilitatea de a controla separat acționarea trefilorului și a mecanismului de bobinat.
- Oprirea de avarie a liniei în caz de rupere a firului între trefilor și bobinator, sau dacă firul s-a încălzit la intrarea în trefilor sau la deschiderea ușilor de protecție a trefilorului sau a bobinatorului, sau la comanda operatorului.

***Problema principală** este că în procesul de bobinare a firului se mărește raza bobinei, momentul de inerție a bobinatorului, se schimbă frecvența proprie de oscilație a **sistemului trefilor- bobinator**, crește temperatura motoarelor de acționare ceea ce duce la următoarele consecințe:*

- ***oscilații a brațului compensator în tipul funcționării;***
- ***ruperea firului în instalația de recoacere;***
- ***micșorarea în secțiune a firului (crește prea mult forța din fir la bobinare);***
- ***crește rebutul;***
- ***viteze liniare de funcționare mici;***
- ***dificultăți la pornirea și oprirea liniei de trefilare.***

Durata procesului de trefilare la viteza nominală depinde de lungimea prescrisă de operator a firului care este trefilat, iar timpul de staționare depinde atât de regimurile de bază cât și de regimurile auxiliare.

1.10. Cerințele principale înaintate SEM a liniei de trefilare la etapa de modernizare

În baza celor expuse mai sus și luând în calcul și alte abordări în literatura de specialitate referitor la SEM a trefiloarelor groase medii și fine, către SEM a trefiloarelor se înaintează următoarele cerințe [48, 49, 50, 51, 52]:

- Menținerea exactă a vitezei de trefilare prescrise în regimuri statice și dinamice cu o eroare nu mai mare de 5%;
- Diapazonul de reglare a vitezei de trefilare să nu fie mai mic de 20:1;
- Asigurarea accelerării și frânării lineare fără șocuri;
- Asigurarea regimului de Jog cu o viteză până la 30% din cea nominală;
- Asigurarea frânării în regim de lucru nominal la coborârea vitezei de lucru, la acționarea butonului STOP sau la comanda contorului de lungime a firului bobinat;
- Asigurarea frânării de avarie a trefilorului utilizând rezistor de frânare din circuitul de curent continuu a convertorului;
- Asigurarea regimului de funcționare comun *Trefilor- bobinator*, cât și separat;
- Compensarea oscilațiilor care apar în fir în zona dintre trefilor și bobinator;
- Asigurarea regimului de START a liniei după ce a fost pornită pompa de emulsie și aer comprimat, toate ușile de protecție au fost închise și crearea forței de tensionare prescrise din fir de către bobinator la pornire.

1.11. Concluzii la capitolul 1

1. Performanțele sistemului electromecanic a trefilorului și a bobinatorului și problemele legate de reglarea vitezei trefilorului, sunt determinate de caracteristicile mecanice neliniare a liniei de trefilare. În urma celor analizate s-a constatat că SEM a liniei de trefilare existent nu asigura viteza maximă de funcționare de 1200(m/min) fără regulator în bucla tehnologică.
2. Factorii tehnologici principali care limitează viteza liniară de trefilare sunt: diametrul firului trefilat și puterea instalației de recoacere.
3. Factorii care se referă la construcția sistemului electromecanic al trefilorului nu limitează viteza, iar cheltuielile economice pentru fabricarea unei tone de producție sunt cauzate de pierderilor mecanice în filiere, prin alunecarea firului în raport cu tambururile de tracțiune și scad odată cu creșterea vitezei de trefilare.

În scopul majorării productivității trefiloarelor și reducerea rebutului prin implementarea unui sistem de acționare cu convertor de frecvență și motor asincron la trefiloare și la mecanismele de bobinat trebuie de rezolvat următoarele probleme:

- ✓ Elaborarea concepțiilor de cercetare și proiectare a SEM cu MA și Convertor de frecvență pentru sistemele electromecanice cu caracteristici mecanice neliniare;
- ✓ Cercetarea cu modele matematice funcționarea și dezvoltarea unui sistem de reglare vectorial pentru SEM cu MA și convertor de frecvență luând în calcul buclele de reglare

a fluxului, vitezei, curentului activ, analiza caracteristicilor amplitudine-fază a sistemului pentru determinarea stabilității acestuia cu ajutorul funcțiilor de transfer;

- ✓ Cercetarea prin modelare și elaborarea SEM a trefilorului și a mecanismului de bobinat luând în calcul perturbațiile care apar în fir și a variației momentului de inerție a bobinatorului;
- ✓ Elaborarea modelelor Simulink cu diferite tipuri de regulatoare și simularea acestora pentru indentificarea regulatorului care asigură parametrii optimi ai SEM al bobinatorului;
- ✓ Analiza rezultatelor privind productivitatea liniei de trefilare și efectul economic al modernizării.

2. OPTIMIZAREA SISTEMULUI ELECTROMECHANIC AL LINIEI DE TREFILARE

2.1. Formularea obiectivelor privind optimizare SEM al liniei de trefilare

Scopul principal al acestui capitol este descrierea matematică și elaborarea calculului de optimizare a bobinatorului.

Obiectivele propuse pentru a fi realizate în acest capitol sunt:

- calculul caracteristicilor mecanice ale trefilorului;
- identificare modelelor matematice care descriu procesul de bobinare;
- elaborarea modelului matematic al bobinatorului și al compensatorului pendular;
- calculul de optimizare al sistemului de reglare al bobinatorului;
- identificarea soluțiilor și implementarea acestora pentru eficientizarea SEM al bobinatorului.
- analiza stabilității sistemului de reglare al forței din fir.

Cerințele principale impuse sistemului de control liniei de trefilare sunt:

- reglaj fin al vitezei;
- controlul forței din fir la bobinare;

În scopul asigurării cerințelor înaintate către sistemul de control al liniei de trefilare se propune următoarea schema funcțională care este prezentată în figura 2.1

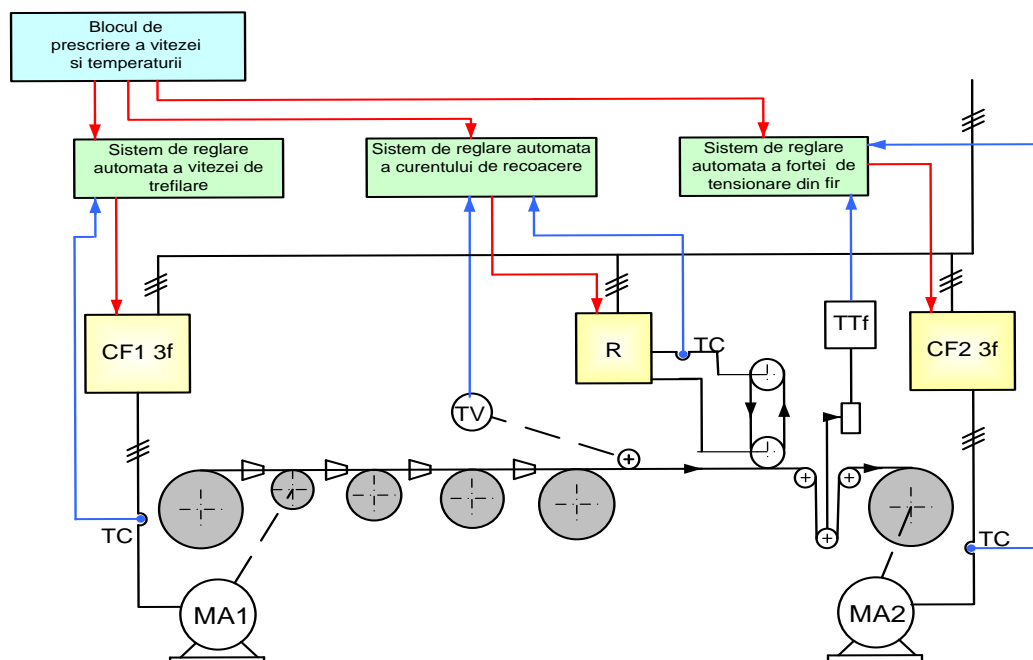


Figura 2.1 Schema bloc a părții de forță și comandă a trefilorului cu modul de recoacere prin scurt circuit [48,50]

2.2. Caracteristica mecanică a trefilorului și mecanismului de bobinat

2.2.1. Caracteristica mecanică a trefilorului

Parametrii importanți întru realizarea unei alegere corecte a puterii motorului de acționare a trefilorului și a convertorului de frecvență sunt momentul total de inerție al AE (acționării electrice), caracteristica mecanică a mecanismului și dependența momentului static de rezistență a mecanismului de viteza unghiulară a motorului. La baza metodologiei de calcul sunt relațiile care descriu AE ca un sistem cu o singură masă cu moment de inerție constant în regimuri dinamice de accelerare și frânare.

$$\left. \begin{aligned} J_{\Sigma} \frac{d\omega_P}{dt} &= M_p(t) - M_R(\omega) \\ J_{\Sigma} \frac{d\omega_F}{dt} &= -M_F(t) + M_R(\omega) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Unde: J_{Σ} – momentul de inerție total al AE raportat la arborele motorului ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);

$M_p(t)$ și $M_F(t)$ – momentul electromagnetic al motorului la accelerare și la frânare, ($\text{N}\cdot\text{m}$);

$M_R(\omega)$ – caracteristica mecanică a mașinii de lucru.

În sistemul 2.1 este prevăzut că la frânare ($d\omega_F/dt$) se obține valoare pozitivă dacă valoarea vitezei unghiulare ω_F este pozitivă. În acest caz, în regim de frânare, este suficient de îndeplinit condiția $M_F(t) < M_R(\omega)$.

În cazul valorilor prescrise a intensității accelerării și frânării calculul parametrilor prescriși se efectuează cu următoarele relații:

$$\left. \begin{aligned} J_{\Sigma} &= (M_p(\omega) - M_F(\omega)) / (\dot{\omega}_P + \dot{\omega}_F) \\ M_R(\omega) &= (M_p(\omega) + M_F(\omega) - J_{\Sigma}(\dot{\omega}_P + \dot{\omega}_F)) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Unde: $M_p(\omega)$, $M_F(\omega)$ – valorile cuplului electromagnetic al motorului la valoarea vitezei unghiulare ω .

Relațiile (2.2) se simplifică dacă rata de accelerare și frânare sunt egale ($d\omega_P/dt = d\omega_F/dt$)

$$\left. \begin{aligned} J_{\Sigma} &= (M_p(\omega) - M_F(\omega)) / (2\dot{\omega}_P) \\ M_R(\omega) &= (M_p(\omega) + M_F(\omega)) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

În unele sisteme (acționarea bobinatoarelor) regimurile de accelerare și frânare pot fi controlate de la o sursă de cuplu reglabilă, când în procesul de control al acționării prin intermediul

sistemului de reglare se tinde menținerea cuplului electromagnetic al motorului la valoarea prescrisă. În acest caz calculul parametrilor se realizează cu relațiile:

$$\left. \begin{aligned} J_{\Sigma} &= (M_p - M_F) / (\dot{\omega}_P(\omega) + \dot{\omega}_F(\omega)) \\ M_R(\omega) &= (M_p + M_F - J_{\Sigma}(\dot{\omega}_P(\omega) + \dot{\omega}_F(\omega))) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Unde: $\dot{\omega}_P(\omega)$, $\dot{\omega}_F(\omega)$ – intensitatea accelerării și frânării motorului la valoarea vitezei unghiulare ω și cuplu constant al motorului.

Relațiile (2.5) se simplifică dacă cuplul de pornire și frânare în modul sunt egale ($M_P = -M_F$)

$$\left. \begin{aligned} J_{\Sigma} &= (2M_p) / (\dot{\omega}_P(\omega) + \dot{\omega}_F(\omega)) \\ M_R(\omega) &= M_p (\dot{\omega}_P(\omega) - \dot{\omega}_F(\omega)) / (\dot{\omega}_P(\omega) + \dot{\omega}_F(\omega)) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

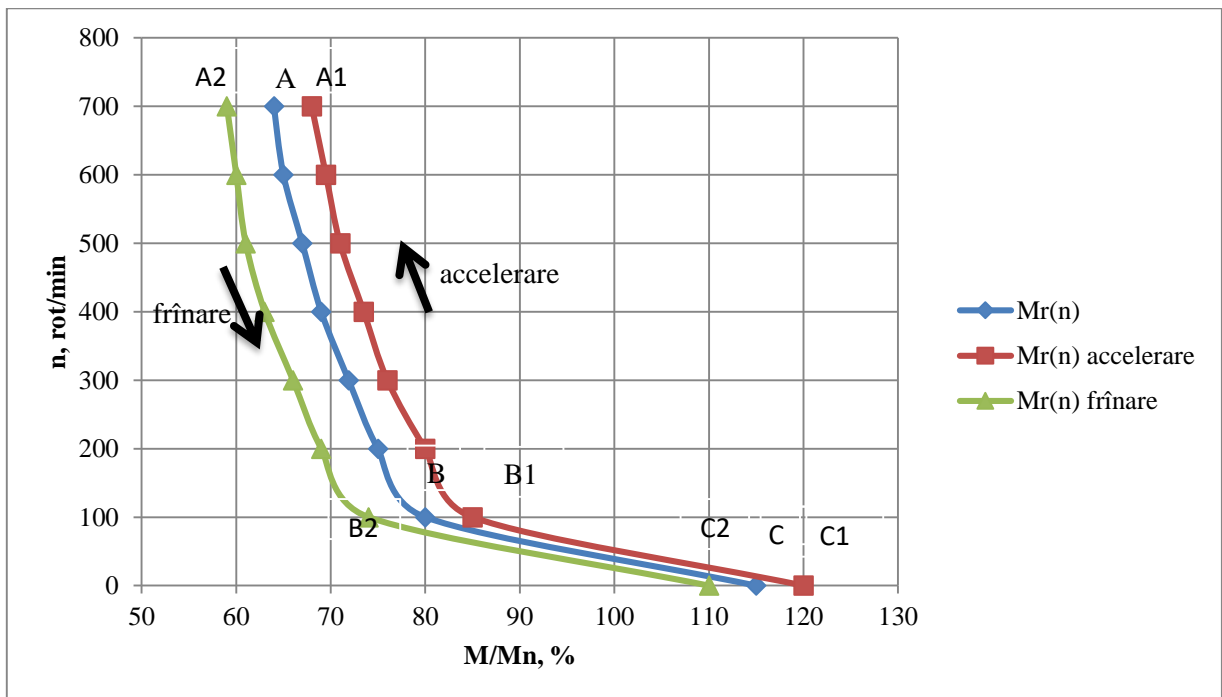


Figura 2.2. Caracteristica mecanică a unui strung de trefilare medie cu alunecare

Metodologia de determinare a J_{Σ} și $M_R(\omega)$ se rezumă la următoarele:

- a. Cu ajutorul unei plăci de achiziții de date și a convertorului de frecvență, care este componentă a acționării, se înregistrează procesele tranzitorii ale cuplului electromagnetic $M(t)$ și a vitezei unghiulare $\omega(t)$ la accelerare și frânare.

- b. La utilizarea unui element de prescriere al accelerării și frânării, în axele M, ω se construiește $M_p(\omega)$ și $M_F(\omega)$ și cu relațiile (2.1) sau (2.2) pentru vitezele unghiulare date se determină J_Σ și $M_R(\omega)$;

Metodologia dată poate fi aplicată în practică. În Figura.2.2 sunt aduse caracteristicile mecanice $M / Mn = f(n)$ a unui strung mediu de trefilare cu alunecare care trefilează fir de oțel cu conținut de carbon ridicat.

În regim de pornire când strungul este încărcat cu fir se înregistrează valorile $M(t)$ și $n(t)$ curba (A1, B1, C1) și la frânare (A2, B2, C2) realizându-se comanda prin intermediul unui element de prescriere a intensității accelerării și frânării. Cu ajutorul relațiilor (2.5) se calculează $M_R(n)$ și J_Σ .

Obținerea dependenței $M_R(n)$ pentru strunguri de trefilat ne demonstrează existența unui cuplu de rezistență la pornire care poate ajunge la 120% în raport cu cuplul nominal (porțiunea BC Figura. 2.2).

Aceasta se explică prin lipsa contra tensionării și insuficiența emulsiei în filiere la viteze mici.

Porțiunile înclinate ale caracteristicilor AB scăderea cuplului odată cu creșterea vitezei se explică prin îmbunătățirea condițiilor de ungere a filierelor, scăderea forței de trefilare și creșterea forței de frecare între tambururi și firul prelucrat. Dependențele obținute pot fi utilizate la alegerea puterii convertorului, puterii motorului de acționare și pentru determinarea vitezei optime de trefilare care va asigura un consum minim de energie și o productivitate maximă a strungului.

Metodica dată poate fi ușor utilizată în determinarea parametrilor $M_R(n)$ și J_Σ și poate fi aplicată în sistemele de acționare cu convertor de frecvență și motor asincron.

2.2.2. Caracteristicile mecanice ale bobinatorului

Schema cinematică a MB (mecanismului de bobinare) este reprezentată în Figura.2.3 care conține motorul de acționare M, două roți de curea Rc1 și Rc2, reductorul R, tamburul de tracțiune și bobina cu firul bobinat.

În schemă sunt utilizate următoarele notații: M și M_b – cuplul electromagnetic dezvoltat de motor și cuplul de sarcină la bobinare, N_m ; ΔM_m , ΔM_c , ΔM_{bob} – respectiv, cuplu de pierderi în motor, cuplu de pierderi în transmisia prin curea și cuplu de pierderi în lagărele bobinatorului N_m ; ω_m , ω_{bob} , ω_t – viteza unghiulară a motorului, a bobinei și a tamburului (1/s); J_m , J_{bob} , J_{fir} – momentul de inerție a motorului, bobinei și firului bobinat ($kg \cdot m^2$); D_{bob} , $D_{bob,max.}$, $R_{bob}(t)$ – diametrul bobinei, diametrul bobinei maxim și variația razei bobinei (m); L_H , X_b – distanțele AB și BC în plan orizontal (m); V_t , V_{bob} , V_{ar} – vitezele liniare a tamburului de ieșire, bobinei și a mecanismului

de aranjare (m/s); T_b – forța de tensionare la bobinare (N); i_c , i_R – rapoartele de transmisie a transmisiei prin curea și a reductorului.

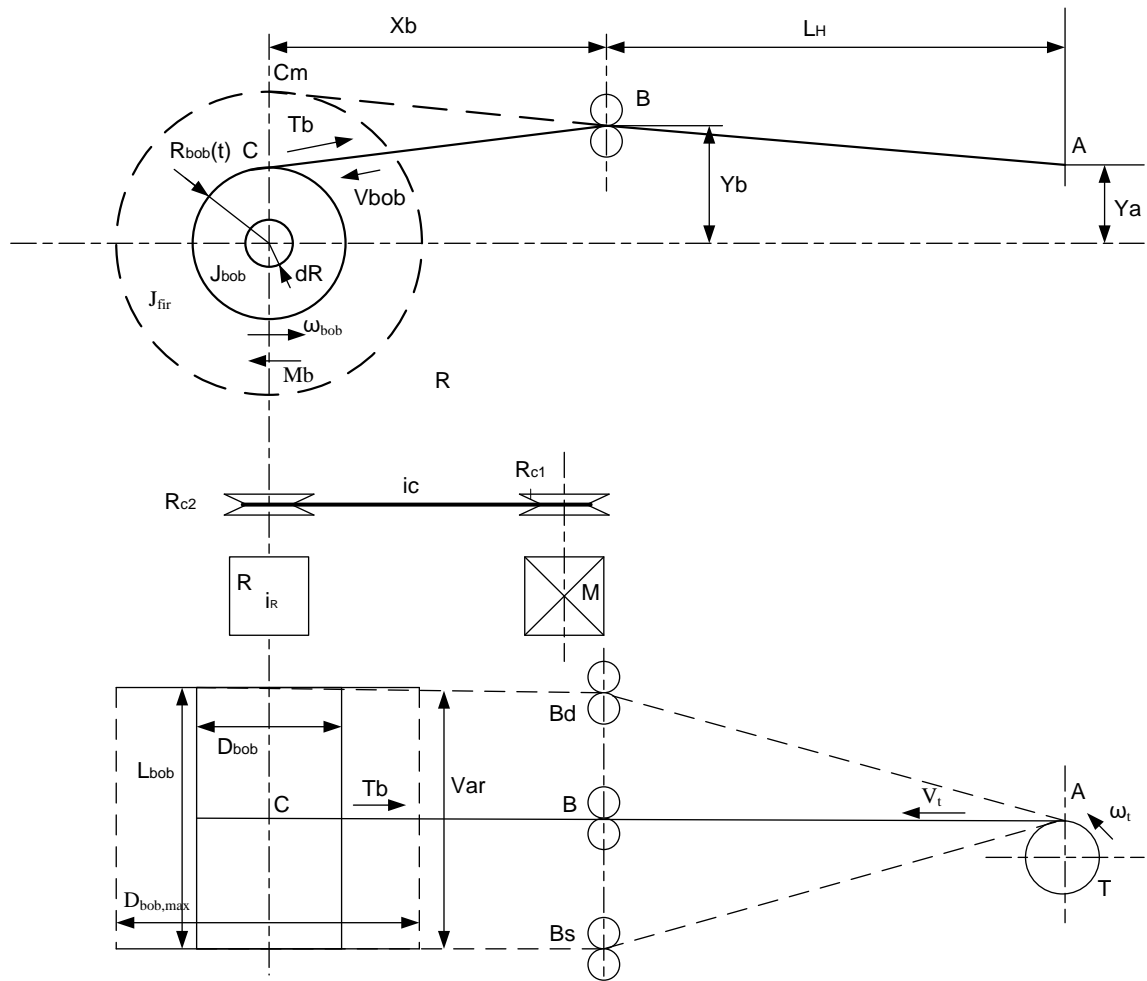


Figura 2.3 Schema cinematică a bobinatorului. [18]

În tabelul de mai jos sunt prezentați parametrii nominali ai motorului care acționează bobinatorul liniei de trefilare medie din cadrul companiei Tehelectro-SV. Materia primă pentru această linie este fir de Cupru cu diametrul de 3 mm. Valoarea prescrisă a forței de tensionare se calculează reieșind din diametrul de ieșire a firului trefilat cu următoarea relație:

$$T_{b.p.} = 0,2 \cdot \sigma_{Cu} \cdot D_{fir}, \text{ [N]} \quad (2.6)$$

Unde σ_{Cu} – limita de curgere a firului de Cupru.

Coeficientul de întindere a firului în corespundere cu legea lui Hook este egal cu:

$$k_{\varepsilon} = \frac{T_{b.p.}}{\Delta l} = \frac{E \cdot D_{fir}}{L_H} \quad (2.7)$$

Unde: E – coeficientul de elasticitate Young.

Tabelul 2.1. Datele nominale ale motorului care acționează bobinatorul

Denumirea	Simbol	Bobinatorul (Trefilor 650/12)
Tipul	-	4A132S4Y3
Puterea, kW	P _n	15
Alunecarea, %	s _n	2,3
Viteza, rot/min	n _{nom}	1460
Randamentul, %	H	89
Factorul de putere	cos φ	0,88
Curentul, A	I _n	27,9
Cuplul nominal, N*m	M _n	98
Momentul de inerție, kg.m ²	J _m	0,072

În general modificarea razei bobinei în timpul bobinării depinde de parametrii constructivi ai bobinei, diametrul firului bobinat și viteza liniară la bobinare.

$$R_{bob}(t) = \sqrt{R_{bob,0}^2 + \frac{D_{fir}^2}{4 \cdot L_{bob} \cdot k_u} \int V_{bob}(t) dt}, [m] \quad (2.8)$$

Unde: R_{bob,0} – raza inițială a bobinei goale; L_{bob} – lățimea bobinei, m; D_{fir} – diametrul firului bobinat, m; k_u – coeficient de umplere.

Coeficientul de umplere se calculează din date experimentale:

$$k_u = \frac{D_{fir}^2 L_{fir}(t)}{L_{bob} (D_{bob,max}^2 - D_{bob}^2)} \quad (2.9)$$

și poate lua valori între 0,6 până la 0,65.

Unde $L_{fir}(t) = \int V_{bob} dt$ lungimea firului bobinat, m.

Luând în considerare spirele relația (2.9) devine:

$$R_{bob}(t) = -\frac{D_{fir}}{2} + \sqrt{(R_{bob,0} + D_{fir})^2 + \frac{D_{fir}^2 \cdot L_{fir}(t)}{4 \cdot L_{bob} \cdot k_u}}, [m] \quad (2.10)$$

Iar raza inițială a bobinei la începutul bobinării este:

$$R_{bob,1} = R_{bob,0} + \frac{D_{fir}}{2}, [m] \quad (2.11)$$

Totodată, raza bobinei $R_{bob,i}$ se mărește discret de la strat la strat.

$$R_{bob,i} = R_{bob,(i-1)} + \Delta R_{strat} \quad (2.12)$$

Unde: $R_{bob,(i-1)}$ este raza anterioară a bobinei la stratul precedent, m.

Tabelul 2.2 Parametrii schemei cinematice a bobinatorului

Denumirea parametru	Simbolizarea	Valoare
Lungimea firului de la ultima rolă pînă la mecanismul de aranjare, m.	L_H	2,75
Lățimea bobinei, m.	L_{bob}	0,5
Diametrul firului, mm.	D_{fir}	0,9-1,7
Secțiunea firului, mm^2 .	S_{fir}	0,63-2,26
Limita de curgere Cupru, N/mm^2 .	σ_{fir}	200-360
Forța de tensionare prescrisă, N.	T_b	170
Coeficient de elasticitate, N/m	k_ϵ	
Viteza de bobinare, m/s.	$V_{bob.}$	20
Raza bobinei, m.	$R_{bob,0.}$	0,375
Viteza unghiulară a bobinei, rad/s.	$\omega_{bob.}$	84,89
Raportul de transmisie	i_c	1,8
Greutatea bobinei cu fir, kg	m_b	550

Raza finală a bobinei este $R_{bob,i} = R_{bob,max} - \frac{D_{fir}}{2} \cdot [m]$

Numărul de straturi bobinate este dat de relația:

$$n = (R_{bob,i} - R_{bob,1}) / \Delta R_{strat} + 1 \quad (2.13)$$

Timpul în care raza bobinei rămâne constantă este determinată de viteza de lucru a mecanismului de aranjare

$$t_{aranj} = L_{bob} / V_{aranj.} = 2\pi L_{bob} R_{bob} / (V_{bob} D_{fir}), \quad [s] \quad (2.14)$$

Unde viteza unghiulară a bobinei este: $\omega_{bob} = V_{bob} / R_{bob}$.

Viteza liniară a mecanismului de aranjare în regim de aranjare (*spiră-spiră*) este determinată de viteza unghiulară a bobinei $V_{aranj,0} = \omega_{bob} D_{fir} / 2\pi$, [m/s]

Pentru excluderea ruperii firului și încălcirea acestuia la etapa de dezbobinare rezultă că viteza de aranjare a firului $V_{aranj.}$ este mai mare ca $V_{aranj.0}$ cu valoare coeficientului de aranjare $k_{aranj.} = V_{aranj.} / V_{aranj.0}$ unde poate avea valori ($k_{aranj.}=1,4-1,75$).

În legătură cu aceasta valoarea medie de creștere a diametrului bobinei la trecerea de la un strat la altul poate fi determinată:

$$\Delta R_{strat} = D_{fir} (\sqrt{1 - k_{aranj.}^2 / 4} + 1) / 2 \quad (2.15)$$

Iar coeficientul de umplere cu fir a bobinei este: $k_u = \pi / (4k_{aranj.} \sqrt{1 - k_{aranj.}^2 / 4})$

Momentul total de inerție a mecanismului de bobinat raportat la arborele motorului este egal cu:

$$J_{\Sigma bob} = k_{arb.} J_M + (J_{bob.0} + J_{fir.bob.}(R_{bob.})) / (i_R \cdot i_C)^2, [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (2.16)$$

Unde: $k_{arb.}$ – coeficient care ia în considerație inerția arborilor intermediari, cuple e.c.t. ($k_{arb.}=2$)

Momentul de inerție a bobinei goale poate fi determinat cu următoarea relație [18, 53, 54]:

$$J_{bob.0} = \frac{m_{b.0}}{2} \cdot \frac{(R_{bob.max.}^4 - R_{bob.0}^4) + 4L_{bob.} R_{bob.}^3}{(R_{bob.max.}^2 - R_{bob.0}^2) + 2L_{bob.} R_{bob.}}, [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (2.17)$$

Unde: $m_{b.0}$ – greutatea bobinei fără fir, kg.

Momentul de inerție a firului bobinat poate fi calculat cu:

$$J_{fir.bob.}(R_{bob.}) = \frac{\pi \rho_{Cu} L_{bob.} k_u (R_{bob.}^4(t) - R_{bob.}^4)}{2} = \frac{\pi \rho_{Cu} D_{fir}^2 L_{fir}(t)}{8} \left[R_{bob.}^2 + \frac{D_{fir}^2 L_{fir}(t)}{8 L_{bob.} k_u} \right], [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (2.18)$$

Constanta de timp a acționării (la viteza nominală și cuplu nominal) este:

$$T_{bob} = J_{\Sigma bob} \omega_{bob.nom.} / M_n, [\text{s}] \quad (2.19)$$

În tabelul 2.3. sunt aduse valorile momentului de inerție a bobinei la etapa inițială, intermediară și finală de bobinare determinat în baza relațiilor prezentate anterior. Analiza rezultatelor demonstrează că inerția bobinei raportată la arborele motorului este mai mare de 7-8

ori decât momentul de inerție al motorului, iar momentul total de inerție în procesul de bobinare se mărește cu încă 8-9 ori.

Perturbațiile care apar asupra firului și determină alungirea firului în procesul de bobinare sunt:

- ✓ funcționarea mecanismului de aranjare a firului pe bobină;
- ✓ excentricitatea bobinei;
- ✓ variația razei bobinei pe durata procesului de bobinare;
- ✓ variația razei de bobinare la trecerea de la un strat la altul.

Modificarea lungimii firului în zona AB la mișcarea mecanismului de aranjare din punctul B în B_d este:

$$\Delta l_{fir.ar.}(t) = L_H \left(\sqrt{1 + (t \cdot k_u \omega_{bob} D_{fir} / (2\pi))^2} - 1 \right) \quad , [m] \quad (2.20)$$

Tabelul 2.3. Momentul de inerție al bobinei și firului

Denumire	Simbol	Valori
Greutatea bobinei, kg	m _{bob}	115
Raza externă a bobinei, m	R _{bob.max.}	0,375
Raza de montare a bobinei, m	R _{bob.0.}	0,075
Momentul de inerție a bobinei goale, kg*m ²	J _{bob.0}	6,8
Greutatea firului bobinat, kg (inițial, la mijloc și final)	0 0,5m _{fir} m _{fir}	0 197 385
Raza firului bobinat (la început, mijloc și sfârșit), m	R _{bob.fir.0} R _{bob.fir.m} R _{bob.fir.max}	0,213 0,28 0,332
Momentul de inerție al firului bobinat, kg*m ² (la mijloc și la sfârșit)	J _{fir.bob.m} J _{fir.bob.max}	24,5 59,9
Momentul total de inerție, kg*m ² (inițial, la mijloc și final)	J _{Σbob.0} J _{Σbob.m} J _{Σbob.max}	0,455 1,89 3,97
Constanta de timp, s (motor, inițială și finală)	T ₀ T _{int.} T _{fin.}	0,09 2,42 18,2

Sistemul electromecanic al bobinatorului trebuie efectiv să compenseze perturbațiile mecanice care apar în sistem. Mai mult ca atât, în regimuri dinamice de accelerare și frânare trebuie să mențină forța de tensionare din fir constantă, compensând componentele dinamice din sistem.

Modernizarea sistemului de acționare la liniile de producere industrială constă în înlocuirea acționărilor de curent continuu sau a acționărilor cu mașini asincrone cu rotorul bobinat cu acționări cu convertizoare de frecvență.

De obicei motoarele și partea mecanică a liniei nu se modifică. Dar o dată cu modificarea sistemului de acționare apare din nou necesitatea determinării puterii motoarelor de acționare în funcție de specificul liniei și regimurilor de reglare a vitezei.

În figura 2.4 a) sunt reprezentate dependențele relative ale forței de tensionare în funcție de raza bobinei, unde T_0 – valoarea inițială a forței de tensionare când raza bobinei $R_{bob.fir}$ este egală cu raza bobinei goale $R_{bob.0}$.

Dependența reglării forței de tensionare: *Const* – forță constantă; *Linear* – micșorarea lineară a forței; *Fmax* – forța maximă la etapa inițială cu micșorarea treptată până la valoarea minimă; *Hiperbol* – micșorarea forței de tensionare invers proporțional razei de bobinare.

Preferabil din punct de vedere a duratei de exploatare și a calității înfășurării firului este reglarea Hiperbolică a forței din fir.

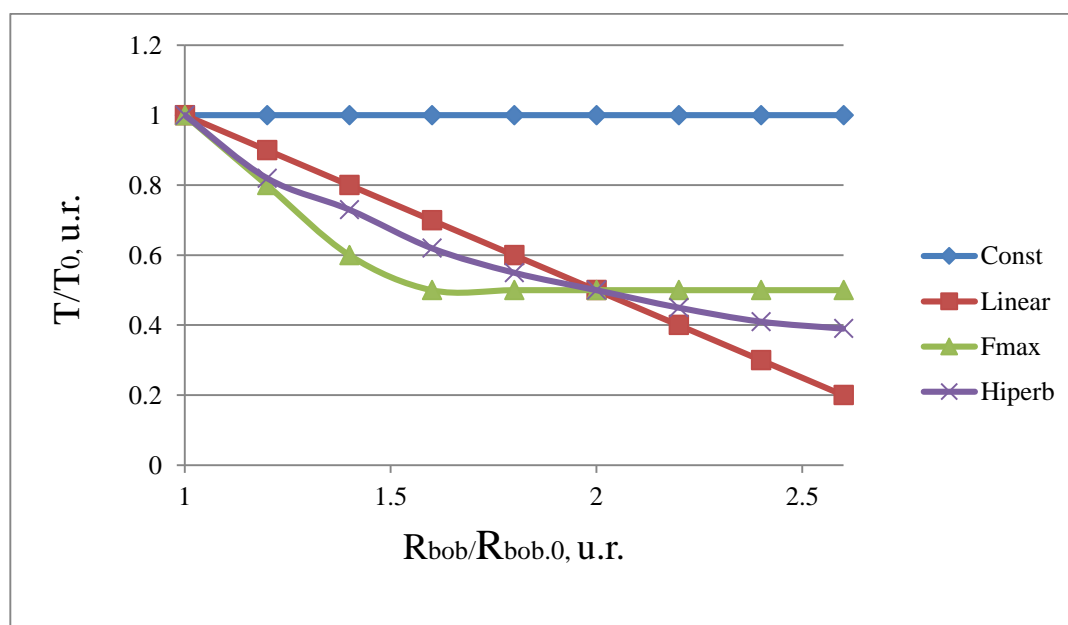
Cuplul de tensionare raportat la arborele motorului este determinat de forța de tensionare din fir la bobinare și raza de bobinare.

$$M_{bob.}(R_{bob.}) = T_{bob.}(R_{bob.})R_{bob.} / (i_C \cdot i_R), [N*m] \quad (2.21)$$

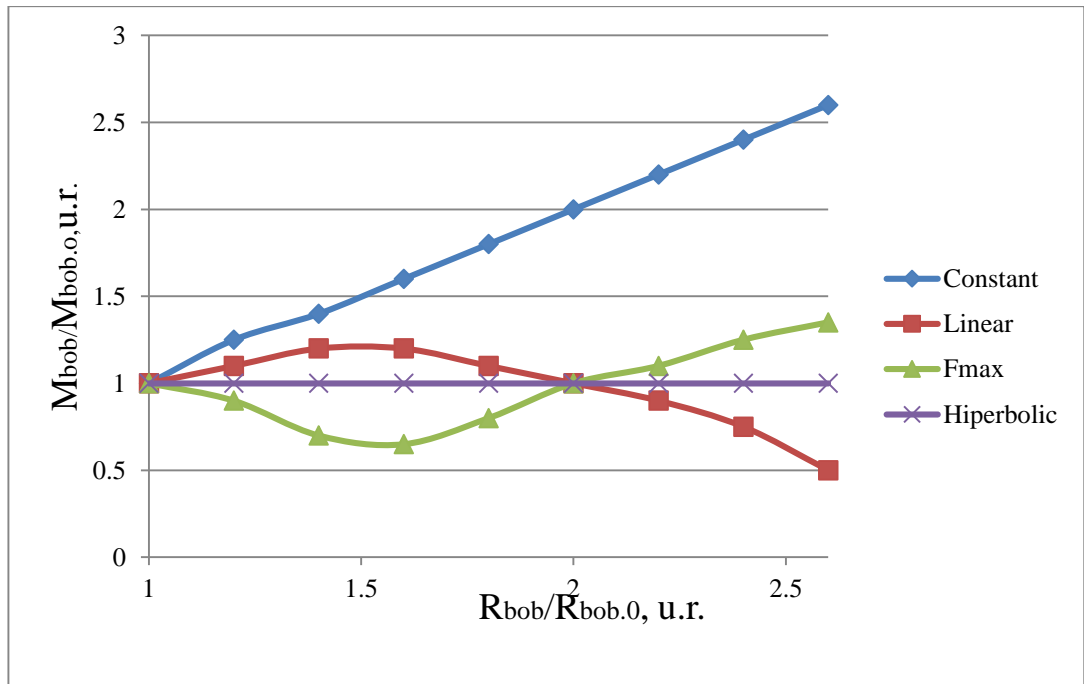
Unde: i_C și i_R sunt aportul de transmisie prin curea și raportul de transmisie a reductorului.

Unde $i_R=1$.

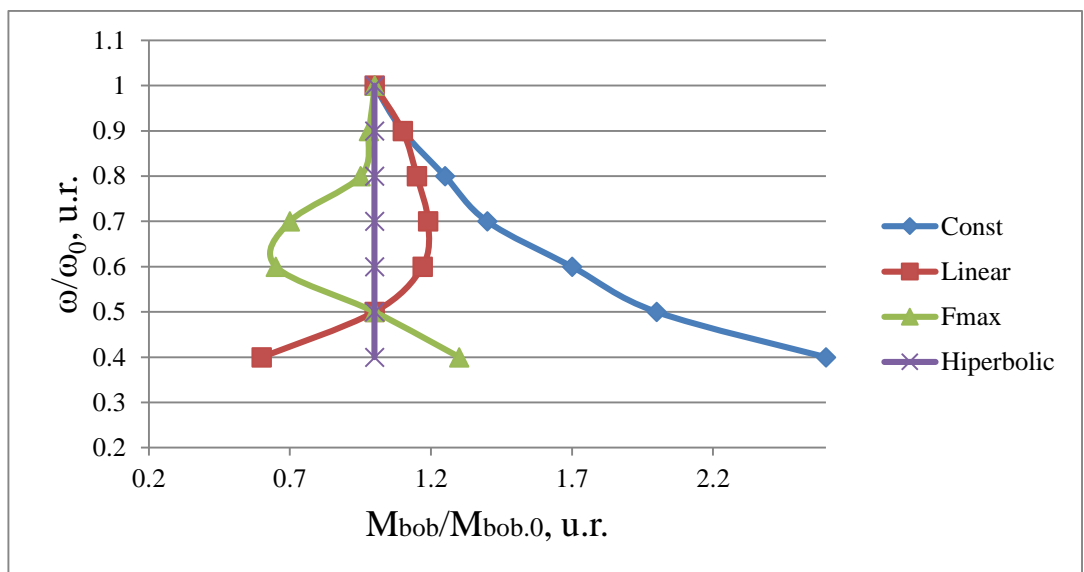
În figura. 2.4. b) sunt reprezentate dependențele valorii relative a cuplului de tensionare în funcție de valoarea relativă a razei de bobinare, unde M_0 – este momentul inițial de tensionare la valoarea relativă a razei de bobinare $r_{bob}=R_{bob}/R_{bob.0}=1$.



a)



b)



c)

Figura 2.4. Dependentele $T_{bob}/T_{bob.0}(R_{bob}/R_{bob.0})$ – (a), $M_{bob}/M_{bob.0}(R_{bob}/R_{bob.0})$ – (b), la diferite raze de bobinare și caracteristica mecanică a bobinatorului – (c)

Trebuie de menționat faptul că, pentru menținerea constantă a forței de tensionare cuplul de tensionare crește linear, dar la o micșorare hiperbolică a forței de tensionare cuplul rămâne constant.

Viteza unghiulară a motorului este determinată de viteza lineară a firului la bobinare și raza bobinei.

$$\omega = i_C \cdot i_R V_{bob} / R_{bob.}, [\text{rad/s}] \quad (2.22)$$

În fig. 2.4 c) este reprezentată dependența valorii relative a vitezei unghiulare a motorului în funcție de valoarea relativă a momentului de tensionare.

Trebuie să menționăm faptul că la descreșterea hiperbolică a forței din fir caracteristica mecanică a bobinatorului reprezintă o linie verticală. Rezultă că sarcina maximă asupra acționării este când se menține constant valoarea forței din fir și valoarea puterii, adică $R_{bob}=R_{bob,max}$. Parametrii nominali ai motorului de acționare trebuie aleși reieșind din condițiile:

$$\left. \begin{array}{l} \omega_n \geq \omega_0 \\ M_n \geq D_{bob} M_{bob,0} \end{array} \right\} \quad (2.23)$$

Unde: D_{bob} – diapazonul de variație a razei de bobinare ($D_{bob}=R_{bob,max}/R_{bob,0}$).

Timpul de accelerare și frânare a liniei de trefilare este de ordinul zecilor de secunde, timpul de bobinare a unei bobine cu fir este aproximativ de 40 de minute, iar timpul de schimbare a unei bobine noi este de aproximativ 5 min, de aceea motorul de acționare a bobinatorului se alege pentru regimul S1. Puterea nominală rezultă că este:

$$P_n = M_n \cdot \omega_n \geq D_{bob} \cdot M_{bob,0} \cdot \omega_0, [W] \quad (2.24)$$

De obicei pentru linii de trefilare $D_{bob}=1,8-2,2$. În așa mod se mărește puterea nominală în raport cu puterea la bobinare $P_{bob} = M_{bob,0} \cdot \omega_0$, motorul va funcționa în prima zonă de reglare.

Modificarea diapazonului de viteze poate fi realizat prin modificarea raportului de transmisie sau prin utilizarea unui motor cu un număr de perechi de poli mare. Motorul va funcționa în a doua zonă de reglare care se caracterizează prin putere constantă.

Aceasta contribuie la creșterea vitezei de funcționare a motorului se îmbunătățesc condițiile de răcire, scad valorile momentului de inerție al bobinei și al cuplului raportat la arborele motorului.

În a doua zonă de reglare, însă, ridicarea vitezei se realizează din contul majorării frecvenței tensiunii de alimentare ceea ce duce la cu micșorarea fluxului magnetic principal, invers proporțional vitezei.

Pentru crearea aceleiași valori ale cuplului este necesar de majorat curentul rotorului activ.

În SEM cu reglare vectorială perturbații adăugătoare sunt variațiile rezistenței înfășurării statorice și rotorice la creșterea temperaturii acestora, fapt care impune realizarea unor cercetări adăugătoare privind implimentarea unor algoritmi de compensare a acestor perturbații.

2.3. Modelul matematic al compensatorului pendular

Compensatorul reprezintă o rolă care se rotește liber (rola R4) la capătul brațului compensator (figura. 2.5), celălalt capăt al brațului este fixat prin intermediul unui lagăr O, cu un singur grad de libertate, fapt ce îi permite să se miște după traiectoria unui arc de cerc.

Compensatorul, în cazul, dat are trei funcții:

- 1) menține forța de tensionare din fir;
- 2) atenuează variațiile forței de tensionare din fir;
- 3) generează un semnal de comandă pentru sistemul de comandă a bobinatorului.

Forța de tensionare din fir este asigurată de un piston cu aer comprimat.

Mișcarea unghiulară a compensatorului (figura.2.5) este provocată de diferența dintre forța dezvoltată de pistonul cu aer și forța de tensionare din fir ceea ce formează unghiul α .

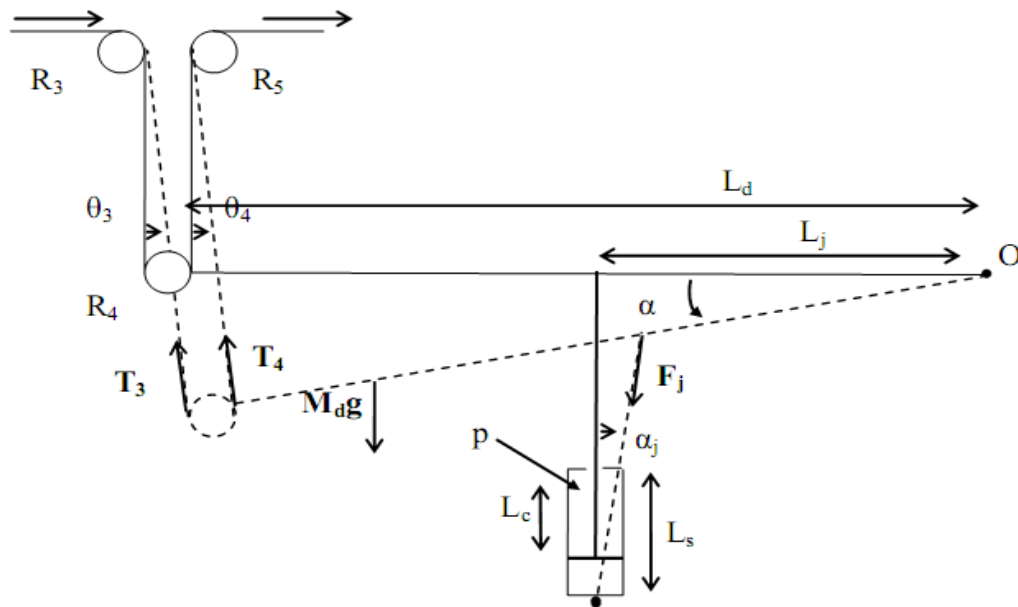


Figura 2.5. Schema cinematică a pendulului compensator. [18, 55, 56]

Mecanismul compensatorului este caracterizat de următorii parametri: L_d – este lungimea brațului compensatorului, J_d – inerția brațului compensator în mișcare de rotație cu rolă, L_j – distanța dintre piston și punctul de fixare în jurul căruia se rotește brațul, M_d – greutatea brațului compensator și L_{gd} reprezintă distanța de la centrul de greutate a brațului compensator și punctul de rotație O.

Descrierea comportamentului brațului compensator în regim dinamic are la bază principiile fundamentale ale dinamicii (fig. 2.5):

$$\begin{aligned}
 & -T_3(L_d + R_4)\cos(\alpha - \theta_3) - T_4(L_d - R_4)\cos(\alpha - \theta_4) + M_d g L_{gd} \cos \alpha + \\
 & + F_j L_j \cos(\alpha + \alpha_j) - C_{ff0} - C_{ffB} - C_{ff4} = J_d \frac{d^2 \alpha}{dt^2}
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Unde: C_{ff0} , C_{ffB} și C_{ff4} – coeficienți de frecare din lagăre la rotație.

Cilindrul are următorii parametri L_m – lungimea totală a cilindrului cu tija, L_s – lungimea cursei cilindrului, L_c – lungimea camerei cilindrului sub aer cu presiunea p (din partea de sus a cilindrului pentru producerea forței rezultante orientată în jos) și S – suprafața sub presiune a cilindrului.

Lungimea minimă a cilindrului este L_s+L_m , lungimea maximă a cilindrului este $2L_s+L_m$, iar lungimea în regim de lucru este $2L_s+L_m-L_c$. Pistonul este alimentat cu aer sub presiune de la un regulator de presiune. Presiunea din cilindru este ajustată în funcție de forța de tensionare necesară din fir la bobinare. În regim de lucru nominal, presiunea este calculată astfel, încât, poziția brațului compensator să fie în poziție orizontală ($\alpha=0$) atunci când forțele de tensionare T_3 și T_4 sunt egale cu valoarea forței de tensionare nominală T_n .

Utilizând ecuația de echilibru a brațului compensator (ec.2.25) cu $T_3=T_4=T_n$ și $\alpha=0$, atunci forța nominală a cilindrului va fi:

$$F_{jn} = \frac{T_n(L_d + R_4) + T_n(L_d - R_4) - M_d g L_{gd}}{L_j}, [\text{N}] \quad (2.26)$$

Iar presiunea aerului din interiorul pistonului este constantă și egală cu:

$$p = \frac{F_{jn}}{S} = \frac{2T_n L_d - M_d g L_{gd}}{L_j S}, [\text{Pa}] \quad (2.27)$$

Cilindrul are rezistență și o rigiditate dinamică reprezentate prin K și N . Respectiv, forța aplicată brațului compensator va fi:

$$\|\vec{F}_j\| = Kx + N \dot{x} + pS \quad (2.28)$$

Unde x reprezintă deplasarea liniară a tijeii pistonului

$$x = 2L_s - L_c + L_m - \left[2L_s - L_c + L_m - 2L_j \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right] \alpha \cos \alpha_j, [\text{m}] \quad (2.29)$$

Rigiditatea cilindrului cu aer este dată de relația:

$$K = \frac{BS^2}{V} \quad (2.30)$$

Unde: B – modulul în vrac al aerului, V – volumul aerului în interiorul cilindrului.

Coeficientul B pentru gaze este dat de relația $B=\gamma p$, unde γ este indicele adiabatic ($\gamma=1,4$ pentru aer uscat), iar p este presiunea.

Înlocuind în relație, putem observa că K este legat de forța nominală a pistonului:

$$K = \frac{BS}{L_c} = \frac{\gamma p S}{L_c} = \frac{\gamma F_{jn}}{L_c} \quad (2.31)$$

Forța rezultantă dezvoltată de piston asupra brațului compensator poate fi scrisă:

$$\|\vec{F}_j\| = \frac{\gamma F_{jn} x}{L_c} + N \dot{x} + F_{jn}, \text{ [N]} \quad (2.32)$$

Mișcarea brațului compensator duce la modificarea lungimii firului pe rolele compensatorului în poziția de sus și de jos a brațului. În momentul modificării unghiului α , se produce și modificarea lungimii L_3 de la lungimea inițială L_{30} la:

$$L_3 = \sqrt{[L_{30} + (L_d + R_4) \sin \alpha]^2 + \left[2(L_d + R_4) \sin^2 \frac{\alpha}{2}\right]^2}, \text{ [m]} \quad (2.33)$$

Iar pentru L_4 se modifică conform relației:

$$L_4 = \sqrt{[L_{40} + (L_d - R_4) \sin \alpha]^2 + \left[2(L_d - R_4) \sin^2 \frac{\alpha}{2}\right]^2}, \text{ [m]} \quad (2.34)$$

Viteza tangențială a firului este diferită în momentul intrării în contact cu rola în partea stânga și, respectiv, în momentul, când firul părăsește rola în partea dreaptă. Viteza liniară a rolei, în referențialul Galilean, în partea stângă va fi denumită V_{4L} , iar viteza în partea dreaptă va fi denumită V_{4R} .

Rotirea brațului compensator cu rola R4 creează o diferență în viteza tangențială:

$$V_{4L} = V_4 + (L_d + R_4) \dot{\alpha} \quad (2.35)$$

$$V_{4R} = V_4 - (L_d - R_4) \dot{\alpha} \quad (2.36)$$

2.3.1. Elaborarea sistemului de control a unui bobinator cu compensator pendular

Modelul studiat în cazul dat este un bobinator real utilizat în instalațiile industriale cu compensator pendular (figura. 2.6). Acest sistem conține un motor de acționare și un sistem de comandă cu reglatoare. Raza bobinei R_w pe care se bobinează firul se schimbă în timp.

Firul bobinat trece prin mai multe role cu raze diferite care sunt fixate de carcasa instalației cu excepția rolei R4. Forța de tensionare dintre două role i și $i+1$ care are lungimea L_i este T_i . [54,57, 58, 59]

Liniarizarea ecuațiilor, care descriu variația forței de tensionare dintre două role, se efectuează pentru valoarea nominală a forței de tensionare T_0 , viteză nominală V_0 și pentru raza bobinei R_{w0} . Relația liniarizată este:

$$L_2 \frac{dT_2}{dt} = (ES + T_0)(V_3 - V_2) + (T_1 - T_2)V_0 \quad (2.37)$$

Comportarea compensatorului este descrisă de principiile fundamentale ale dinamicii și prin liniarizarea ecuației în punctul când ($\alpha=0$, astfel $\theta_3=\theta_4=\alpha_j=0$). Totodată sunt neglijate forțele de rezistență în lagăre și cele ale pistonului.

În aceste condiții deplasarea liniară a pistonului este x :

$$x = 2L_S - L_C + L_m - \left[2L_S - L_C + L_m - 2L_j \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right] \alpha \cos \alpha_j, \quad [\text{m}] \quad (2.38)$$

Devine $x = -L_j \alpha$

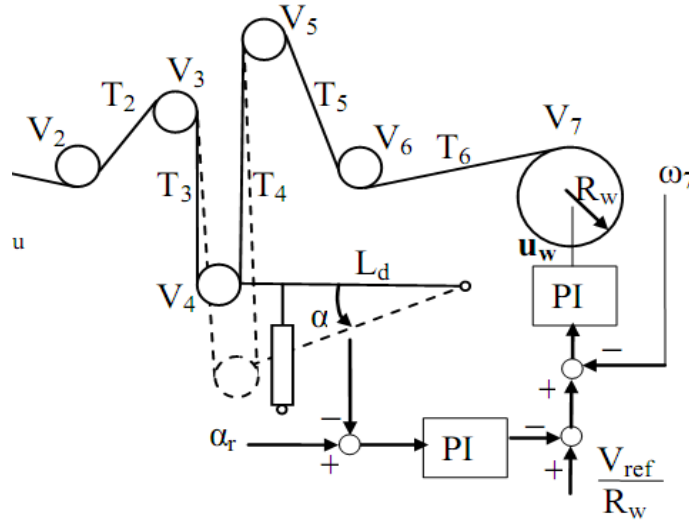


Figura 2.6. Schema de reglare a unui bobinator cu compensator pendular [55]

De asemenea forța nominală dezvoltată de piston pentru T_0 devine:

$$F_{jn0} = \frac{2T_0 L_d - M_d g L_{gd}}{L_j}, \quad [\text{N}] \quad (2.39)$$

În rezultat ecuația forței F_j liniarizată devine:

$$\|\vec{F}_j\| = F_{jn} - \frac{F_{jn0} \gamma L_j \alpha}{L_c}, \quad [\text{N}] \quad (2.40)$$

Forța F_{jn0} este calculată doar la începutul modelării sistemului și aceasta rămâne constantă, iar F_{jn} se poate modifica pe parcursul modelării, la fel, și forța T_n .

În aceste condiții ecuația liniarizată care descrie compensatorul pendular în regim dinamic devine:

$$-T_3(L_d + R_4) - T_4(L_d - R_4) + M_d g L_{gd} + F_{jn} L_j - \frac{F_{jn0} \gamma L_j^2 \alpha}{L_c} = J_d \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \quad (2.41)$$

La elaborarea ecuațiilor liniarizate care descriu variația forței de tensionare pe porțiunile L_3 și L_4 s-a luat în considerație și variațiile lungimii firului pe aceste porțiuni:

$$L_3 \frac{dT_3}{dt} = E_0(V_4 - V_3) + V_0(T_2 - T_3) + (L_d + R_4) \dot{\alpha} E_0, \quad [\text{m}] \quad (2.42)$$

$$L_4 \frac{dT_4}{dt} = E_0(V_5 - V_4) + V_0(T_3 - T_4) + (L_d + R_4) \dot{\alpha} E_0, \quad [\text{m}] \quad (2.43)$$

Coeficienții de frecare din rulmenții rolelor sunt neglijați.

2.3.2. Estimarea parametrilor variabili ai bobinei

Diametrul bobinei se modifică, în timp, în funcție de viteza liniară a firului. [60, 61, 62]

$$R_b = \sqrt{R_0^2 + \frac{d^2}{\pi \cdot L_b} \int V_t dt}, \quad [\text{m}] \quad (2.44)$$

Unde: R_0 – raza inițială a bobinei;

d – Diametrul firului bobinat;

L_b – lungimea bobinei, m.

Momentul de inerție:

$$J = J_0 + \frac{\pi L_b \rho}{2} (R_b^4 - R_0^4), \quad [\text{kgm}^2] \quad (2.45)$$

Unde: J_0 – momentul de inerție al bobinei fără fir;

ρ – densitatea firului luându-se în calcul și coeficientul de umplere.

2.3.3. Estimarea parametrilor firului la trecerea prin compensator

Tensionarea firului în zona de deformare elastică este determinată de secțiunea S a acesteia, coeficientul de elasticitate E și de alungirea relativă.

$$F_H = -E \cdot S \cdot \Delta L / L(\varphi_1), \quad [\text{N}] \quad (2.46)$$

Unde ΔL – alungirea absolută a firului determinată de viteza de trefilare V_t , viteza de bobinare V_b și poziția pendulului [15, 63]:

$$\Delta L = \int (V_t - \omega_H / R_k) dt - (L_0 - L(\varphi_1)), \quad [\text{m}] \quad (2.47)$$

Unde L_0 – lungimea inițială a firului în compensator, m.

2.4. Calculul sistemului de reglare a forței de tragere la bobinare

Sistemele de comandă ale acționărilor, de obicei, au două regimuri de lucru: regimul de reglare al vitezei motorului și regimul de reglare al tensiunii de tragere. Anume, ultimul este de

bază și trebuie să asigure exactitate la menținerea constantă a tensiunii din fir 3-10%, în funcție de destinația acționării.

O constatare importantă este că sistemele de reglare ale forței de întindere pot fi atât cu măsurarea directă a tensiunii din fir, cât și pe calea modificării unor parametri indirecti.

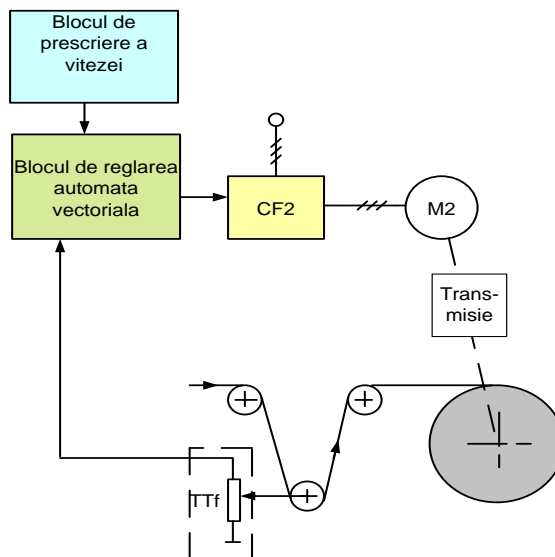


Figura 2.7. Schema structurală a acționării mecanismului de bobinat [26,49, 51]

În schema din figura 2.7 este reprezentată structura simplificată a acționării vectoriale a mecanismului de bobinat, care include elementele de bază a acestei acționări. Reglarea forței de tensionare a firului la bobinare are loc pe cale directă, utilizând un traductor de determinare al poziției brațului compensator. Această metodă asigură o reglare mai exactă a forței de tensionare și o rapiditate înaltă față de metoda indirectă. Reglarea motorului de acționare este vectorială, deoarece asigură parametri dinamici ridicați ai acționării care sunt necesari, în cazul dat, pentru reglajul forței de tensionare și a vitezei de bobinare. [64]

În figura 2.8 este reprezentată schema structurală simplificată a sistemului de reglare vectorială a mecanismului de bobinat. Această schemă are trei contururi cu reglarea subordonată a coordonatelor cu contururile interioare de curent, viteză și conturul exterior al forței de tensionare din fir. Schimbarea regimurilor de reglare se efectuează automat modificând valoarea prescrisă blocului de limitare al regulatorului de tensionare. În situația când firul nu este sau s-a rupt, componenta integrală a regulatorului duce regulatorul în saturație. Valoarea limită este prescrisă de semnalul U_{pv} , care determină viteza bobinei goale. Având în vedere faptul că, viteza unghiulară a bobinei este prescrisă mai mare ca viteza liniară a firului în timpul agățării acestuia de bobină, forța de întindere va începe să crească și regulatorul de tensionare va ieși din saturație și, respectiv, va intra în lucru bucla de reglare a forței de întindere. [43,65]

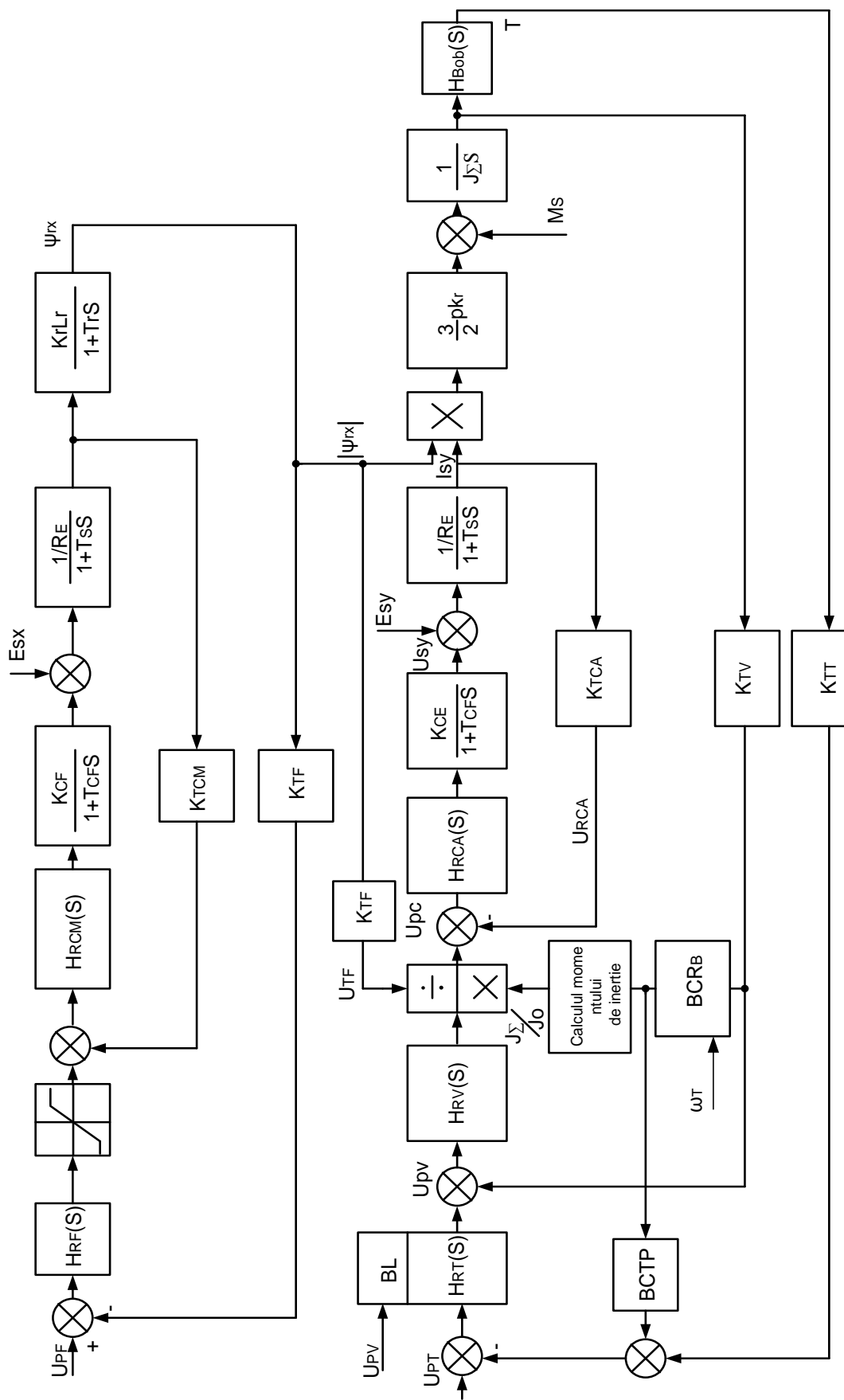


Figura 2.8. Schema structurală simplificată a sistemului de reglare vectorială a vitezei și forței de tensionare. [18]

La ruperea firului va decurge un proces invers. Atât semnalul de la ieșirea regulatorului forței de tensionare va începe să crească până la saturație, cât și viteza bobinei. Pentru oprirea bobinei pline este necesar de micșorat valoarea de limită a regulatorului de tensionare până la zero.

Amplasarea la ieșirea regulatorului de viteză al dispozitivului de multiplicare și divizare asigură invariarea acordării conturului de viteză la funcționarea cu flux magnetic slăbit sau la schimbarea momentului total de inerție la arborele motorului. [52, 18, 56, 66]

Legea de modificare a forței de tensionare a firului este asigurată de blocul de corectare a prescrierii forței de tensionare BCTP (blocul de corectare al tensionării prescise). Acest bloc reprezintă un regulator proporțional cu un coeficient de transfer:

$$k_{CPT} = k_R \left(1 - \frac{R_{TB}}{R_B} \right) \quad (2.48)$$

Unde: k_R - coeficient de rezervă, micșorând influența razei bobinei asupra forței de tensionare el se alege $k_R=1$.

R_{TB} – raza tamburului bobinei; R_B – raza bobinei.

BCRB – blocul de calcul a razei bobinei.

Calcul tuturor buclelor de reglare conform schemei reprezentate în figura 2.8 sunt prezentate sub forma de anexa, vezi (ANEXA 4).

Pentru simplificarea acordării regulatorului de proces al sistemului de comandă, toată mecanismului de bobinat se echivalează cu o funcție de transfer de gradul doi.

În urma acestei echivalări obținem următoarea schemă structurală (Figura.2.9.):

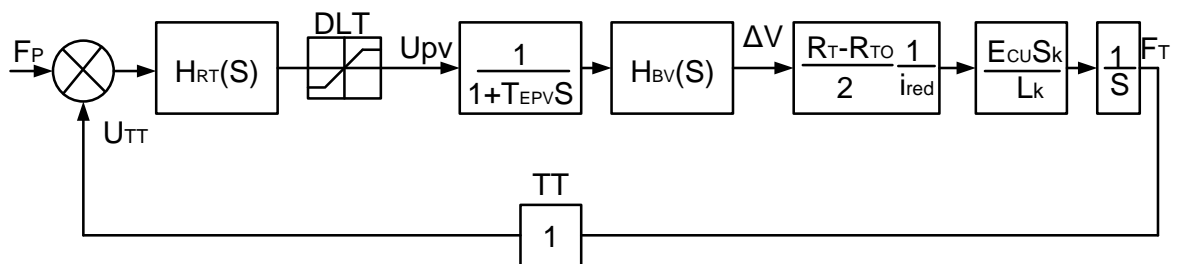


Figura 2.9. Schema structurală simplificată a sistemului de acționare [52, 67]

Funcția de transfer a buclei de viteză este:

$$H_{BV}(S) = \frac{k_{AE}}{2T_0^2 S^2 + 2T_0 S + 1} \quad (2.49)$$

Unde: $T_0 = 2T_{CF} = 0.01 \text{ s}$

Coeficientul de transfer al acționării este:

$$k_{AE} = k_{EPV} \frac{1}{k_{TV}} \frac{R_T - R_{T0}}{2} \frac{1}{i_r} \cdot \frac{E_{Cu} S_{fir.}}{L_k} = 1.25 \cdot \frac{1}{0.053} \cdot 0.1 \cdot 640 = 1509.43 \quad (2.50)$$

Coeficientul de transfer al regulatorului forței de tensionare este:

$$k_{RT} = \frac{1}{2k_{AE} T_{\mu T}} \quad (2.51)$$

2.5. Analiza stabilității sistemului de reglare a acționării bobinatorului

Analiza stabilității unui SRA (Figura 2.10) se poate realiza cu ajutorul criteriilor algebrice și în domeniul frecvențial, cele mai cunoscute fiind criteriul Routh-Hurwitz și respectiv criteriul Nyquist [68, 69].

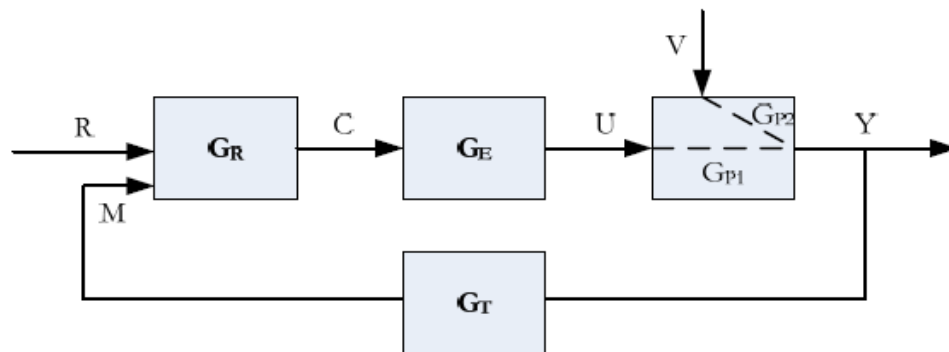


Figura 2.10. Schema bloc a SRA:

G_R – funcția de transfer a regulatorului, G_E – funcția de transfer a elementului de execuție, G_{P1} – funcția de transfer a procesului pe canalul mărime de execuție, (U) – ieșire (Y), G_{P2} – funcția de transfer a procesului pe canalul perturbație, (P) – ieșire (Y), G_T – funcția de transfer a traductorului, R – referință, C – comandă, U – mărime de execuție, V – perturbație, Y – ieșire, M – măsură [1, 33, 35, 43, 50, 81]

Un SRA este caracterizat de ecuația:

$$1 + G_d(s) = 0, \quad (2.52)$$

în care $G_d(s)$ este funcția de transfer a SRA deschis, cu

$$G_d(s) = G_R(s) * G_E(s) * G_{P1}(s) * G_T(s). \quad (2.53)$$

Polinomul caracteristic va fi

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \quad (2.54)$$

2.5.1. Analiza stabilității după criteriul Routh-Hurwitz

Un SRA este stabil dacă și numai dacă matricea Hurwitz H_n :

$$H_n = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & \cdots & 0 & 0 \\ a_n & a_{n-2} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & a_2 & a_0 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

asociată polinomului caracteristic $P(s)$ are toți minorii principali $\Delta_1 = a_{n-1}$, $\Delta_2 = a_{n-1} \cdot a_{n-2} - a_n \cdot a_{n-3}, \dots$, $\Delta_n = a_0 \cdot \Delta_{n-1}$ pozitivi și, în plus, coeficienții polinomului caracteristic a_i sunt pozitivi.

Pentru sistemul de reglare a bobinatorului cu funcția de transfer $G_E(s)$ avem:

$$G_R(s) = k;$$

$$G_E(s) = \frac{1509.43}{0.0002s^2 + 0.02s + 1} \quad (2.56)$$

$$G_T(s) = 1;$$

De unde rezultă $G_d(s)$:

$$G_d(s) = \frac{50}{0,0002s^2 + 0,02s + 51} \quad (2.57)$$

se obține polinomul caracteristic al SRA.

Criteriul Hurwitz folosește coeficienții polinomului caracteristic al sistemului (polinomul de la numitor) și determină dacă toate rădăcinile au partea reală negativă, fără a calcula rădăcinile în mod explicit. Acest criteriu se poate aplica în condițiile în care polinomul caracteristic are toți coeficienții strict pozitivi (>0). [70, 71]

2.5.2. Analiza stabilității sistemului în MatLab Simulink după Criteriul Bode și Nyquist simplificat

În baza schemei structurale simplificate din figura.2.9 este elaborat modelul Simulink reprezentat în figura.2.11. Utilizând acest model se realizează analiza stabilității sistemului conform *criteriilor Bode*, *Nyquist simplificat* și *diagramei poli-zerouri* cu ajutorul funcțiilor specializate din MatLab Simulink.

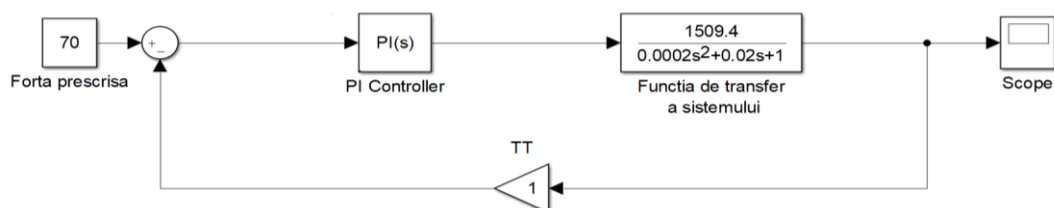


Figura 2.11. Modelul Simulink al sistemului de reglare al forței la bobinare

2.5.2.1. Criteriul Bode de analiza a stabilității

Acest criteriu analizează stabilitatea SRA, evaluând rezerva de stabilitate a acestuia.

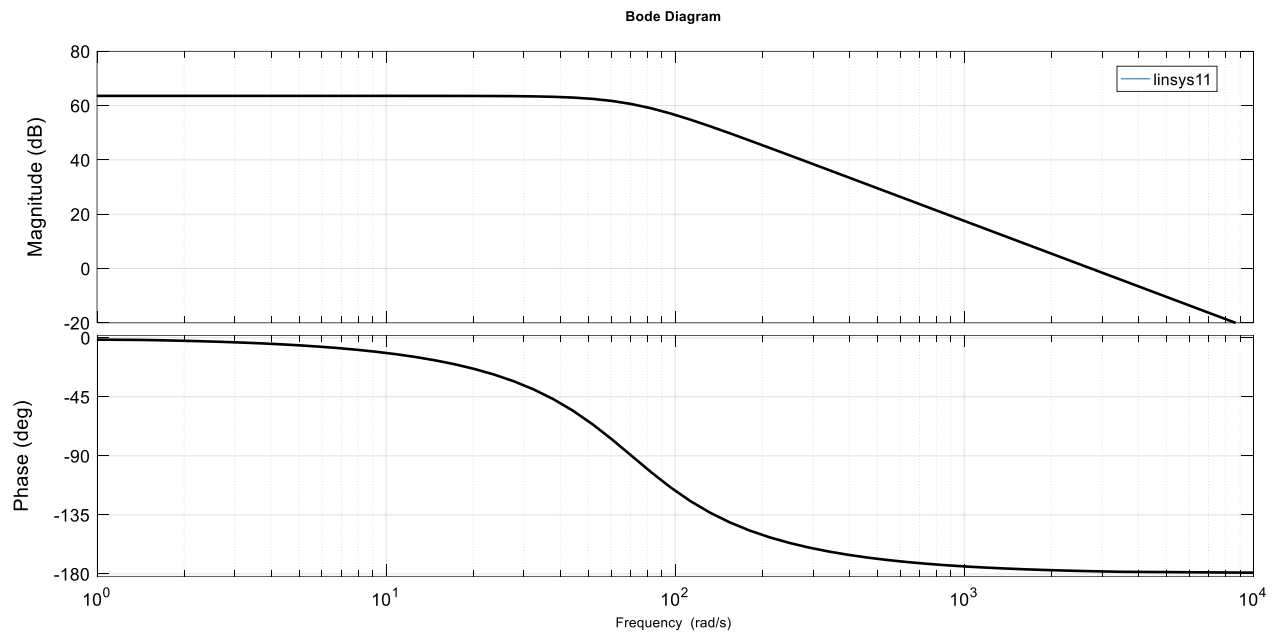


Figura 2.12. Diagrama Bode a sistemului de reglare al forței din fir

Rezerva de stabilitate a unui SRA se evaluează prin două mărimi caracteristice din caracteristicile semilogaritmice ale lui $H_b(s)$:

- marginea de amplitudine (rezerva de stabilitate în modul): $m_{dB} = -|H_b(j\omega_{\pi})|_{dB}$

- marginea de fază (rezerva de stabilitate în fază): $\gamma = 180^\circ + \varphi(\omega_t)$

unde ω_t este pulsația de tăiere, iar ω_{π} – pulsația la care sistemul $H_b(s)$ și are o fază egală cu $-\pi$.
[32] [72]

Criteriul Bode reprezintă transpunerea în scara logaritmică a criteriului Nyquist simplificat și se exprimă astfel: condiția necesară și suficientă ca un SRA să fie stabil este ca reprezentarea fază-pulsație să intersecteze axa ω într-un punct situat după intersecția cu aceeași axă a reprezentării amplitudine-pulsație (deci $\omega_{\pi} > \omega_t$).

Intersecția reprezentării amplitudine-pulsație cu axa 0 se notează cu ω_t și se numește pulsație de tăiere. Intersecția reprezentării fază-pulsație cu axa de -180° se notează ω_{π} și se numește pulsație la o fază de -180° . Din grafic se poate observa că $\omega_{\pi} > \omega_t$, deci în acest caz avem un sistem stabil.

2.5.2.2. Criteriul Nyquist simplificat

Condiția necesară și suficientă ca un SRA să fie stabil este ca hodograful lui $H_O(s)$ să nu înconjoare punctul critic $(-1, j0)$ (se consideră $H_b(s)$ stabil) atunci când $(\omega \in -\infty, +\infty)$.

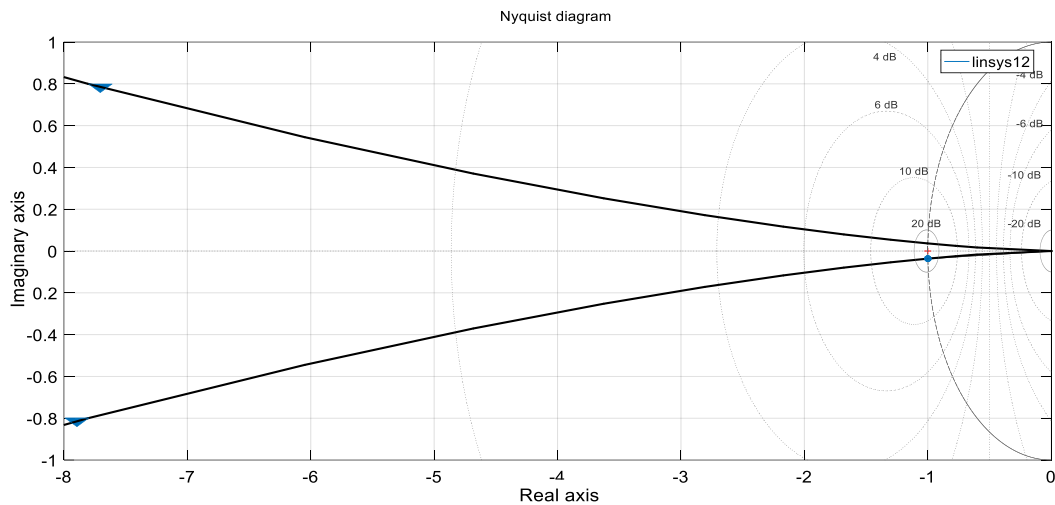


Figura 2.13. Diagrama Nyquist a sistemului

Figura 2.13 reprezintă hodograful lui $H_b(s)$, care nu înconjoară punctul critic $(-1, j0)$, respectiv, rezultă, conform criteriului de stabilitate NYQUIST SIMPLIFICAT, că sistemul este stabil.

2.5.2.3. Criteriul de stabilitate conform diagramei poli-zero

Criteriul de stabilitate conform diagramei poli-zero constă în faptul că polii să se găsească în semiplanul Laplace stâng. Polii din semiplanul drept produc instabilitate în sistem. Deci, polii care duc la o funcționare auto-oscilantă trebuie să se găsească pe axa $j\omega$.

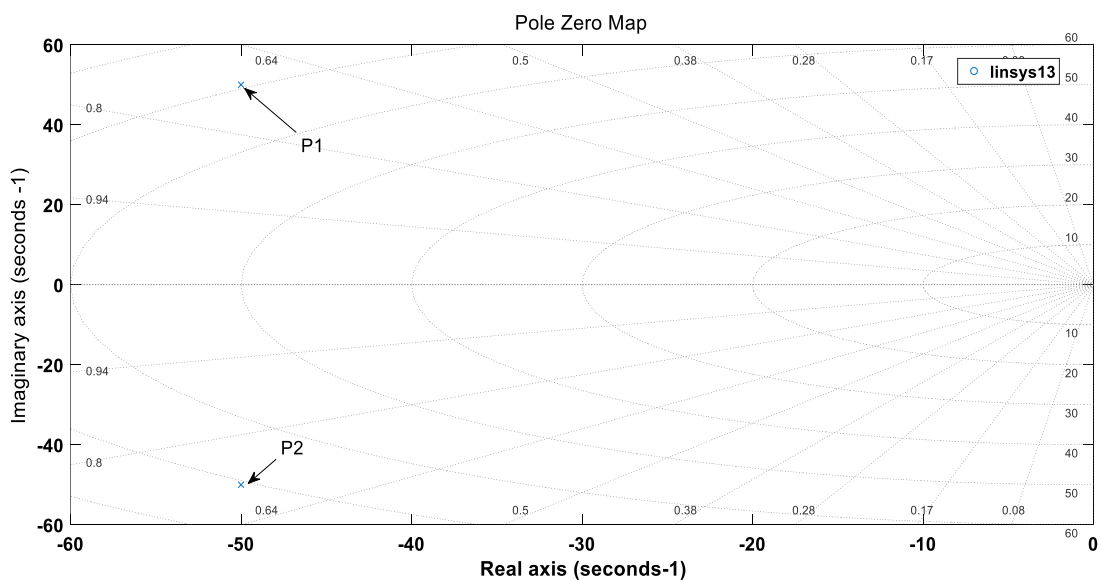


Figura 2.14 Repartizarea polilor și zerourilor sistemului

2.6. Aspecte generale privind reglarea adaptivă a sistemelor electromecanice

2.6.1. Probleme ale implementării algoritmilor adaptivi în controlul SEM

La implementarea practică a unui SEM adaptiv apar multe dificultăți generate, atât de ipotezele în care s-a dezvoltat teoria, cât și de echipamentele pe care se implementează algoritmi. Astfel, pe lângă algoritmul propriu-zis, obținut printr-o procedură de proiectare, trebuie să fie luate în considerație situațiile specifice pornirii, opririi, comutării regimurilor de funcționare manual și automat etc. [73, 74]. Multe dintre aceste aspecte practice au soluții ad-hoc, care adesea depind de aplicația considerată. Ele sunt frecvent verificate prin experimentare **extensive** și simulare. Acest fapt se explică prin prezența unor problemele complexe și lipsa unei teorii adecvate de soluționare.

Unele probleme specifice SEM adaptive trebuie luate în considerare la implementarea acestora și anume:

- informația inițială despre proces și modul de utilizare a acesteia;
- selectarea cerințelor de performanță pentru sistemul de reglare și realizabilitatea acestora;
- robustețea estimării parametrilor și considerarea incertitudinilor structurale prin neglijarea constantelor de timp mici și foarte mici;
- considerarea fenomenelor de comutare fără șocuri de la un regim de funcționare la alt regim de funcționare;
- considerarea neliniarităților introduse de elementele de mașina electrică și de procesul condus.

Multe dintre aceste probleme nu sunt specifice numai reglării adaptive și sunt importante pentru implementarea reguletoarelor în general. Implementarea trebuie să includă multe trăsături care au fost probate cu bune rezultate în practică, însă fără a fi complet acoperite din punct de vedere teoretic.

2.6.2. Concepte de control adaptiv al SEM

În teoria reglării automate moderne, conceptul de control adaptiv al SEM este deseori amintit alături de cel de control robust. Ambele reprezentând metode de reglare ale SEM cu parametrii care au un grad mai mare sau mai mic de incertitudini sau variabili în timp.

Un regulator robust este considerat acel regulator care reușește să păstreze anumite proprietăți (de stabilitate și performanță) ale SEM, chiar și atunci când asupra sistemului se interpun anumite elemente perturbatoare (externe sau interne, variații ale parametrilor procesului).

Proiectarea unui regulator adaptiv este impusă atunci când structura dinamică a SEM este cunoscută, dar pot apărea variații mai lente ale parametrilor fizici.

Indiferent de natura SEM, regulatoarele adaptive sunt neliniare prin construcție. [2, 25, 37]

Deosebirea între cele două tehnici de compensare a acestor variații în cadrul sistemelor este dată de modul de calcul al parametrilor de acord, iar aplicarea fiecărei metode depinde de viteza și domeniul de variație al parametrilor procesului.

Spre deosebire de sistemele adaptive, unde parametrii regulatorului se modifică în mod repetitiv (“online”, în timpul funcționării), în urma variației parametrilor procesului, parametrii regulatorului robust sunt calculați o singură dată, înainte de punerea în funcțiune a sistemului automat. Avantajul regulatoarelor robuste constă în reducerea algoritmului de calcul, acesta efectuându-se o singură dată. Deși, un regulator robust are o acțiune mai rapidă decât cea a unui regulator adaptiv, în momentul modificărilor parametrice ale procesului condus, este obligatorie cunoașterea domeniului de variație a acestora. Astfel, în cazul unor modificări parametrice mai lente într-un domeniu mai mare și necunoscut se impune folosirea regulatoarelor adaptive, mai ales dacă structura procesului este cunoscută.

Soluțiile de conducere în cadrul sistemelor adaptive au la bază două tehnici de adaptare parametrică: sisteme adaptive cu model de referință SAMR (Model Reference Adaptive System MRAS), cu structura generală de reglare din figura 2.15, și sisteme adaptive cu autoreglare sau autoacordare SAA (Self-tuning Adaptive System SAS), cu structura prezentată în figura 2.16.

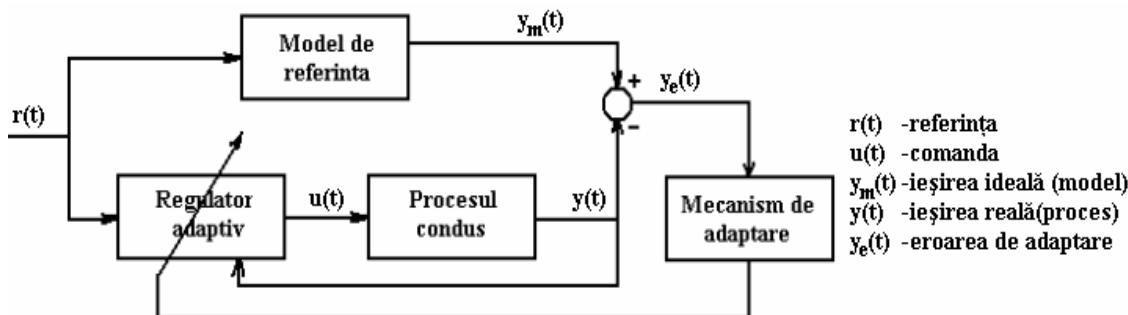


Figura 2.15. Structura generală a unui sistem adaptiv cu model de referință (direct) [25, 31]

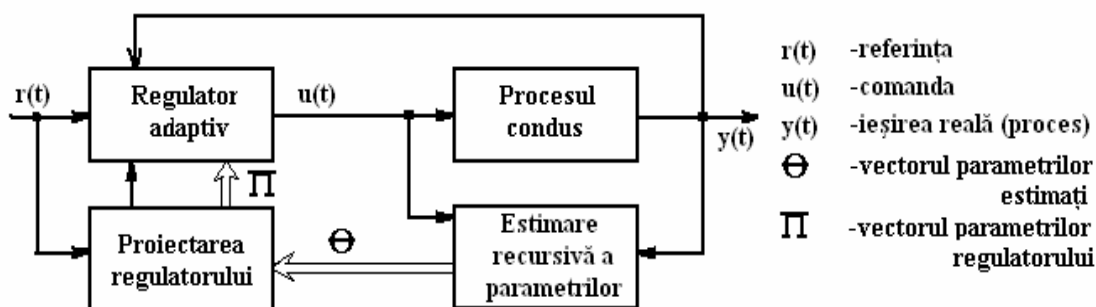


Figura 2.16. Structura generală a unui sistem adaptiv cu autoacordare (indirect) [73, 75, 76]

În cazul primei tehnici se alege un model de referință (denumit și model etalon), reprezentând funcționarea dorită a SEM și se ajustează parametrii de acord ai regulatorului pe baza erorii dintre ieșirea procesului și ieșirea modelului etalon. Mecanismul de adaptare trebuie să asigure convergența la zero a erorii de adaptare (de urmărire).

În cazul celei de-a doua tehnici, se realizează identificarea în timpul funcționării (“online”) a parametrilor procesului și pe baza estimațiilor obținute se actualizează coeficienții unei legi de reglare cu structură fixată (alocare de poli, regulatoare PID, regulatoare liniar pătratice, varianță minimă).

Cele două tehnici s-au dezvoltat independent și păreau a fi total diferite. Diferența consta în faptul că, tehnicile de proiectare cu model etalon au fost elaborate, inițial, pentru conducerea proceselor deterministe continue, în timp ce regulatoarele cu autoacordare au fost utilizate, de regulă, pentru conducerea sistemelor discrete stocastice.

În prezent a fost pusă în evidență legătura dintre cele două abordări ale tehnicilor de conducere adaptivă. Spre exemplu, ambele metode adaptive au două bucle de reglare: una interioară (denumită buclă ordinară de reglare) și una exterioară (buclă de ajustare a parametrilor sau structurii regulatorului având la bază informațiile funcționale ale procesului). Evident metodele de proiectare ale buclei interioare și tehnicile de ajustare ale parametrilor regulatorului adaptiv sunt diferite pentru cele două scheme de adaptare. Din punct de vedere al modalității de calcul a parametrilor regulatorului adaptiv sistemele adaptive pot fi sisteme adaptive directe sau sisteme adaptive indirecte. La sistemele adaptive indirecte parametrii regulatorului adaptiv sunt determinați pe baza parametrilor estimați ai procesului (în mod indirect) și deci are loc o translație de la parametrii procesului la cei ai regulatorului. Dacă însă se poate realiza o reparametrizare (directă) a procesului astfel încât acesta să conțină și parametrii regulatorului se obține un sistem adaptiv direct. [72]

În subcapitolul următor vom aborda doar sistemele adaptive cu model de referință directe, acestea având o importanță mare în cercetarea sistemelor inteligente adaptive (sisteme fuzzy adaptive) de tip FMRLC.

Sisteme adaptive cu model de referință (MRAS).

Sistemele adaptive cu model etalon, sunt în general compuse din patru blocuri componente:

- procesul condus (cu parametrii necunoscuți);
- modelul de referință (etalon);
- regulatorul adaptiv (cu parametrii ajustabili);
- mecanismul de adaptare (pentru ajustarea parametrilor regulatorului).

Modelul de referință (etalon) din cadrul sistemelor adaptive de acest tip caracterizează comportarea dorită a sistemului, furnizând la ieșire semnalul $y_m(t)$. Astfel, același semnal de intrare $r(t)$ este aplicat atât modelului ideal, cât și construcției regulator adaptiv-proces. Sistemele adaptive cu model de referință se impun în domeniul sistemelor automate în special, când parametrii procesului sunt constanți, dar necunoscuți sau atunci când aceștia variază lent (pe intervale mari de timp) în comparație cu dinamica adaptării, dar suferă modificări importante sub acțiunea unor perturbații parametriche. Spre deosebire de sistemele adaptive cu model de referință trebuie recunoscută, totuși, superioritatea sistemelor adaptive cu autoacordare. Principalul avantaj fiind flexibilitatea acestora prin crearea multiplelor posibilități de cuplare ale metodelor de proiectare ale reguletoarelor și de estimare ale modelelor proceselor.

Mecanismul de ajustare al sistemelor adaptive cu model etalon asigură o stabilitate și o convergență superioară sistemelor autoacordabile, deoarece rolul acestuia este modificarea parametrilor ajustabili ai regulatorului adaptiv, încât, acesta să furnizeze o comandă $u(t)$, în scopul reducerii erorii de adaptare $y_e(t)$, dintre ieșirea procesului $y(t)$ și ieșirea modelului etalon $y_m(t)$.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y_e(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - y_m(t)) = 0 \quad (2.58)$$

Reguletoarele adaptive sunt parametrizate și destinate unor clase de procese (cu structură cunoscută). În situația cunoașterii exacte a parametrilor procesului s-ar crea condiții pentru determinarea facilă a parametrilor regulatorului, pentru că ieșirea procesului condus să fie una identică cu ieșirea modelului etalon. Totodată, atunci când legea de reglare este liniară în parametrii ajustabili regulatorul, la fel, este liniar parametrizat.

Dificultățile problemei de conducere adaptivă, indiferent de tehnicile utilizate, provin din faptul că instalația tehnologică (procesul condus) reprezintă o necunoscută, o “cutie neagră” pentru care sunt disponibile doar informațiile funcționale (semnale de intrare și ieșire). Respectiv, din generarea legii de comandă care asigură parametrii regulatorului să tindă către valorile ideale (dorite), rezultă o convergență a erorii de adaptare y_e la 0.

Într-o formulare generală, problema conducerii adaptive a unui proces supus acțiunilor perturbațiilor constă în determinarea, la fiecare moment de timp t , a semnalului de comandă $u(t)$, care stabilizează sistemul în buclă închisă și minimizează abaterea, precum și eroarea de adaptare $y_e(t)$ dintre mărimea de ieșire din procesul condus și mărimea de ieșire din modelul etalon ales. Respectiv, este necesară satisfacerea unor condiții suplimentare precum [73, 76]:

- determinarea semnalului de comandă $u(t)$ se face doar, prin utilizarea informațiilor funcționale disponibile, pentru intrare în procesul condus $\{u(\tau), \tau \leq t\}$ și pentru ieșire din procesul condus $\{y(\tau), \tau \leq t\}$;

- regulatorul adaptiv este un sistem dinamic cauzal;
- parametrii ajustabili ai regulatorului să ia doar valori care să asigure convergența din formula 2.58.

Structura generală a sistemului adaptiv cu model etalon, prezentată în figura 2.14, a fost propusă prima oară de Whitaker, Yamron și Keezer în anul 1958. Totodată, formularea problemei de adaptare a parametrilor regulatorului cu scopul obținerii unui răspuns al procesului identic cu cel al modelului etalon este cunoscută ca problema de urmărire a modelului etalon. Alte studii în domeniul sistemelor adaptive au fost efectuate ulterior de Parks, Butchart, Hang, Monopoly, Landau, Ionescu, Wittenmark, Sastry, Bodson, Ioannou, Stoica, Tao etc. [77]

Principalele metode de analiză și sinteză a sistemelor adaptive cu model etalon sunt:

- metoda gradientului, cunoscută și sub denumirea de regula MIT;
- metoda bazată pe teoria stabilității Lyapunov.

2.7. Strategii de reglare Fuzzy adaptive a acționărilor electrice

Deși fiecare din cele două strategii de reglare (adaptivă convențională și fuzzy inteligentă) au adus îmbunătățiri în domeniul ingineriei reglării automate, modernizându-l, acestea au înregistrat și unele limite. Spre exemplu, sistemele de reglare inteligente fuzzy, deși utile în multe aplicații de control a SEM unde teoria clasică nu poate fi aplicată, înregistrează unele probleme de proiectare și funcționare.

Alegerea mulțimilor de bază ale mărimilor de intrare și ieșire, funcțiile de apartenență și proiectarea bazei de reguli depinde de expertul uman și de modul în care acesta prelucrează lingvistic informațiile despre proces. În plus, este posibil/ se creează posibilitate ca un regulator deja proiectat să funcționeze în condiții nominale și să nu ofere aceleași rezultate în cazul unor variații semnificative ale parametrilor procesului.

În situația creării condițiilor unei reactualizări și modificări on-line a parametrilor regulatorului atunci performanțele sistemului în buclă închisă s-ar îmbunătăți, având de-a face cu o tehnică de control fuzzy adaptivă. Această tehnică reprezintă o soluție care combină, practic, algoritmi soft-computing (bazați pe logica fuzzy) cu metodele adaptive de învățare, obținând metode de control aproape optimale.

Deci, un regulator fuzzy adaptiv posedă avantaje moștenite atât de la sistemele inteligente fuzzy, cât și de la sisteme adaptive, pentru a controla sisteme neliniare, cu parametri variabili în timp și cu o structură parțial cunoscută. [78]

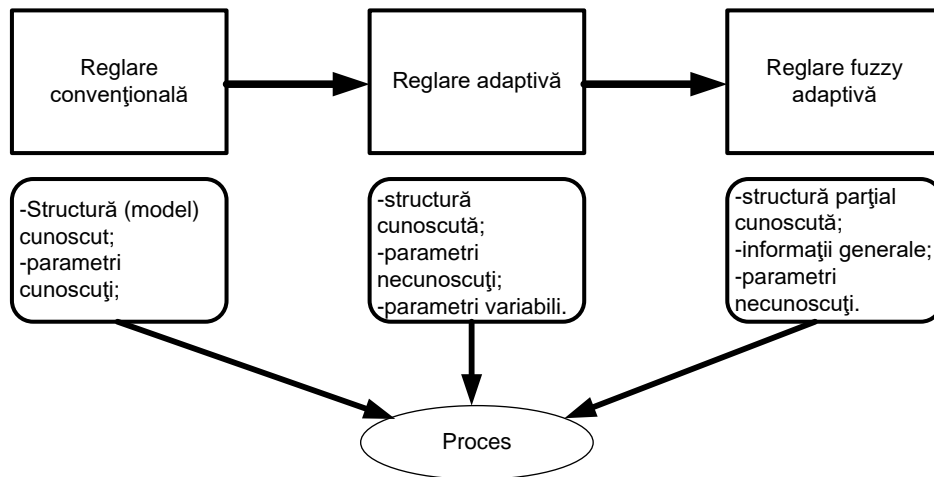


Figura 2.17. Tipuri de strategii de reglare a SEM. [78]

În acest subcapitol sunt prezentate câteva scheme generale de reglatoare inteligente adaptive întâlnite în literatura de specialitate și structura de bază a unui sistem de reglare fuzzy adaptiv cu model etalon (Fuzzy Model Reference Learning Control FMRLC).

2.7.1. Scheme generale de reglare Fuzzy adaptive a SEM

În acest subcapitol sunt prezentate câteva exemple de scheme principiale de control fuzzy adaptiv și elemente de inițiere, ceea ce se va concretiza în structura sistemului de reglare fuzzy adaptivă cu model etalon.

Îmbunătățirea performanțelor sistemelor de reglare automată, având la bază reglatoarele fuzzy cvasi-PID, poate fi asigurată prin modificarea structurii acestora, utilizând două reglatoare fuzzy cvasi-PID standard (indiferent, cu integrare pe intrare sau ieșire) în conexiune paralel, cu acțiune alternativă asupra procesului. [79, 80]

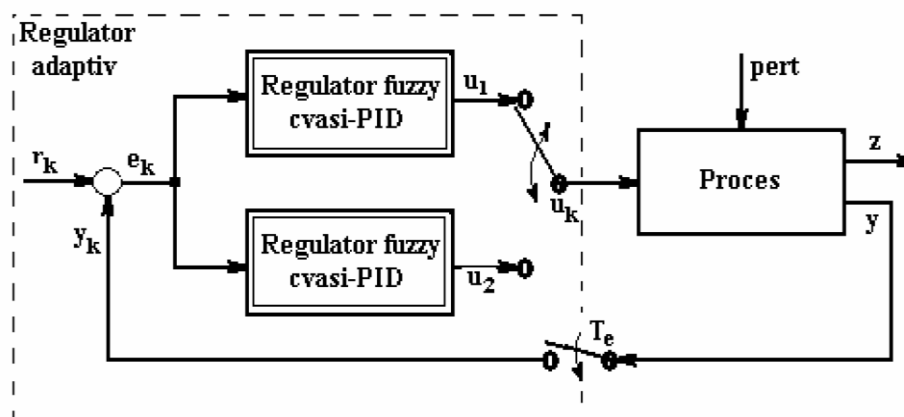


Figura 2.18. Reglatoare fuzzy cvasi-PID cu structură variabilă [31, 34]

În cazul regulatorului cu structură variabilă (figura 2.18), constatăm că unul dintre reglatoare standard acționează când modulul erorii de reglare este mai mare de o valoare limită, iar celălalt, în momentul, când modulul erorii de reglare coboară sub această limită. Parametrii

fuzzy ai reguletoarelor pot fi, de fapt, factorii de scalare ai mulțimilor de bază ale mărimilor de intrare și ieșire.

Un alt tip de reglator adaptiv este cel care utilizează strategia de adaptare a parametrilor fuzzy. Parametrii unui reglator fuzzy care pot fi luați în considerare pentru adaptarea acestuia la noi condiții de funcționare sunt:

- funcțiile de apartenență (pentru variabile intrare și ieșire);
- factorii de scalare ai mulțimilor de bază (pentru variabile intrare și ieșire);
- conținutul bazei de reguli.

Mărimile folosite în cazul adaptării parametrilor reglatorului fuzzy sunt:

- ✓ eroarea de reglare;
- ✓ derivata erorii de reglare;
- ✓ valoarea comenzii;
- ✓ alte mărimi (eventual de stare) ale procesului.

În contextul în care avem un reglator fuzzy cvasi-PID standard, structura unui sistem adaptiv cu parametrii reglatorului variabili după o strategie este reprezentată în figura 2.19. [81, 79]

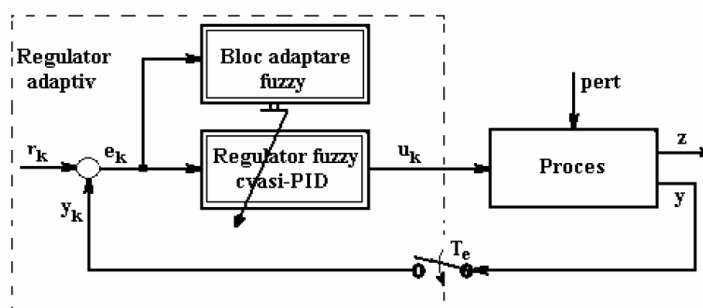


Figura 2.19. Reguletoare fuzzy cvasi-PID cu parametrii variabili pentru SEM [2, 79, 81]

Ieșirea blocului de adaptare poate fi factorul de scalare al uneia din mulțimile de bază sau chiar unul din parametrii reglatorului PID (de exemplu factorul proporțional K_r).

În practică identificăm și o variantă derivată a sistemului adaptiv din figura 2.18. Aceasta se caracterizează prin faptul că reglatorul fuzzy cvasi-PID standard este înlocuit cu un reglator convențional PID proiectat inițial după metode clasice de proiectare. Acesta fiind dependent de modificările condițiilor de funcționare ale procesului creează condiții optime de modificare on-line a parametrilor reglatorului PID după o strategie fuzzy. În această situație este necesară prezența mai multor blocuri de adaptare fuzzy. Fiecare, bloc de adaptare, ajustează câte un parametru al reglatorului convențional (K_p , K_i , K_d).

Aceste tipuri de reguletoare bazate pe logica fuzzy nu reprezintă o soluție care garantează performanțe superioare reguletoarelor convenționale. Chiar mai mult, aceste reguletoare moderne

nu asigură stabilitatea și robustețea sistemelor de reglare automată, deoarece proprietățile date sunt bazate pe modul de întocmire al mulțimilor de bază ale variabilelor lingvistice și pe o baza de reguli, deci pe experiența și cunoștințele umane.

Totuși studiile realizate în ultimii ani s-au axat pe dezvoltarea și perfecționarea acestui domeniu. O variantă de bază de implementare a strategiei fuzzy adaptive este prezentată în figura 2.20.

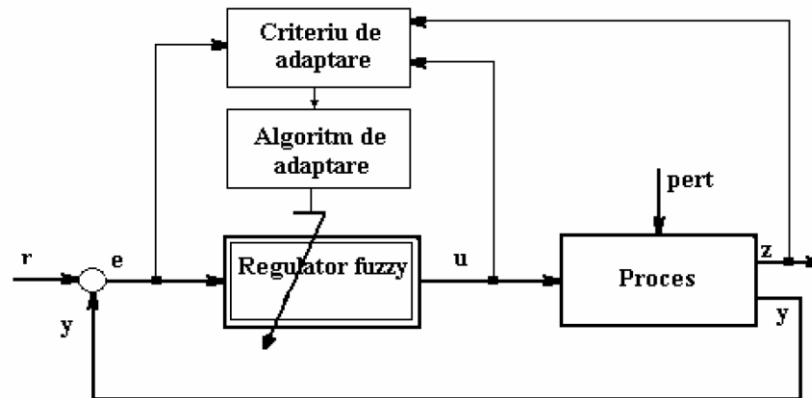
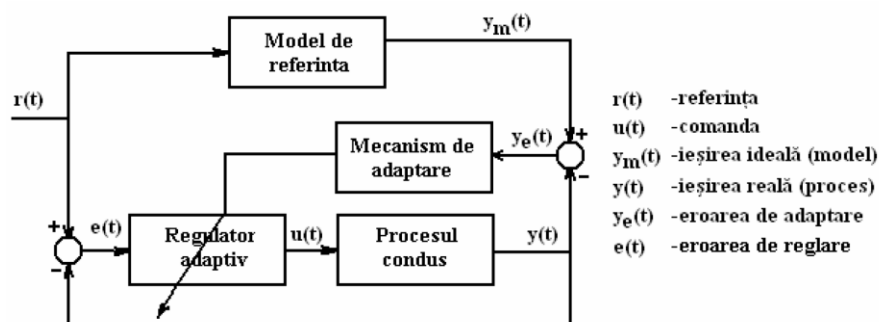


Figura 2.20. Sistem de reglare fuzzy adaptiv [2, 73, 76, 78, 82]

2.7.2. Sistem de reglare Fuzzy adaptiv cu model de referință

În subcapitolul precedent a fost abordată structura unui sistem adaptiv cu model etalon. În condițiile în care în schema de reglare (reprezentată în figura 2.21) conține un regulator inteligent de tip fuzzy vom obține un sistem modern de reglare, denumit sistem fuzzy adaptiv cu model etalon. Se poate realiza// Totodată, în situația când putem realiza o reparametrizare, ajustare directă a parametrilor regulatorului, deci a anumitor parametri ai sistemului direct din datele măsurate din proces de către mecanismul de adaptare atunci se obține un sistem fuzzy adaptiv direct.



- $r(t)$ -referința
- $u(t)$ -comanda
- $y_m(t)$ -ieșirea ideală (model)
- $y(t)$ -ieșirea reală (proces)
- $y_e(t)$ -eroarea de adaptare
- $e(t)$ -eroarea de reglare

Figura 2.21. Sistem de reglare fuzzy adaptiv direct cu model de referință [2, 34, 35]

Performanțele dorite ale sistemului în buclă închisă sunt introduse cu ajutorul modelului etalon (de referință). Regulatorul ajustabil va căuta să asigure o funcționare a sistemului în buclă închisă identică cu funcționarea modelului etalon. Noțiunea de adaptare poate fi asociată

capacității de învățare a sistemului adaptiv. Învățarea, abilitatea de îmbunătățire a proprietăților sistemului automat, capacitatea de a raționa clasifică acest tip de sistem în domeniul sistemelor inteligente.

În acest subcapitol se prezintă structura și modul de proiectare a unui sistem de reglare fuzzy cu învățare cu model etalon (Fuzzy Model Reference Learning Controller FMRLC) care face parte din categoria sistemelor adaptive. Evident acest sistem poate oferi performanțe superioare sistemelor adaptive sau sistemelor inteligente fuzzy, în condițiile proiectării corecte.

Un sistem care posedă abilități de învățare are capacitatea de a-și îmbunătății performanțele prin informațiile obținute prin interacțiunea cu mediul. Noțiunea de învățare deosebește regulatorul FMRLC de regulatoarele adaptive convenționale prin faptul că, acesta va realiza pe lângă adaptarea parametrilor și o memorare a valorilor, cunoștințelor acordate în trecut. În literatura de specialitate este dovedit că regulatoarele adaptive clasice folosite în special în cazul proceselor liniare cu parametri necunoscuți își modifică (reactualizează) parametrii regulatorului fără a cunoaște dacă situația actuală (la un moment dat) a mai fost înregistrată.

Sistemele de control fuzzy, adaptive sau nu, fac parte din categoria metodelor speciale soft-computing, adică a metodelor care necesită o implementare în baza unui sistem de calcul. Acest fapt ne impune să folosim și semnale discrete.

Structura sistemului de reglare fuzzy cu învățare cu model de referință FMRLC este reprezentată în figura 2.22. [78, 83, 84, 85]

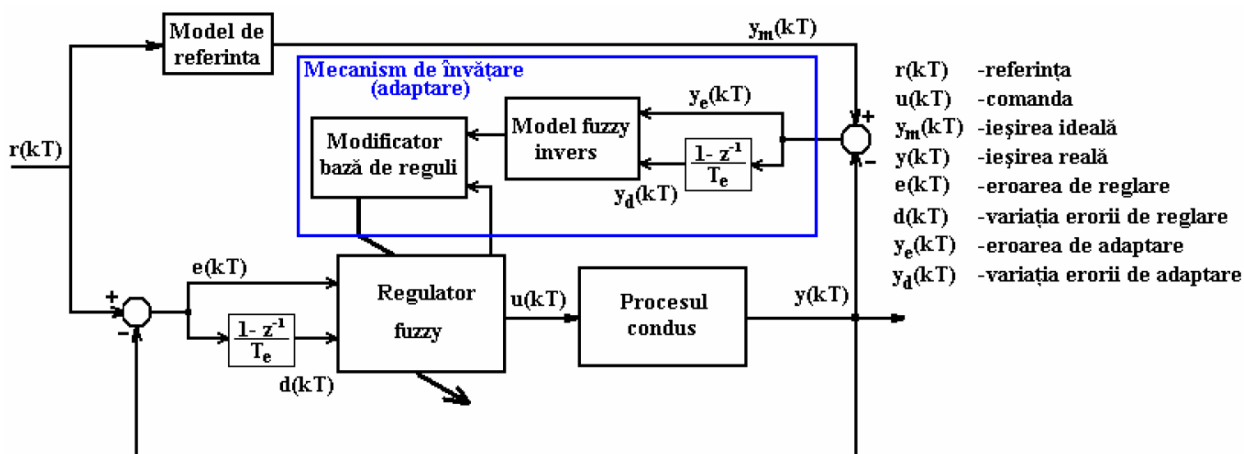


Figura 2.22. Sistem de reglare fuzzy cu învățare cu model etalon (FMRLC) [31,81]

Acest sistem adaptiv modern conține patru părți importante:

- procesul;
- regulatorul fuzzy;
- modelul de referință;
- mecanismul de învățare (sau de adaptare).

Sistemul de reglare cu FMRLC utilizează mecanismul de învățare pentru a observa informațiile din proces și modul de funcționare al sistemului fuzzy. Aceste date sunt folosite, ulterior, cu scopul de a ajusta parametrii sistemului de reglare inteligent pentru îndeplinirea performanțelor cerute sistemului construit, performanțe introduse prin modelul etalon.

Practic, se poate afirma, că sistemul de reglare rezolvă două probleme de urmărire corespunzătoare celor două bucle din figura 2.22. Sistemul de reglare fuzzy acționează prin bucla de reglare inferioară și prin comanda $u(kT)$, încât ieșirea sistemului $y(kT)$ să urmărească intrarea $r(kT)$. Sistemul adaptiv de reglare (în special mecanismul de învățare) încearcă să ajusteze parametrii regulatorului fuzzy pentru ca sistemul în buclă închisă (caracterizat prin semnalele $r(kT)$ și $y(kT)$) să se comporte asemeni sistemului de referință (caracterizat prin $r(kT)$ și $y_m(kT)$), deci pentru ca ieșirea sistemului $y(kT)$ să urmărească ieșirea modelului etalon $y_m(kT)$.

Regulatorul fuzzy este unul clasic. Analiza literaturii de specialitate ne permite să afirmăm că aceste regulatoare pot fi fără dinamică sau cu dinamică, dacă sunt atașate blocuri de derivare și integrare pe intrări. Cel mai des sunt întâlnite regulatoarele fuzzy cu dinamică, respectiv cu două intrări și o ieșire (sisteme MISO). Intrările alese cel mai frecvent sunt:

- eroarea de reglare:

$$e(kT) = r(kT) - y(kT) \quad (2.59)$$

- variația erorii de reglare (derivata):

$$d(kT) = \frac{e(kT) - e(kT - T)}{T} \quad (2.60)$$

Adică avem un regulator fuzzy cvasi-PD. Iar prin T se înțelege perioada de eșantionare. Evident că modul de alegere al mărimilor, termenilor și funcțiilor de apartenență ale intrărilor și ieșirilor influențează stabilitatea și performanțele sistemului în buclă închisă.

În scopul scalării/normalizării mulțimilor de bază atașate mărimilor intrare/ieșire se utilizează factori de scalare (amplificări): g_e reprezintă factorul de scalare al erorii de reglare $e(kT)$, g_d reprezintă factorul de scalare al variației erorii $d(kT)$, iar g_u este factorul de scalare al comenzii $u(kT)$.

Valorile factorilor de scalare sunt identificate experimental, în mod euristic, încât, să includă tot domeniul și să nu genereze o saturare a gradelor de apartenență rezultate pentru mărimile de intrare și ieșire din regulator. În condițiile în care valorile sunt necalificative, va fi necesar modificarea acestora înainte de introducerea lor în mecanismul de adaptare.

Baza de reguli este alcătuită, preferabil, din toate combinațiile posibile pentru funcțiile de apartenență (termeni lingvistici) ale intrărilor. Spre exemplu, dacă avem două intrări cu câte 7 termeni lingvistici, atunci, baza de reguli va avea 49 de combinații, dintre care în momentul

funcționării doar câteva din aceste reguli vor fi activate și vor influența concluzia la un eșantion dat.

Funcțiile de apartenență atașate intrărilor sunt constante pentru un regulator FMRLC și sunt alese pentru a acoperi orice situație care poate apărea. În schimb, funcțiile de apartenență ale ieșirii (comenzii) sunt presupuse necunoscute și reprezintă parametrul variabil prin care se ajustează (modifică) de fapt baza de reguli de către FMRLC pentru îmbunătățirea performanțelor. Funcțiile de apartenență ale ieșirii sunt inițializate în mod euristic, pentru ca ulterior ele să fie modificate de mecanismul de adaptare.

Pentru raționamentul fuzzy se alege mecanismul de inferență Mamdani (inferența max-min), iar valoarea *crisp* se obține din valoarea fuzzy prin metoda centrului de greutate. Modelul de referință este elementul prin care sunt introduse în schema funcțională performanțele dinamice dorite pentru sistemul în buclă închisă (sau altfel spus “sistemul ideal”). În general, modelul de referință poate fi discret sau continuu, liniar sau neliniar, variabil în timp sau nu, dar pentru a nu îngreuna implementarea calculelor sunt folosite sistemele de ordin I și II.

Pentru un sistem de ordin I cu factorul de amplificare k și constanta de timp T_I dorite rezultă modelul continuu:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k}{T_I \cdot s + 1} \quad (2.61)$$

Pentru un sistem de ordin II pulsația naturală ω_n și factorul de amortizare ζ dorite rezultă modelul continuu:

$$H(s) = \frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{k \cdot \omega_n}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (2.62)$$

Modelele sistemelor de referință sunt discretizate pentru o implementare discretă în timp, folosind metoda dreptunghiului sau trapezului.

Performanțele sistemului în buclă închisă sunt satisfăcute în condițiile în care mecanismul de învățare sau adaptare reușește să mențină o eroare de adaptare foarte mică în orice moment de timp, și, practic, acest mecanism nu mai produce modificări semnificative ale regulatorului fuzzy.

Eroarea de adaptare este dată de relația:

$$y_e(kT) = y_m(kT) - y(kT) \quad (2.63)$$

Derivata erorii de adaptare este dată de relația 2.64.

$$y_d(kT) = \frac{y_e(kT) - y_e(kT - T)}{T} \quad (2.64)$$

2.8. Proiectarea regulatorului hibrid Fuzzy-PID pentru reglarea vectorială a mecanismului de bobinat cu parametri mecanici variabili

Regulator PID, convențional, nu oferă performanțe acceptabile pentru sistemele cu dinamica incertă și neliniare. Prin urmare, este necesar ajustarea automată a parametrilor regulatorului PID în scopul obținerii unui răspuns satisfăcător. Ajustare automată a controlerului PID este realizată cu ajutorul logicii fuzzy. [29, 86, 87, 88]

Intrările regulatorului fuzzy sunt eroarea (e) și rata de schimbare a erorii (Δe), în timp ce ieșirile sunt coeficienții k_p , k_i și k_d . [31, 41, 88, 99, 100]

În scopul stabilirii gamei de valori posibile la intrare și de ieșire pentru regulatorul fuzzy, coeficienții controlerului PID au fost identificați folosind metoda convențională Zeigler-Nichols. Funcțiile de apartenență ale intrărilor și ieșirilor mulțimii fuzzy sunt prezentate în Tabelul 2.4. Nivelurile variabilelor lingvistice sunt atribuite ca: mare negativ (NB), negativ mici (NS), zero (Z), pozitiv mici (PS) și pozitiv mare (PB).

În mod similar, setul fuzzy pentru schimbare eroare (Δe) este prezentat ca NB, NS, Z, PS, PB. Gamele de valori a acestor intrări sunt $-0.1 - 0.1$ și $-0.1-0.1$ pentru de respectiv.

Figura 2.23 reprezintă schema bloc a unui regulator PID-Fuzzy. Regulatorul hibrid PID-Fuzzy poate fi implementat folosind logica fuzzy și un set de instrumente în mediul Matlab. [48,75, 89, 90, 91, 92, 93]

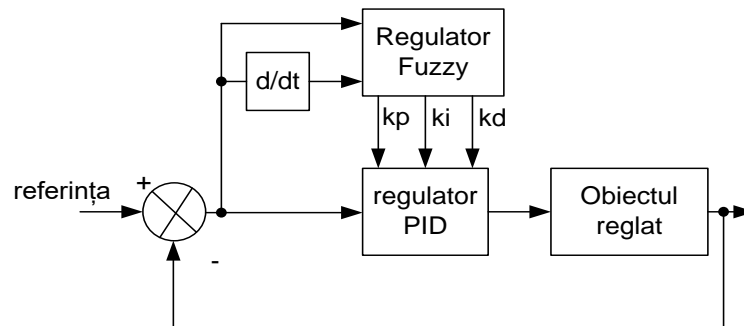


Figura 2.23. Schema bloc a unui regulator hibrid Fuzzy-PID [89,90]

Structura regulatorului fuzzy-PID conține două intrări și trei ieșiri (figura. 2.24).

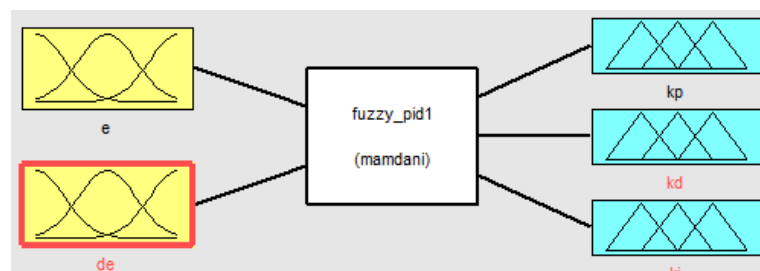
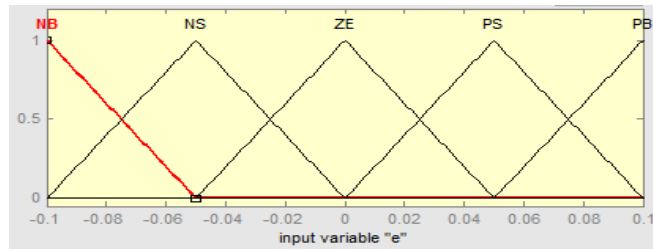
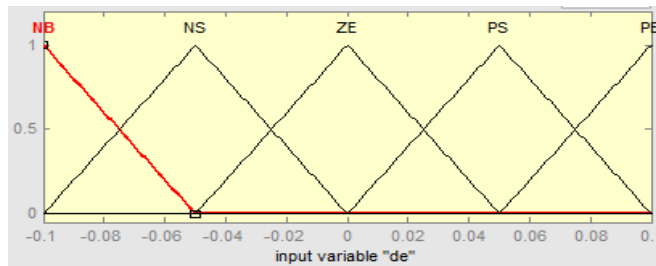


Figura 2.24 Structura regulatorului Fuzzy cu două intrări și trei ieșiri [94, 95, 96]

Funcțiile de apartenență ale variabilelor de intrare ale erorii și derivata erorii sunt prezentate în figura 2.25. unde (mare negativ (NB), negativ mici (NS), zero (Z), pozitiv mici (PS) și pozitiv mare (PB)).



a)



b)

Figura 2.25. Gama de valori a erorii (e) –a), gama de valori a variației erorii (Δe)-b)

Funcțiile de apartenență ale ieșirilor sunt prezentate în figura 2.24. Pentru ieșirile k_p , k_i și k_d scalarea gamei de mulțimi fuzzy a fost realizată cu ajutorul relațiilor prezentate mai jos [50]:

$$k_p^I = \frac{k_p - k_{p,\min}}{k_{p,\max} - k_{p,\min}} \quad (2.65)$$

$$k_i^I = \frac{k_i - k_{i,\min}}{k_{i,\max} - k_{i,\min}} \quad (2.66)$$

$$k_d^I = \frac{k_d - k_{d,\min}}{k_{d,\max} - k_{d,\min}} \quad (2.67)$$

Valorile coeficienților $k_{p\min}$, $k_{p\max}$, $k_{i\min}$, $k_{i\max}$, $k_{d\min}$, $k_{d\max}$, sunt obținute utilizând metoda Zeigler-Nichols și analizând răspunsul în treaptă al sistemului reglat.

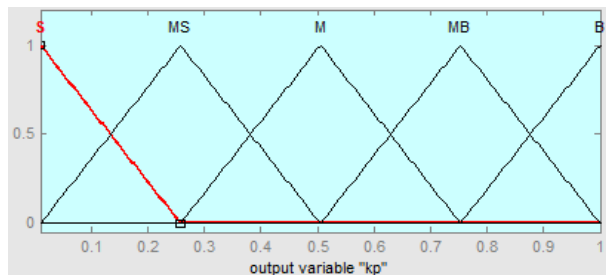


Figura 2.26. Gama de valori pe care o pot obține coeficienții k_p , k_i și k_d la ieșirile regulatorului

Fuzzy

Baza de legi care poate fi utilizată la ajustarea regulatorului PID prin intermediul regulatorului Fuzzy sunt reprezentate în tabelul 2.4.

Tabelul 2.4 Baza de legi pentru regulatorul hibrid Fuzzy-PID[63]

		<i>e</i>				
		NB	NM	Z	PM	PB
<i>de</i>	NB	NB	NB	NM	NM	Z
	NM	NB	NM	NS	Z	PM
	Z	NM	NM	Z	PM	PM
	PM	NM	Z	PM	PM	PB
	PB	Z	PM	PM	PB	PB

2.9. Concluzii la capitolul 2

1. Caracteristica mecanică ale bobinatorului este neliniară, de aceea este necesar utilizare unui sistem de reglare al forței din fir adaptabil în funcție de parametrii bobinei și a firului bobinat.
2. Analiza caracteristicilor mecanice ale trefilorului a demonstrat existența unui moment de rezistență mare la pornire, aproximativ egal cu 120%, la viteze mici de trefilare, determinat de coeficientul mic de alunecare la tambururile de tracțiune, lipsa forței de contratensionare din fir și insuficiența de lichid lubrifiant în filiere la viteze mici.
3. Din analiza caracteristicilor mecanice ale bobinatorului rezultă că pentru menținerea constantă a forței din fir cuplul motorului va crește liniar, iar viteza unghiulară scădea linear.
4. În rezultatul cercetărilor a fost realizată schema sistemului de control vectorial al mecanismului de bobinat, în baza căreia s-a efectuat calculul de optimizare al reguletoarelor sistemului electromecanic al bobinatorului. Pentru analiza stabilității sistemului, în urma calculelor, s-a obținut o funcție de transfer de gradul doi care descrie dinamica sistemului electromecanic al bobinatorului. Conform criteriilor Hurwit z, Bode, Nyquist rezultă că avem un sistem stabil.
5. Introducerea SEM adaptive și inteligente este legată atât de factorul tehnic cât și de rentabilitatea economică. Evaluarea rentabilității se face ținând cont de: ameliorarea calității produselor, creșterea producției, economie de energie, reducerea timpilor de oprire pentru întreținere, detectarea rapidă a unor regimuri anormale de funcționare etc.
6. Pentru reglare al forței din fir la bobinare este necesară o strategie de conducere adaptabilă cum ar fi Fuzzy-PID, adică o informație apriorică mai redusă și modificarea parametrilor în timpul funcționării, utilizând informațiile funcționale ale întregului SEM.

3. MODELAREA SISTEMULUI ELECTROMECHANIC A BOBINATORULUI ÎN MEDIUL MATLAB

3.1. Formularea obiectivelor privind cercetare SEM al mecanismului de bobinat în mediul MatLab/Sim Power System

În acest capitol ca scop principal este cercetarea prin simularea a modelului MatLab SimPowerSystem al SEM a bobinatorului cu motor asincron la reglarea vectorială cu reacție în funcție de valoarea forței de tensionare.

Drept obiective de cercetare am stabilit:

- ✓ Analiza comportamentului sistemului de reglare al forței de tragere în regim tranzitoriu și staționar la includerea în bucla de control a reglatoarelor de tip: PID, Fuzzy și hibrid Fuzzy-PID;
- ✓ Cercetarea procesului tranzitoriu care are loc în mecanismul de bobinat la comanda vectorială cu controlul direct al cuplului;
- ✓ Cercetarea procesului tranzitoriu în cazul când controlăm viteza motorului în timpul accelerării și frânării;
- ✓ Analiza comparativă a variației forței de tensionare a firului la ambele moduri de comandă;
- ✓ Identificarea principalelor concluzii referitor la modul de comandă elaborat și la indicii de calitate ai proceselor tranzitorii cercetate.

3.2. Elaborarea modelului SimPowerSystem al sistemului electromecanic cu controlul direct al cuplului

În figura 3.1 este prezentat modelul SimPowerSystem al sistemului de acționare al mecanismului de bobinat cu control DTC. [96, 99, 100,121,122]

Modelul conține trei subsisteme:

- modulul de acționare al bobinatorului cu motor asincron și convertor de frecvență;
- modulul de control al acționării;
- modulul care conține modelul matematic al bobinatorului.

Fiecare din aceste module în schema din fig.3.1 este reprezentat ca un subsistem.

Modulul acționării bobinatorului conține modelul motorului de acționare și a convertorului de frecvență în SimPowerSystem. Comanda vectorială a acestei acționări se realizează, din considerentul, că, bobinatorul necesită o acționare cu parametri dinamici ridicați, pentru menținerea cât mai constantă a valorii forței de tensionare din fir față de cea prescrisă.

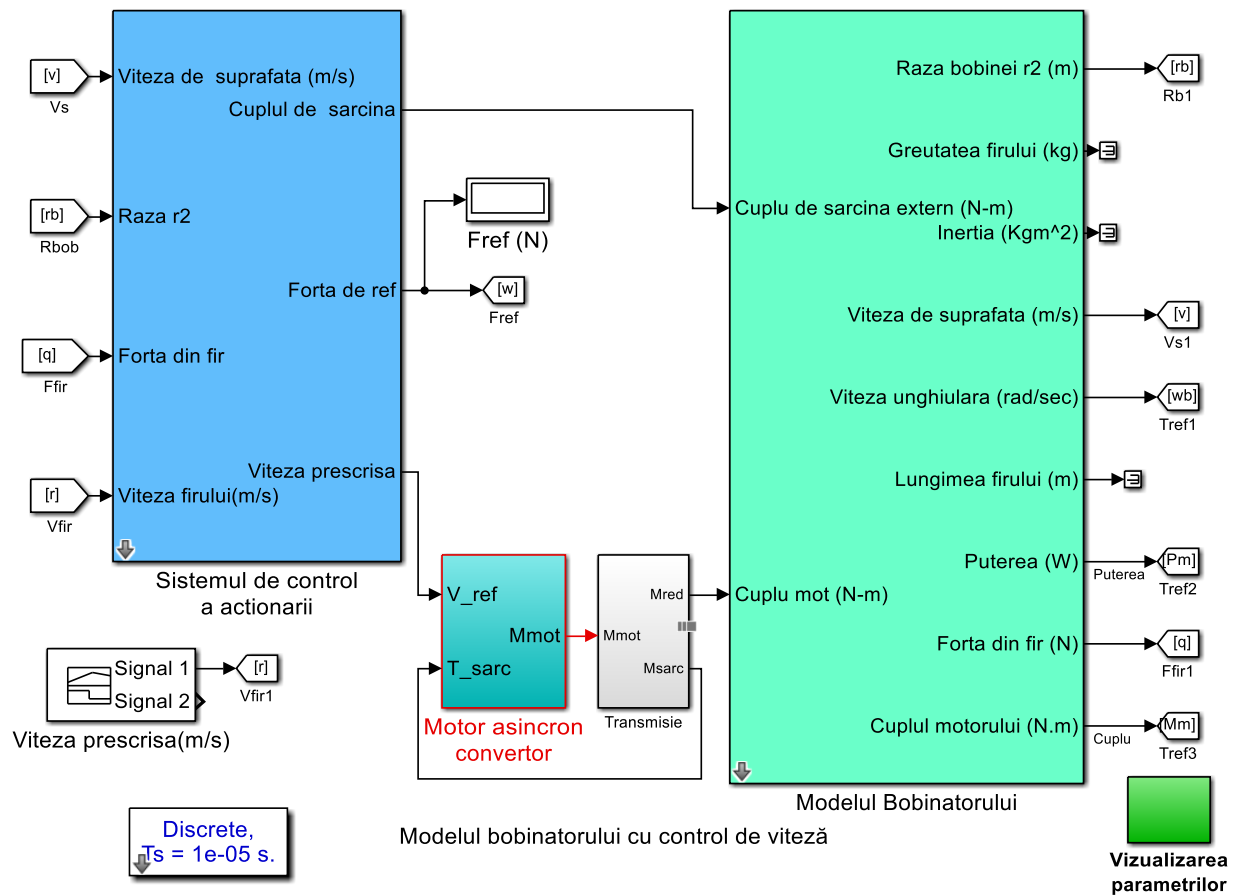


Figura 3.1. Modelul SimPower System al mecanismului de bobinat [18, 26]

Totodată, prin menținerea acestei forțe cât mai aproape de valoarea minimă necesară la bobinarea firului rezultă creșterea eficienței energetice a acestei acționări.

Modelul Simulinc al modulului de control al firului la bobinare este alcătuită din regulatorul PI sau Fuzzy în bucla de reacție după forța de tensionare. Totodată, în acest subsistem se estimează și valoarea cuplului care trebuie să dezvolte motorul pentru a menține constantă forța de tensionare din firul bobinat.

Forța prescrisă în sistem este realizată de un bloc special ce generează un semnal în rampă, valoarea maximă a acestei forțe este limitată de către blocul saturation din model.

Sistemul mai utilizează ca semnal viteza de suprafață a bobinei, viteza liniară a firului și raza bobinei.

Acești parametri sunt utilizați pentru calcularea cuplului ce trebuie să fie dezvoltat de motor pentru a aduce forța din fir la valoarea prescrisă.

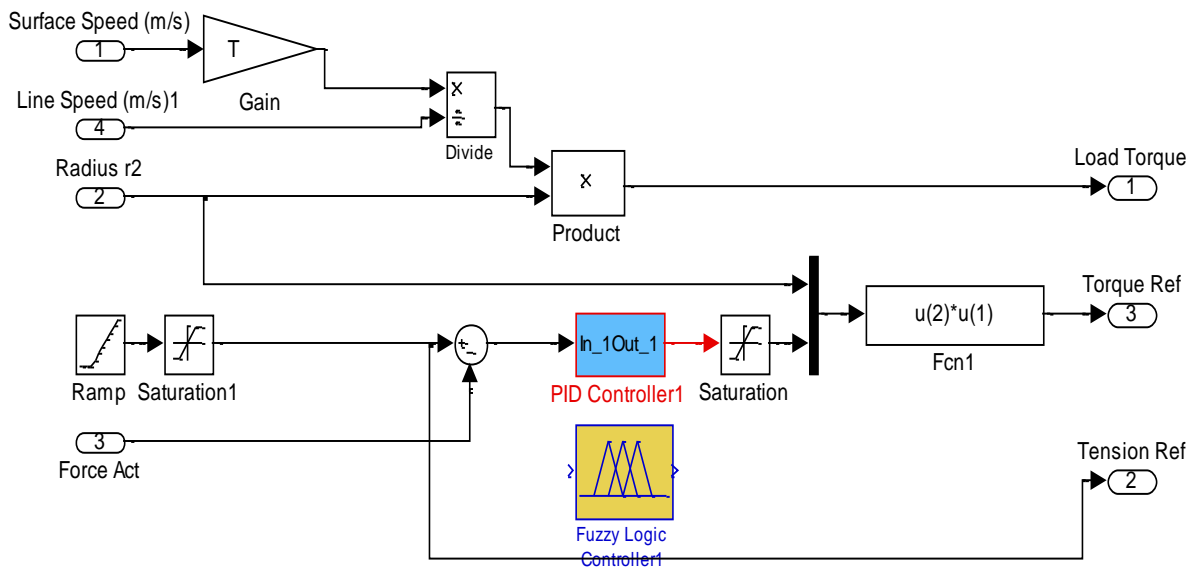


Figura 3.2. Modelul Simulink a modului de control a forței de tensionare a firului la bobinare la comanda DTC a motorului de acționare

În figura 3.3. este reprezentat modelul SimPowerSystem al bobinatorului care conține partea de forță, partea de comandă a convertorului și motorul asincron.

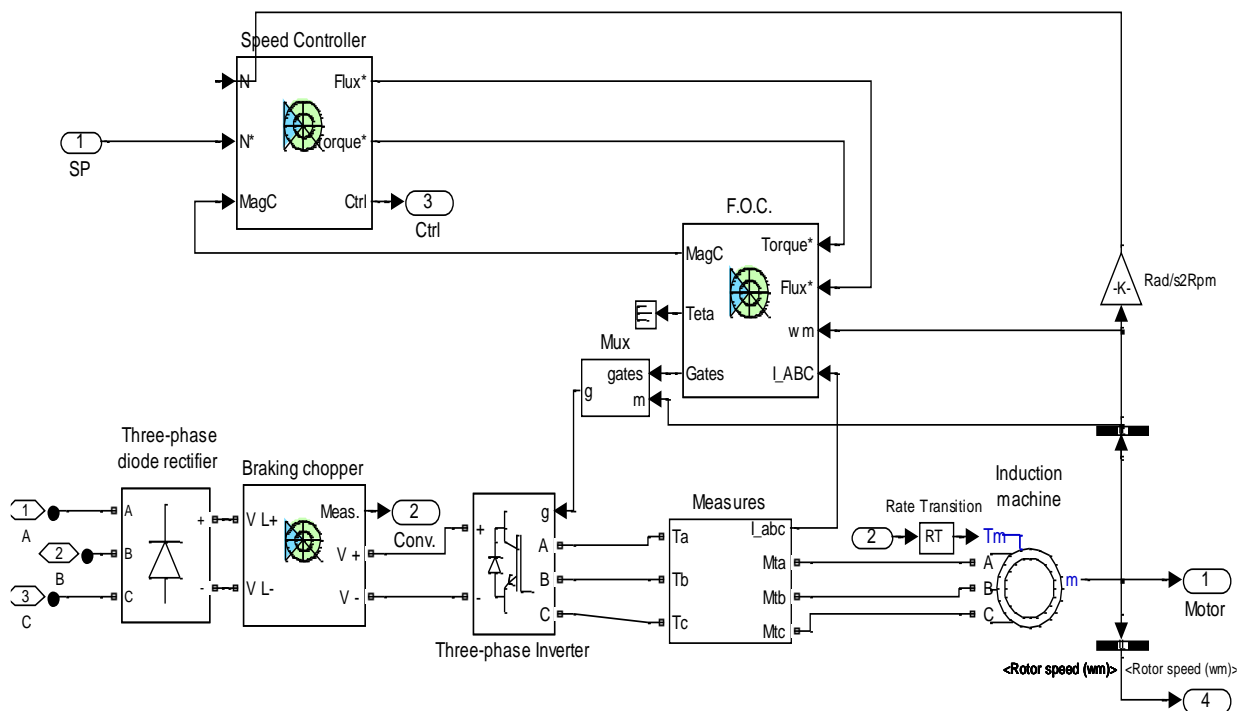


Figura 3.3 Modelul SimPowerSystem al acționării mecanismului de bobinat

În figura 3.4 este reprezentat modelul Simulinc a mecanismului de bobinat:

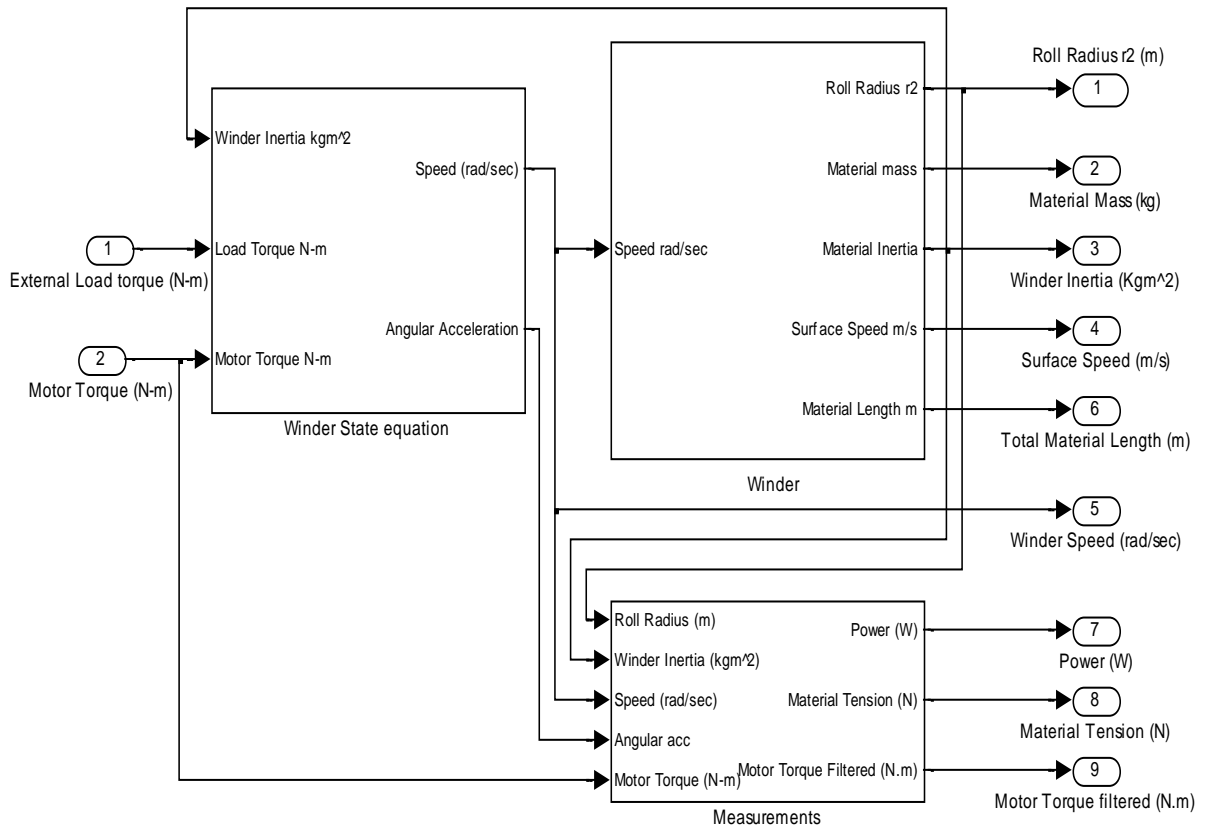


Figura 3.4. Modelul Simulink a mecanismului de bobinat

În figura 3.5. este reprezentat modelul Simulink al bobinei:

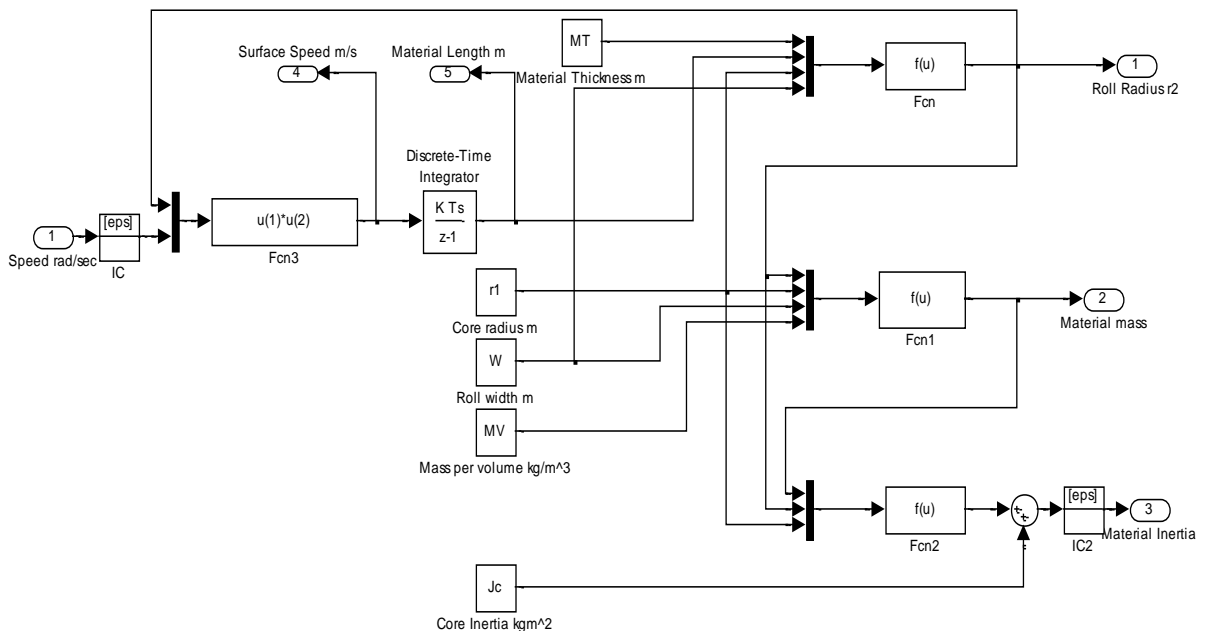


Figura 3.5. Modelul Simulink a bobinei

Modelul matematic al mecanismului de bobinat este reprezentat prin următoarele relații: [48, 49]

$$\left. \begin{aligned} F_T(S) &= (V_{LM2}(S) - V_{LM1}(S)) \cdot \frac{E_{Cu} \cdot S_{cond.}}{L_k(S)} \\ V_{LM2} &= \omega_{M2}(S) \cdot \frac{R_T(S)}{i_{red.}} \\ \omega_{M2}(S) &= M_{din}(S) \frac{1}{J_\Sigma(S)} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

În figura 3.6 este reprezentată interfața modelului bobinatorului, prin intermediul căreia se introduc parametrii constructivi ai bobinei și parametrii geometrici ai firului bobinat.

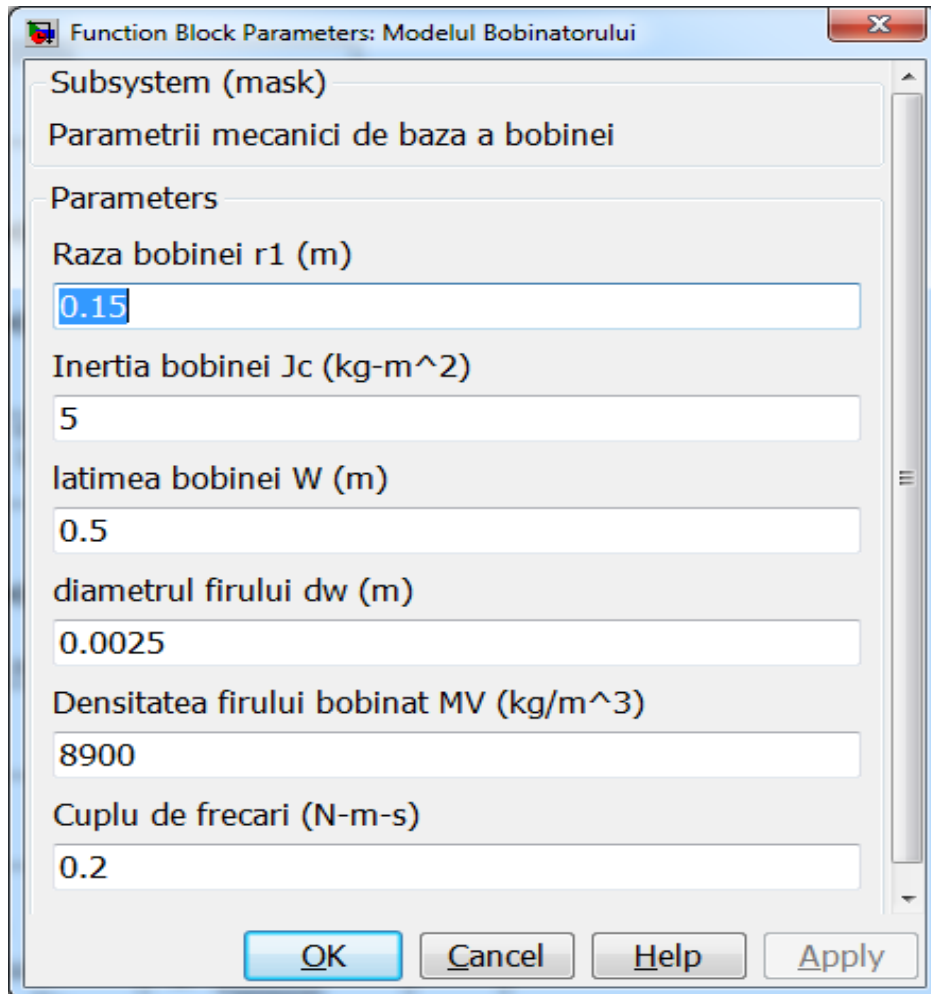


Figura 3.6 Interfața de dialog cu modelul bobinei

3.3. Rezultatele modelării mecanismului de bobinat la control DTC cu regulator PI

Conform modelului SimPowerSystem reprezentat în figura 3.1 se simulează procesele tranzitorii ale sistemului pentru cazul când controlăm cuplul motorului direct și utilizând un traductor de măsurare al forței din fir.

În figura 3.7 este reprezentată variația forței de tensionare a firului față de cea prescrisă de 60 (N) și consumul de energie necesar pentru dezvoltarea acestei forțe la comanda DTC a motorului mecanismului de bobinat cu buclă de reacție în funcție de valoarea forței de tensionare.

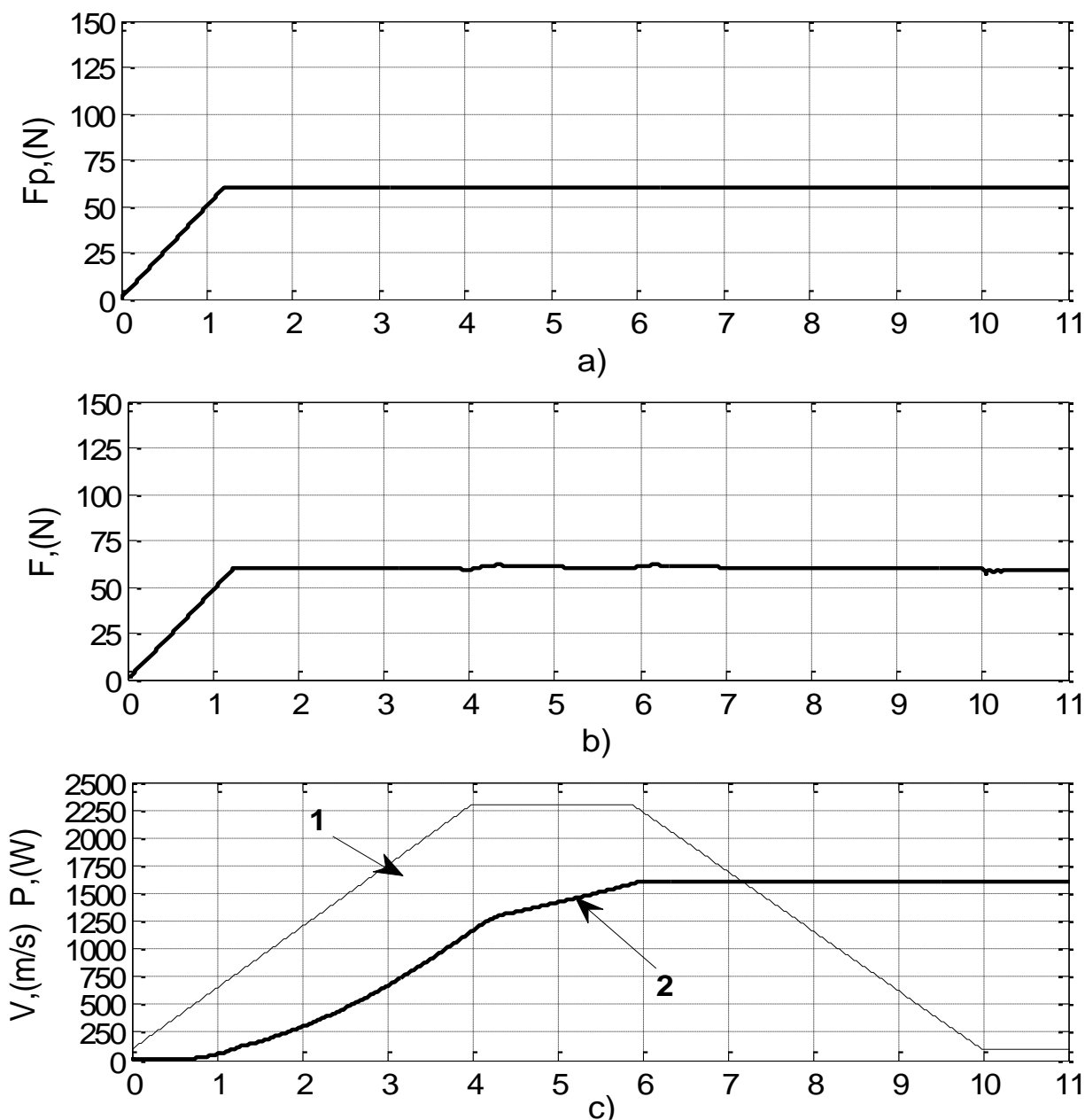


Figura 3.7. Valoarea prescrisă a forței de tensionare de 60 N –a), variația forței de tensionare din firul bobinat-b), variația vitezei liniare a firului, curba 1 consumul de energie necesar pentru a dezvolta forța prescrisă în fir curba 2 -c) pentru aceeași variație a vitezei liniare a firului cu control DTC

În figura 3.8. sunt reprezentate variațiile vitezei unghiulare bobinei, variația cuplului la arborele bobinei și variația puterii mecanice transmise bobinei în regim de accelerare și frânare pentru o forță setată din fir egală cu 120 N.

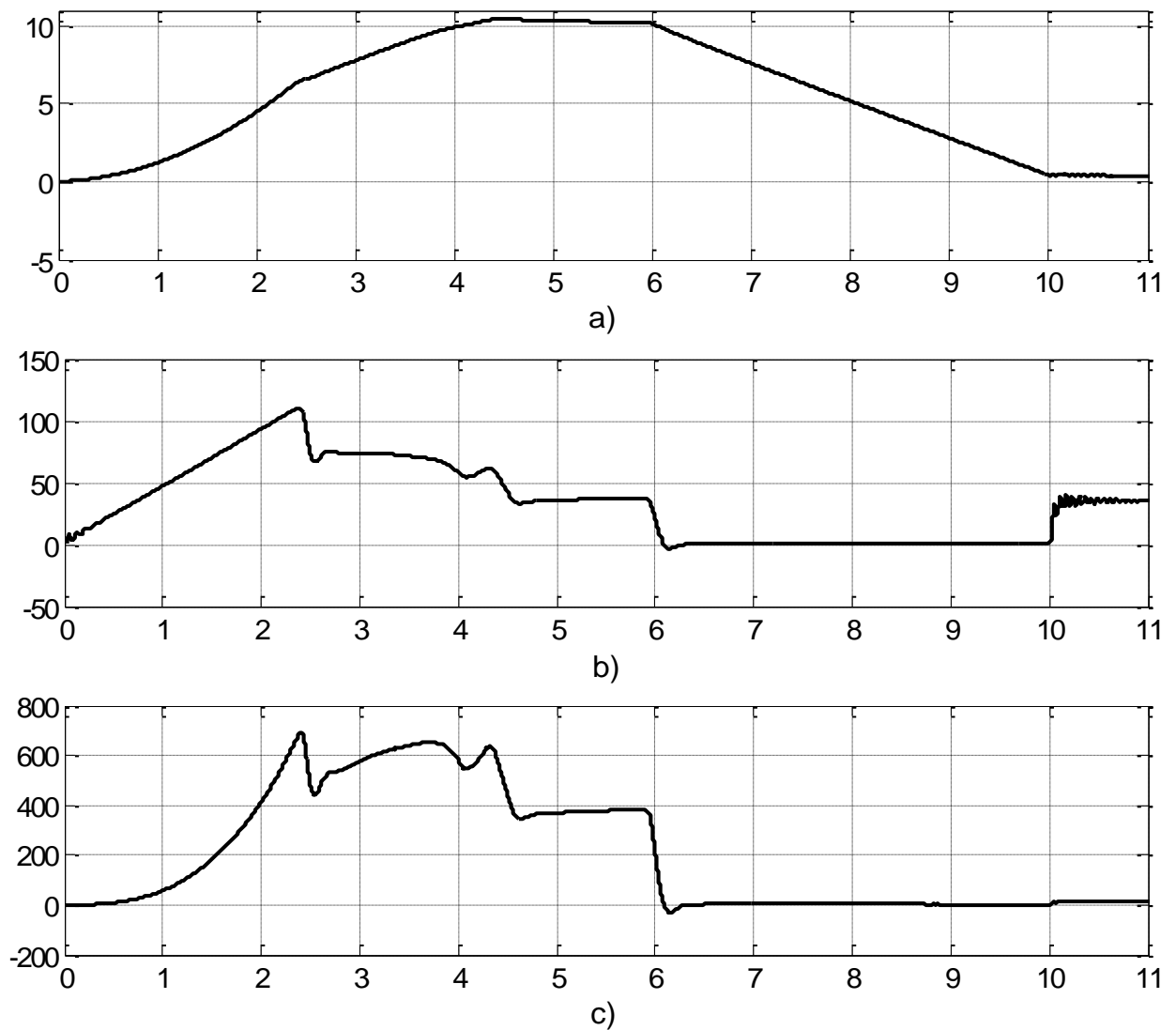


Figura 3.8. Viteza unghiulară a bobinei (rad/s) - a), variația cuplului la arborele bobinei - b) și variația puterii mecanice transmise bobinei - c) în regim de accelerare și frânare

În figura 3.9 este reprezentată variația forței din firul bobinat față de valoarea prescrisă 120 N cu control DTC a acționării și regulator PI unde este reprezentat consumul de energie necesar fig. 3.9 c) pentru a dezvolta forța prescrisă în fir pentru aceeași variație a vitezei liniare a firului.

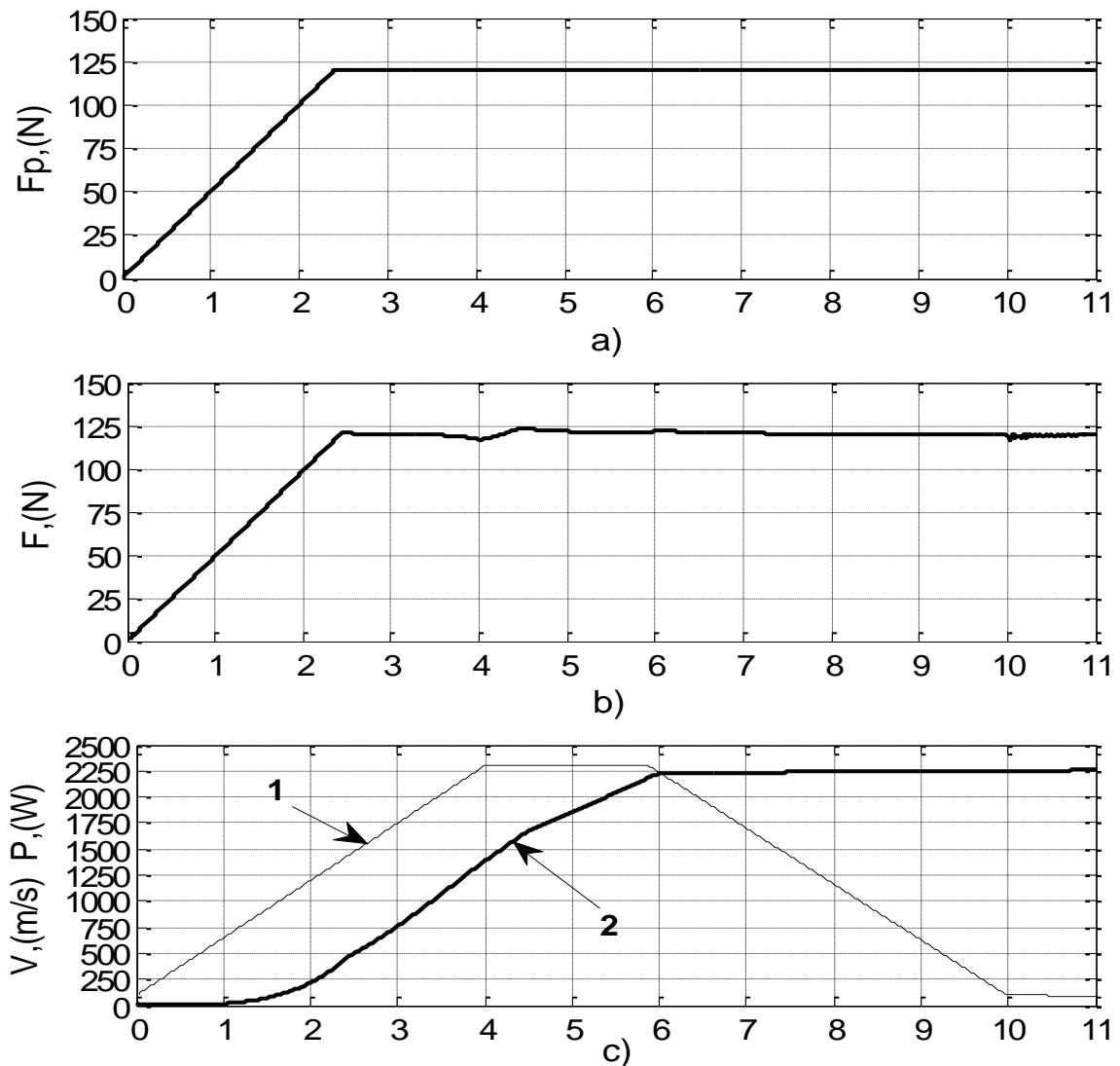


Figura 3.9. Valoarea prescrisă a forței de tensionare de 120 N –a), variația forței de tensionare din firul bobinat-b), variația vitezei liniare a firului curba 1, consumul de energie necesar pentru a dezvolta forța prescrisă în fir curba 2 -c) pentru aceeași variație a vitezei liniare a firului cu control DTC

În fig. 3.10. sunt prezentate rezultatele modelării sistemului cu control DTC și regulator PI al forței de tensionare pentru aceeași variație a vitezei liniare a firului pentru un moment de inerție maxim al bobinei de $22.0 \text{ (kg.m}^2\text{)}$ și o rază maximă de 0.5(m) . unde avem: valoarea prescrisă a forței de tensionare de 120 N –a), variația forței de tensionare din firul bobinat-b), variația vitezei liniare a firului (m/s) înmulțită la coeficientul de scară 750 curba 1, consumul de energie necesar pentru a dezvolta forța prescrisă în fir curba 2 -c).

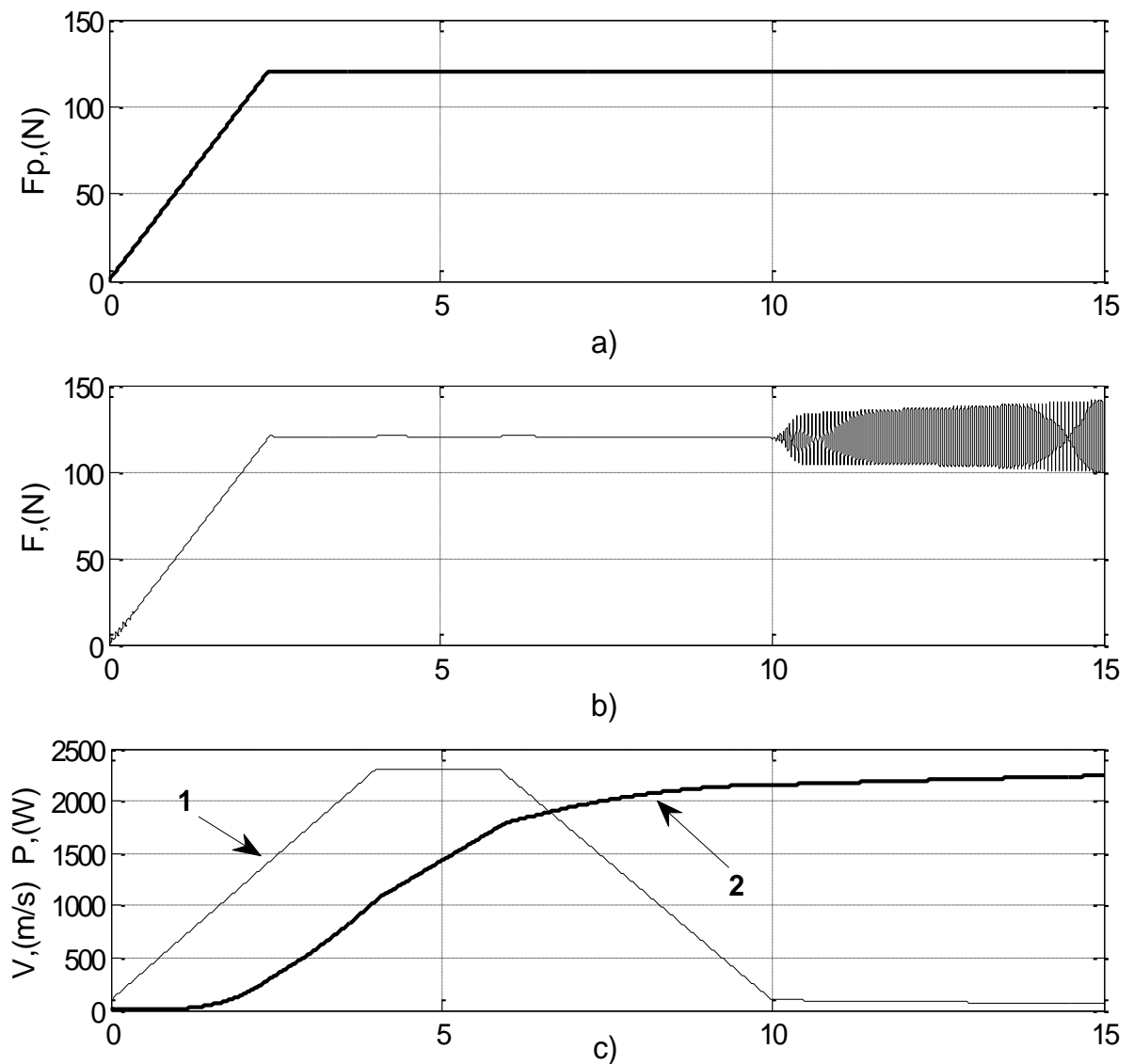


Figura 3.10. Valoarea prescrisă a forței de tensionare de 120 N –a), variația forței de tensionare din firul bobinat-b), variația vitezei liniare a firului ((m/s)/750) curba 1 consumul de energie necesar pentru a dezvolta forța prescrisă în fir curba 2 -c) pentru aceeași variație a vitezei liniare a firului pentru un moment de inerție maxim al bobinei de $22.0 \text{ (kgm}^2\text{)}$ și o rază maximă de 0.5(m) cu control DTC

3.4. Rezultatele modelării mecanismului de bobinat la control DTC cu regulator Fuzzy

În figura 3.11. sunt reprezentate rezultatele modelării sistemului cu control DTC și regulator Fuzzy al forței de tensionare pentru aceeași variație a vitezei liniare a firului pentru un moment de inerție maxim al bobinei de $22.0 \text{ (kg.m}^2\text{)}$ și o rază maximă de 0.5(m) .

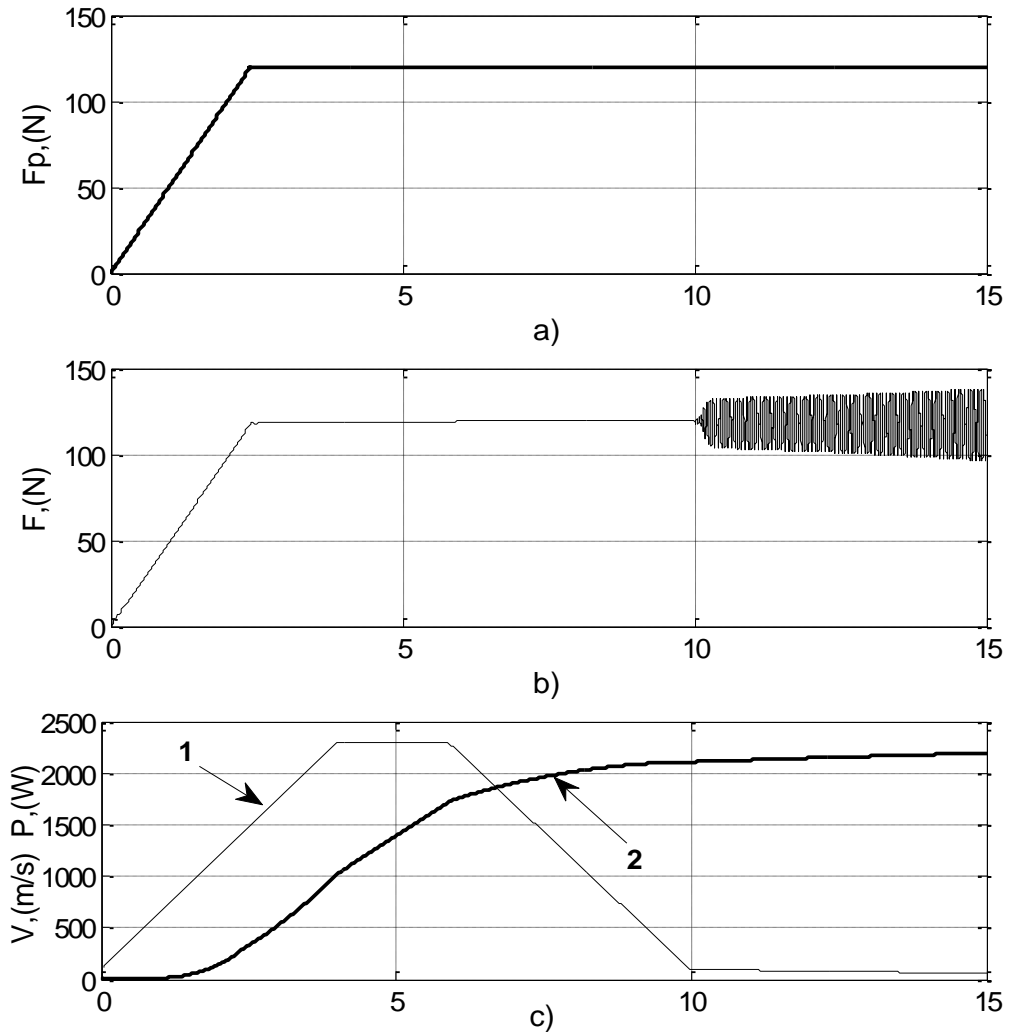


Figura 3.11. Valoarea prescrisă a forței de tensionare de 120 N –a), variația forței de tensionare din firul bobinat-b), variația vitezei liniare a firului (m/s/750) curba 1 consumul de energie necesar pentru a dezvolta forța prescrisă în fir curba 2 -c) pentru aceeași variație a vitezei liniare a firului pentru un moment de inerție maxim al bobinei de $22.0 \text{ (kgm}^2\text{)}$ și o rază maximă de 0.5(m) cu control DTC și regulator Fuzzy.

3.5. Elaborarea modelului sistemului de control al mecanismului de bobinat cu control de viteză și reglatoare Fuzzy

Conform modelului SimPowerSystem reprezentat în fig.3.1 și efectuând modificări în blocul de control al bobinatorului (fig.3.12.) conform modelului matematic al compensatorului dat de relația (2.58) și schemei de control dată în (fig.2.9), se modelează procesele tranzitorii ale sistemului pentru cazul când controlăm viteza motorului și utilizăm un traductor de măsurare a poziției brațului compensator cu role și regulator Fuzzy (Anexa5).

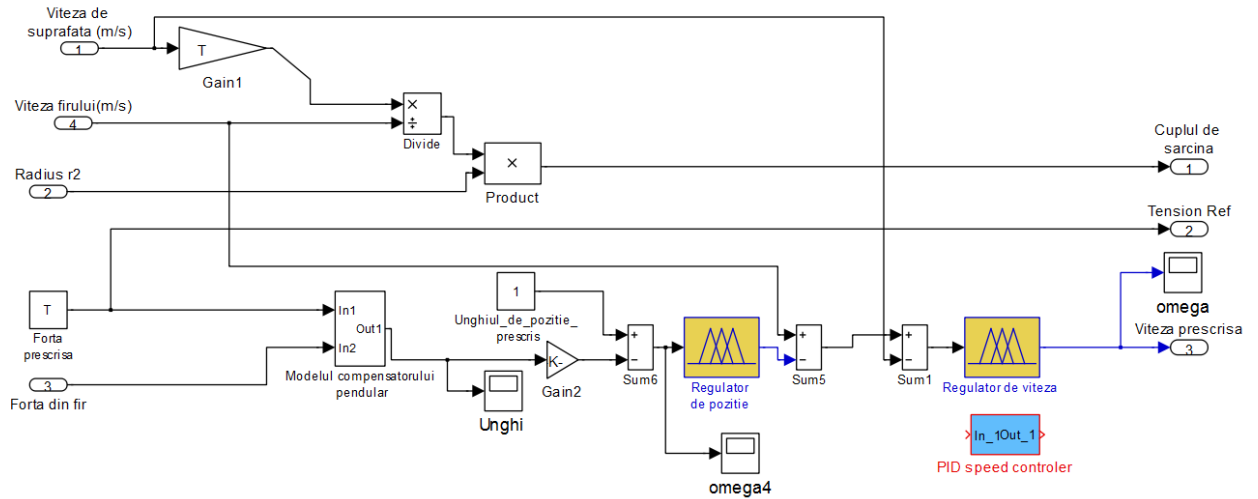


Figura 3.12. Modelul Simulink a blocului de control al acțiunii mecanismului de bobinat în cazul când controlăm viteza motorului cu reglatoare Fuzzy

3.6. Rezultatele modelării mecanismului de bobinat cu control de viteză și reglatoare Fuzzy

În figura 3.13 este reprezentată variația forței de tensionare a firului față de cea prescrisă de 70(N) la controlul vitezei motorului mecanismului de bobinat cu buclă de reacție în funcție de poziția brațului compensator.

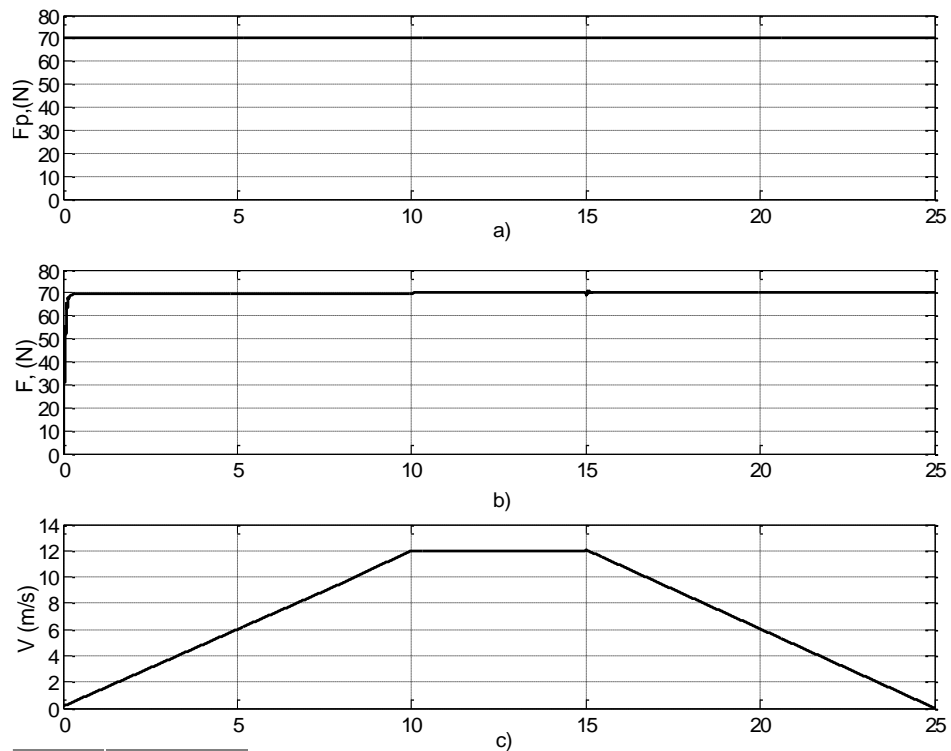


Figura 3.13. Forța prescrisă-a; variația forței din fir-b; variația vitezei liniare a firului bobinat-c

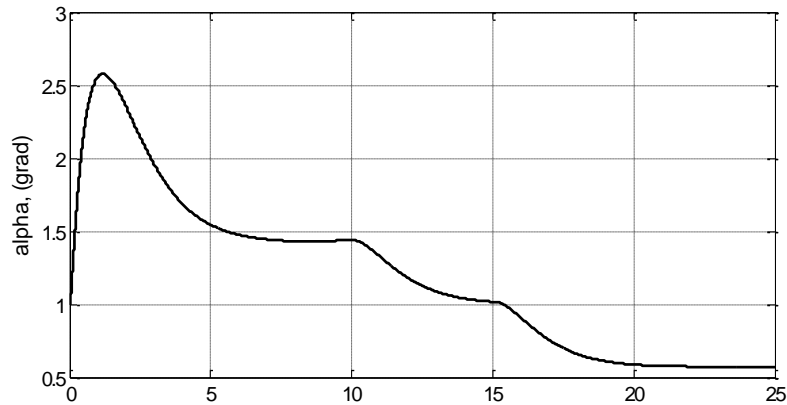


Figura 3.14. Variația poziției unghiulare a compensatorului pendular pe durata perioadei de modelare

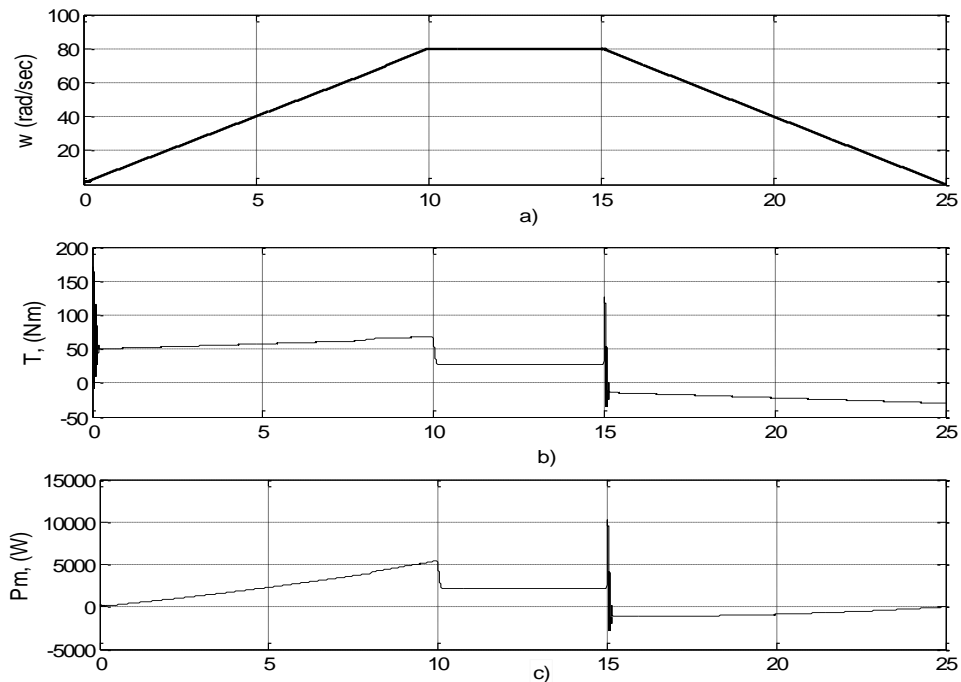


Figura 3.15. Variația vitezei unghiulare a bobinei –a; variația cuplului la arborele transmisiei-b; variația puterii mecanice transmise bobinei-c

3.7. Elaborarea modelului sistemului de control al mecanismului de bobinat cu control DTC și regulator hibrid Fuzzy-PID a forței din fir

Conform modelului Simulink, reprezentat în figura 3.1, au fost simulate procesele tranzitorii ale sistemului pentru cazul când controlăm cuplul motorului direct și utilizăm un traductor de măsurare al forței din fir. În bucla de reacție a sistemului de reglare după forța din fir avem un regulator hibrid Fuzzy-PID.

În figura 3.16. este reprezentată schema modului de control a acționării bobinatorului cu control DTC și regulator hibrid Fuzzy-PID.

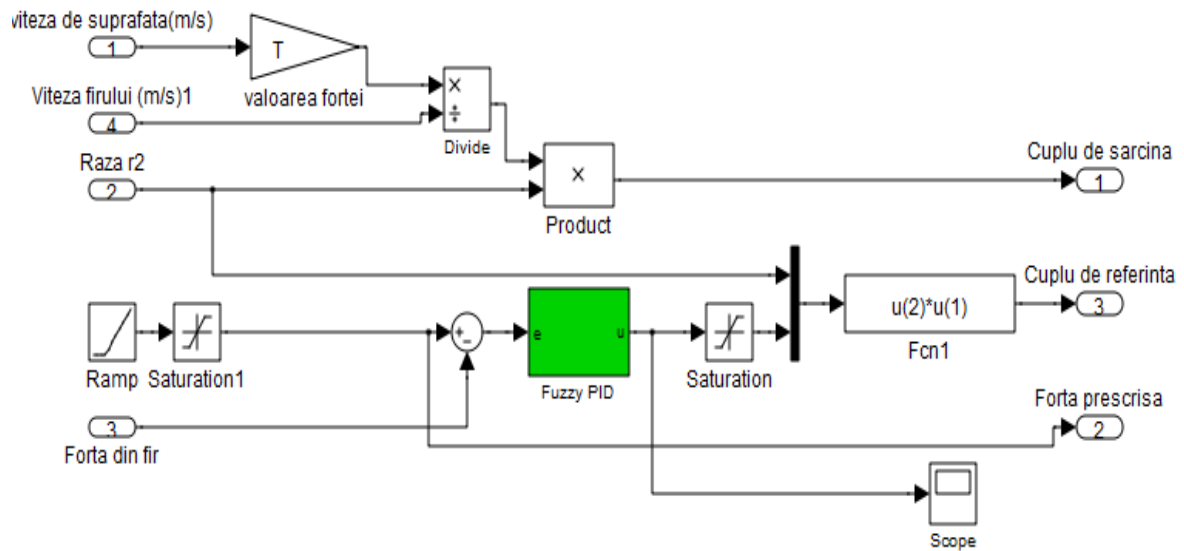


Figura 3.16. Schema modului de control a acționării bobinatorului cu control DTC și regulator hibrid Fuzzy-PID [50]

Modelul Simulink a regulatorului hibrid Fuzzy-PID este reprezentat în figura 3.17, compus din regulatorul Fuzzy, modelul Simulink al relațiilor de calcul (2.65, 2.66, 2.67) pentru coeficienții regulatorului PID respectiv k_p , k_i și k_d și modulul regulatorului PID.

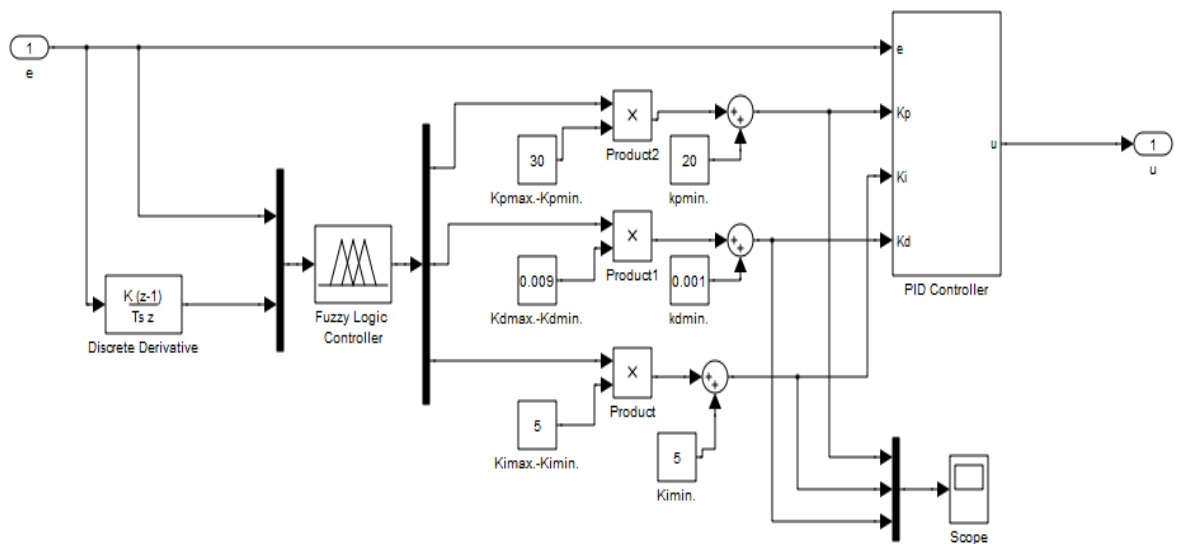


Figura 3.17 Schema Simulink a regulatorului hibrid Fuzzy-PID [50]

În figura 3.18. este reprezentat modelul simulink al regulatorului hibrid PID care se ajustează cu ajutorul coeficienților generați de regulatorul Fuzzy.

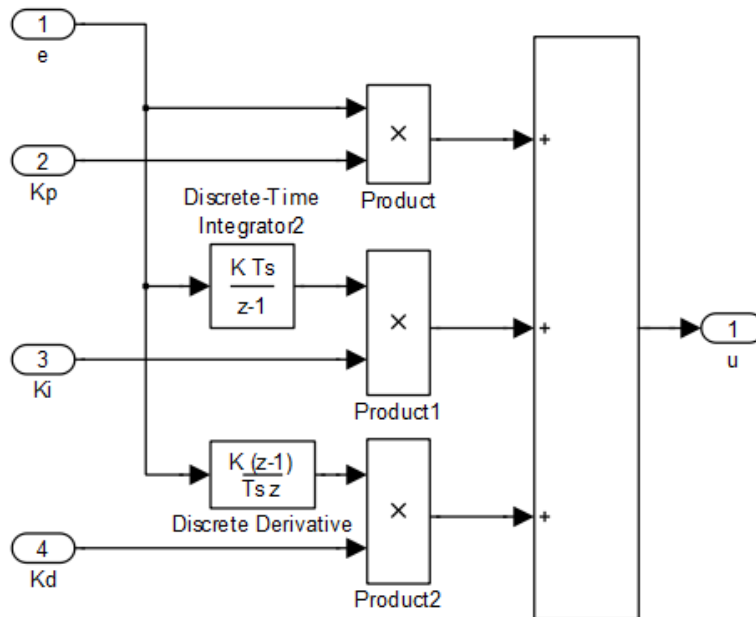


Figura 3.18. Structura Simulink a blocului PID[54]

În ceea ce privește structura regulatorului Fuzzy în Simulink aceasta este reprezentată în figura 3.19 Aceasta este compusă din două intrări, valoarea erorii e , derivata acestei erori de și, respectiv, trei ieșiri care corespund parametrilor regulatorului PID K'_p , K'_i și K'_d .

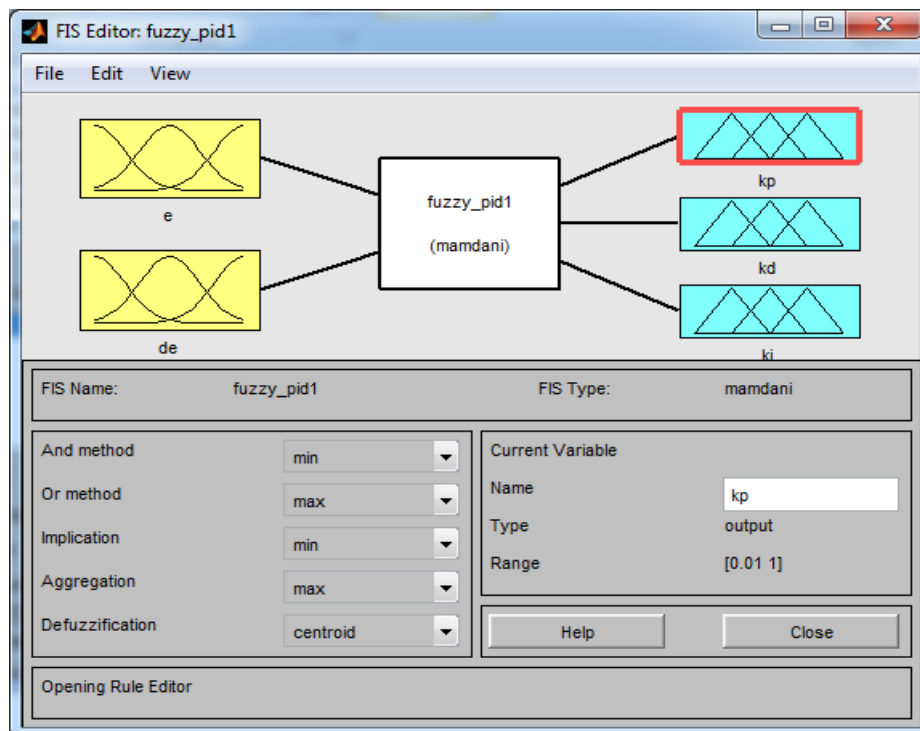


Figura 3.19. Structura regulatorului Fuzzy. [50,96]

În figura 3.20 sunt reprezentate baza de reguli cu ajutorul căror regulatorul Fuzzy generează valori pentru coeficienții de ajustare ai parametrilor regulatorului PID. Aceste reguli au fost create cu ajutorul tabelului 2.1 din capitolul doi.

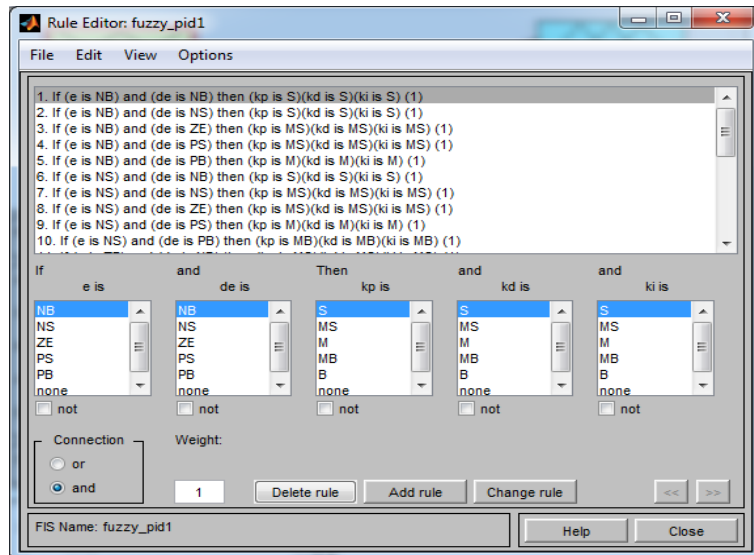


Figura 3.20. Baza de reguli a regulatorului hibrid Fuzzy-PID [50]

3.8. Rezultatele modelării mecanismului de bobinat cu control DTC și regulator hibrid Fuzzy-PID a forței din fir

În acest subcapitol sunt aduse rezultatele modelării mecanismului de bobinat cu control DTC al motorului de acționare și regulator hibrid Fuzzy-PID în bucla de reacție după forța din fir.

Motivul realizării acestei modelări rezultă din analiza rezultatelor obținute anterior pentru acest sistem cu regulator clasic PID și regulator Fuzzy. În anumite condiții valoarea forței din fir nu este menținută egală cu cea prescrisă deoarece parametrii sistemului se modifică semnificativ. În figura. 3.21 sunt reprezentate variația vitezei liniare a firului care este bobinat și viteza liniară a suprafeței bobinei.

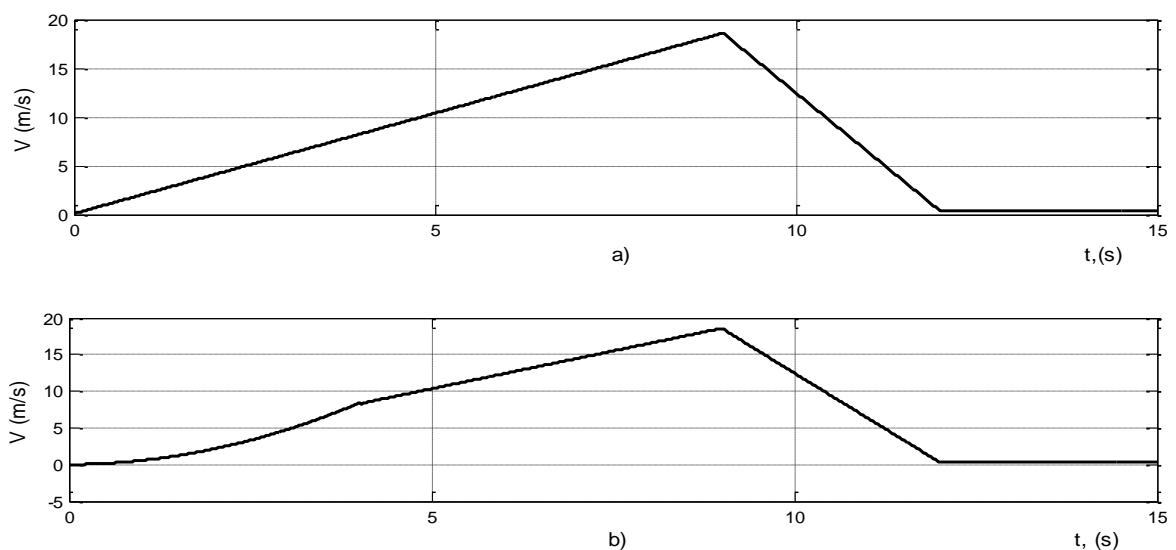


Figura 3.21. Variația vitezei liniare a firului-a) și variația vitezei liniare de suprafață a bobinei-b)

Figura 3.22 reprezintă variațiile vitezei unghiulare a bobinei în dependență de viteza liniară a firului bobinat, variația cuplului care este aplicat bobinei și variația puterii mecanice pentru dezvoltarea vitezei și forței în fir prescrise de operator.

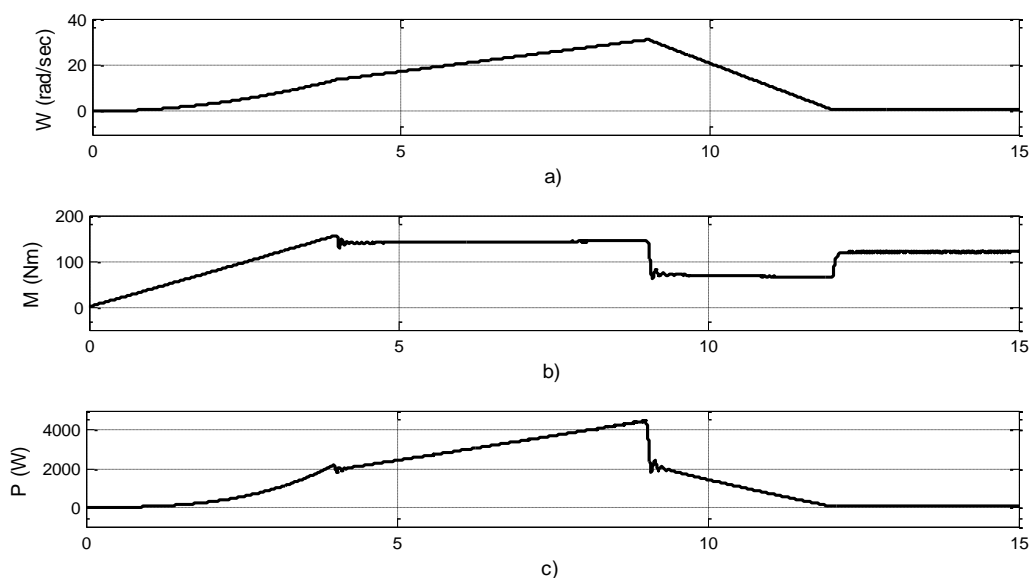


Figura 3.22. Variația vitezei unghiulare a bobinei a), variația cuplului dezvoltat de motor b) și variația puterii mecanice transmise bobinei c)

Variația forței prescrise din firul bobinat și cuplul prescris motorului de acționare de regulatorul Fuzzy-PID sunt reprezentate în figura 3.23.

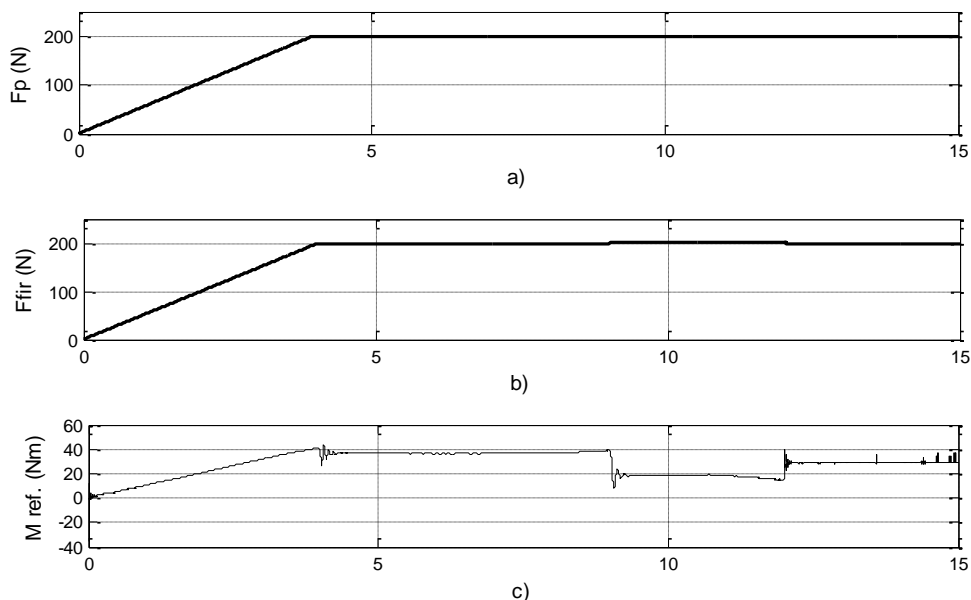


Figura 3.23. Forța prescrisă din fir a), variația forței dezvoltate în firul bobinat b) și variația cuplului prescris acționării de către regulatorul Fuzzy- PID

În figura 3.24. este reprezentată variația forței de tensionare a firului față de cea prescrisă de 60 (N) și cuplul prescris de către regulatorul Fuzzy-PID, pentru a dezvolta această forță la comanda

DTC a motorului mecanismului de bobinat cu buclă de reacție în funcție de valoarea forței de tensionare.

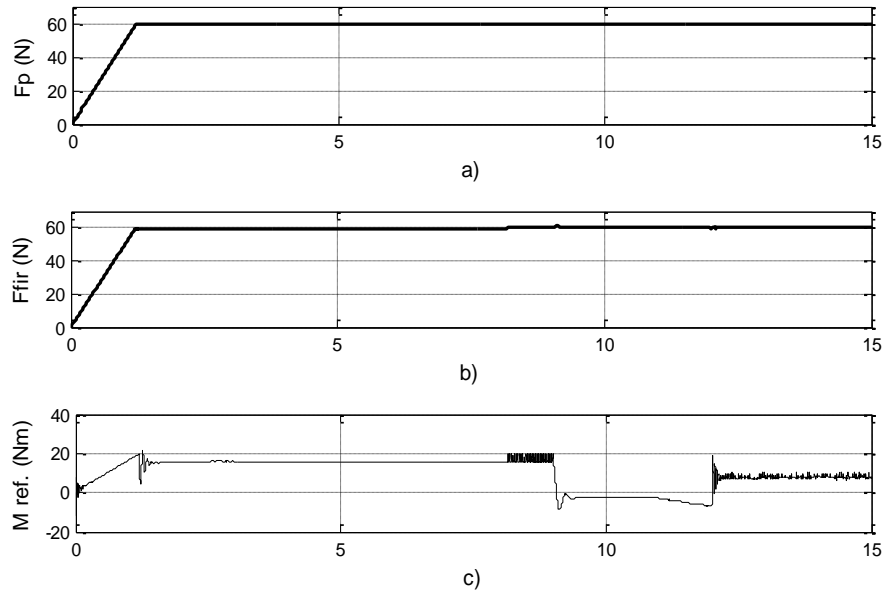


Figura 3.24. Forța prescrisă din fir-a), variația forței dezvoltate în firul bobinat-b) și variația cuplului prescris acționării de către regulatorul Fuzzy- PID pentru cazul când forța prescrisă este egală cu 60(N)

Variația vitezei unghiulare a bobinei cuplului transmis bobinei de motorul de acționare prin intermediul transmisiei și variația puterii mecanice sunt reprezentate în figura 3.25 pentru cazul când valoarea forței transmise este egală cu 60(N).

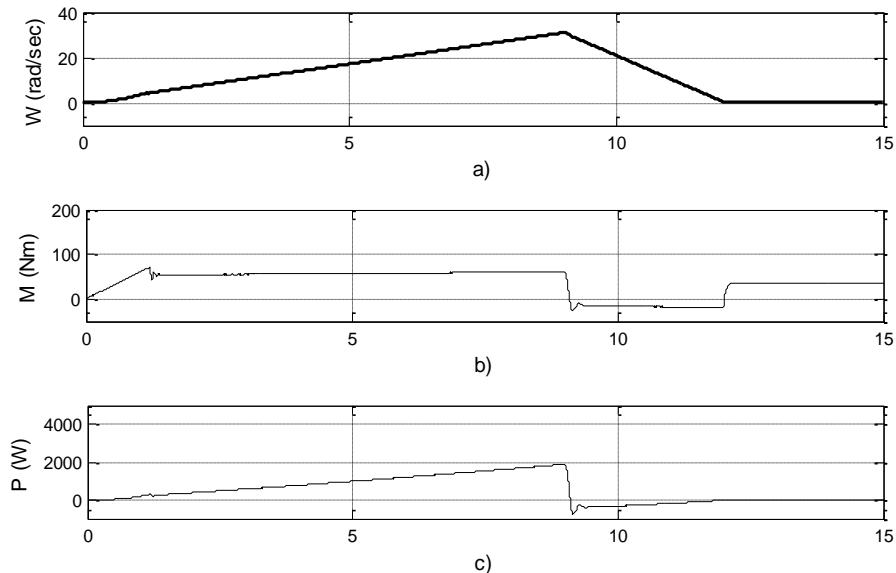


Figura 3.25. Variația vitezei unghiulare a bobinei-a), variația cuplului dezvoltat de motor-b) și variația puterii mecanice transmise bobinei-c), pentru cazul când forța prescrisă este egală cu 60(N)

3.9. Analiza rezultatelor simulării SEM a bobinatorului

- La control DTC cu regulator PI a mecanismului de bobinat forța de tensionare din firul bobinat este de aceeași valoare ca cea prescrisă de 60 (N), rampa de accelerare și de frânare este de 0,75 (m/sec.), supra reglajul $\sigma=0$ (%), eroarea staționară $\varepsilon=0$ (%)
- La control DTC cu regulator Fuzzy forța de tensionare prescrisă din firul bobinat este de 120 (N), rampa de accelerare și de frânare este de 0,75 (m/sec.), pentru un moment de inerție maxim al bobinei de 22.0 (kg.m²) și o rază maximă de 0.5(m), la viteza 185 (m/min) de supra reglajul $\sigma=0$ (%), eroarea staționară $\varepsilon=0$ (%) la viteza joasă de 8 (m/min) (regim JOG) sistemul intră în regim de lucru instabil.
- În regim de control a vitezei unghiulare și regulator Fuzzy în bucla de reglare a vitezei mecanismului de bobinat pentru o valoare prescrisă de 70(N) de la compensatorul pendular la rampa de accelerare și de frânare este de 80(m/sec.), la un moment de inerție maxim al bobinei de 22.0 (kg.m²) și o rază maximă de 0.5(m), obținem la viteza maximă prescrisă de 800 (m/min) de supra reglajul $\sigma=0$ (%), eroarea staționară $\varepsilon=0$ (%); în regim de accelerare și frânare la fel supra reglajul $\sigma=0$ (%), eroarea staționară $\varepsilon=0$ (%);
- În regim de control DTC și regulator hibrid Fuzzy-PID a forței din fir pentru o valoare prescrisă de 200(N) în regim de accelerare și frânare cât și în regim staționar suprareglajul $\sigma=0$ (%) și eroarea staționară $\varepsilon=0$ (%).

3.10. Concluzii la capitolul 3

1. Valoarea forței din fir la bobinare este un parametru critic care determină eficiența energetică a acestui mecanism.
2. O valoare prea mare a acestei forțe duce la supra întinderea firului trefilat la etapa de recoacere, deoarece își pierde din *Limita de rezistența la întindere* (ANEXA A.3), iar o valoare prea mică duce la creșterea pierderilor prin alunecare în trefilor (între tambururile de tracțiune și firul trefilat) și la scăderea calității bobinajului.
3. Ambele moduri de comandă vectorială a motorului asincron cu controlul DTC și controlul vitezei asigură stabilitate în funcționare pentru diferiți parametri mecanici ai bobinei (greutate, rază), ***dar necesită un calcul anevoios în determinarea parametrilor regulatorului din buclă.***
4. Pentru un sistem neliniar acest tip de regulator hibrid Fuzzy-PID asigură performanțe foarte bune. Totodată, ajustarea unui astfel de regulator Fuzzy-PID este mult mai simplă și nu necesită un calcul matematic complicat.

4. IMPLEMENTAREA PRACTICĂ A REZULTATELOR CERCETĂRIILOR TEORETICE DIN CADRUL LUCRĂRII

4.1. Proiectarea sistemului de control a liniei de trefilare în baza rețelei PROFINET și IO-Link

4.1.1. Aspecte generale privind protocolul PROFINET

Protocolul PROFINET asigură reglarea echipamentelor și sistemelor de automatizare, referitor la proprietăți precum siguranța funcțională, tehnologia pentru sisteme de acționare și managementul energetic. Protocele sunt dezvoltate pe grupurile PROFIBUS și PROFINET pentru a asigura caracterul deschis, interoperabilitatea și interschimbabilitatea dispozitivelor [13,110, 111].

PROFIsafe:

PROFIsafe este un protocol de comunicații sigur și certificat, pentru aplicații de siguranță funcțională, pe bază de PROFIBUS și PROFINET. *PROFIsafe* reprezintă o comunicație sigură de date, cu obiectivul unei funcționalități îmbunătățite în aplicațiile de siguranță funcțională.

În același timp, efortul de instalare este redus și permite o interoperabilitate și interschimbabilitate maximă a dispozitivelor cu funcții de siguranță. [97]

PROFIsafe este conceput în așa mod, încât, să fie utilizată infrastructura de rețea PROFINET standard, pentru transmiterea sigură a datelor. Astfel, se creează posibilitatea coexistenței traficului de date securizat cu cel nesecurizat. În acest fel, fiind simplificată proiectarea sistemelor, iar costurile sunt reduse. La fel, este posibilă și o transmisie de date prin WLAN.

Protocolul *PROFIsafe* poate fi utilizat pentru aplicații de securitate până la SIL3, conform IEC 61508 resp. IEC 62061, categorie de securitate 4 conform EN 954-1 sau PL e conform ISO 13849-1.

PROFIdrive:

PROFIdrive reprezintă profilul standard cu construcție modulară, pentru sisteme de acționare care funcționează pe PROFIBUS și PROFINET. Acesta descrie proprietățile obligatorii pentru mecanisme de acționare și codificatoare, în scopul interoperabilității și interschimbabilității dispozitivelor din cadrul aplicațiilor PROFIBUS și PROFINET.

PROFIdrive definește șase clase de aplicații pentru mecanisme de acționare, practic pentru orice cerință în automatizarea sistemelor de acționare. Astfel, fiind garantată o cuplare sigură și permanentă a mecanismelor de acționare, din toate aplicațiile de automatizare.

Clase de aplicații PROFIdrive

Pe baza numeroaselor posibilități de aplicare, pentru *PROFIdrive* sunt stabilite șase clase de aplicații diferite, în funcție de conținut. Un dispozitiv de acționare poate accepta una sau mai multe clase.

- **Clasă de aplicații 1** – Mecanism de acționare standard cu reglarea turațiilor, de exemplu, convertor de frecvență;
- **Clasă de aplicații 2** – La fel ca și clasa de aplicații 1, dar cu funcționalitate extinsă (funcții tehnologice);
- **Clasă de aplicații 3** – Servomecanism cu turații, poziție de control și generator de profil, de exemplu, mecanism de poziționare pe o axă;
- **Clasă de aplicații 4/5** – Servomecanism pentru realizarea centralizată a mișcărilor, pe mai multe axe (Motion Control, Computerized Numerical Control, robotică)
- **Clasă de aplicații 6** – Servomecanism pentru automatizare descentralizată (cutie de viteze automată, arbori cu came).

Clasele de aplicații de la 1 la 3 pot fi realizate cu PROFINET RT. Începând cu clasa de aplicații 4, transmiterea izocronă de date cu PROFINET IRT este absolut necesară.

Multi Profile Drive

Dispozitivele moderne de acționare trebuie să fie completate, pe baza cerințelor extinse de aplicații referitoare la funcțiile clasice de acționare, cu funcții noi, precum tehnologia de siguranță și managementul energetic. Astfel, se ajunge la o platformă pentru funcții de automatizare legate de mecanismele de acționare. Prin urmare, profilele generale PROFIsafe și PROFInergy vor fi puse în aplicare, în viitor, în dispozitivele de acționare, pentru a îndeplini astfel de cerințe.

PROFInergy

PROFInergy este un protocol general de echipamente, conceput pentru aplicații în domeniul managementului energetic din sistemele de producție.

PROFInergy asigură o interfață pentru dispozitive, bazată pe PROFINET, prin care poate fi comandat consumul de energie al mașinilor și sistemelor, cu ajutorul sistemelor de rang superior, prin PROFINET. Punctul central este potențialul de economisire a energiei, în pauze și faze fără producție.

PROFInergy utilizează serviciul PROFINET aciclic, pentru transmiterea comenzilor standardizate, particularizate pentru următoarele aplicații:

- Pauze scurte
- Pauze lungi

- Pauze neplanificate
- Contorizarea și vizualizarea consumului de energie

4.1.2. Aspecte generale privind IO-Link

IO-Link este o tehnologie standardizată (IEC 61131-9) care reglementează modul în care interacționează senzorii și actuatorii din sistemele industriale cu controler. Comunitatea de companii IO-Link a fost format în 2008 de un grup de 41 producători de senzori și actuatori care au pornit IO-Link consorțiu cu scopul de a standardiza hardware-ul (PHY) strat) interfață și protocolul de comunicare (date) pentru Produse IO-Link. În prezent, există peste 100 de companii în consorțiu, inclusiv furnizorii de software.

IO-Link este o legătură de comunicare *point-to-point*, conectori, cabluri și protocoale standardizate. Sistemul IO-Link este proiectat să funcționeze în conformitate cu standardul industriei cu infrastructura de senzori și actuoare cu 3 fire și este alcătuită din produse „IO-Link master” și „dispozitiv IO-Link” (Figura 4.1).

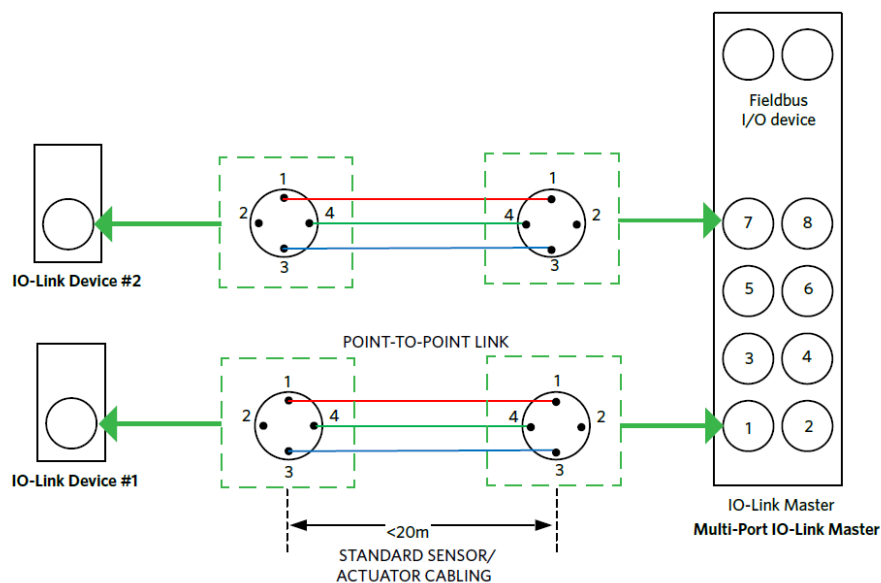


Figura 4.1. Interfața IO-Link Master/dispozitiv. [98]

IO-Link este conceptul inteligent pentru conectări standardizate de senzori și dispozitive de comutare la nivelul de control pe principiul point-to-point și interfață low-cost. Noul standard de comunicare IO-Link sub nivelul magistralei de câmp permite diagnosticarea centrală și localizarea defectelor la nivelul sensorului/dispozitivului de acționare. Aceasta permite nu numai că simplifică punerea în funcțiune, dar și întreținerea, permițând datelor parametrilor să fie modificate în mod dinamic direct de la aplicație.

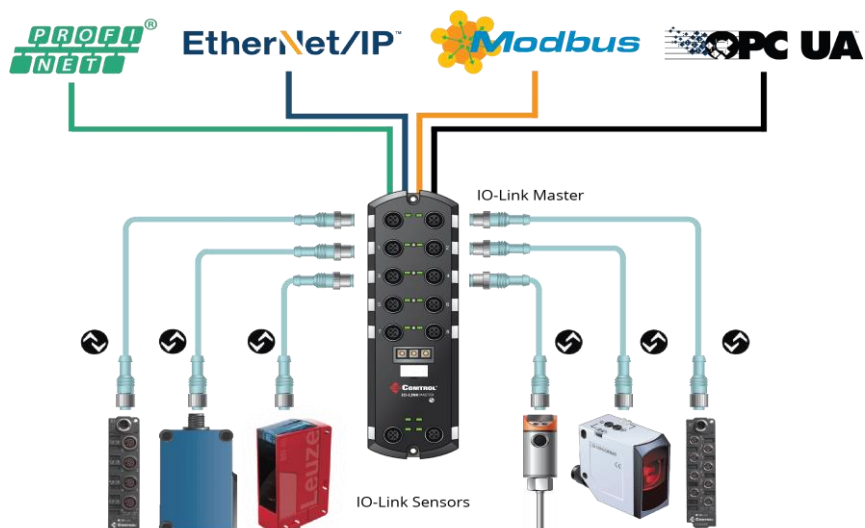


Figura 4.2. Modul de conexiune a traductoarelor prin intermediul unui nod IO-Link la diferite rețele de comunicare de nivel superior. [98]

Inteligența din ce în ce mai mare a dispozitivelor de câmp și integrarea lor în sistemul de automatizare general permite accesul la date chiar până la cel mai scăzut nivel de câmp. Rezultatul fiind disponibilitate mai mare a instalației și cheltuieli reduse de inginerie. Ca o interfață deschisă, IO-Link poate fi integrat în toate sistemele comune de Bus de câmp și automatizare. Acest lucru se aplică și în contextul conceptelor de mașină existente pentru utilizarea continuă a senzorilor care nu au o interfață IO-Link. Comunicare completă până la ultimul contor se realizează prin interfața point-to-point, IO-Link United pentru o calitate constantă

În general, înregistrăm solicitări mai mari la sistemele de comunicare integrate. În același timp, numărul dispozitivelor de câmp, senzorilor și actuatoarele crește rapid fapt care influențează direct creșterea nivelului de informații. IO-Link oferă soluția la aceste cerințe și este considerat de producători ca un supliment valoros pentru peisajul comunicațiilor (inclusiv AS-i). În calitate de promotor angajat al acestui subiect, Siemens nu numai că își va dezvolta în viitor gama de produse și sisteme, dar va furniza, de asemenea, o soluție de comunicare continuă, fără egal, prin încorporarea IO-Link în TIA Portal.

Sistemul IO-Link

Conexiunea *point to point* între maestrul IO-Link (controller multiport sau gateway) și dispozitivul IO-Link (senzor sau actuator) folosește conectori standard (de obicei M12) și un cablu cu 3 sau 4 fire, având lungimea de până la 20 de metri. Masterul poate avea mai multe porturi (de regulă patru sau opt). Fiecare port din master se conectează la un dispozitiv unic IO-Link, care poate să funcționeze fie în modul SIO, fie în Mod de comunicare bidirecțională. IO-Link este proiectat pentru utilizarea în industria existentă de arhitecturi precum *Fieldbus* sau *Ethernet*.

Acesta se conectează la PLC-urile existente sau la interfețele om-mașină (HMI), permițând adoptarea rapidă tehnologiei respective (figura 4.3.).

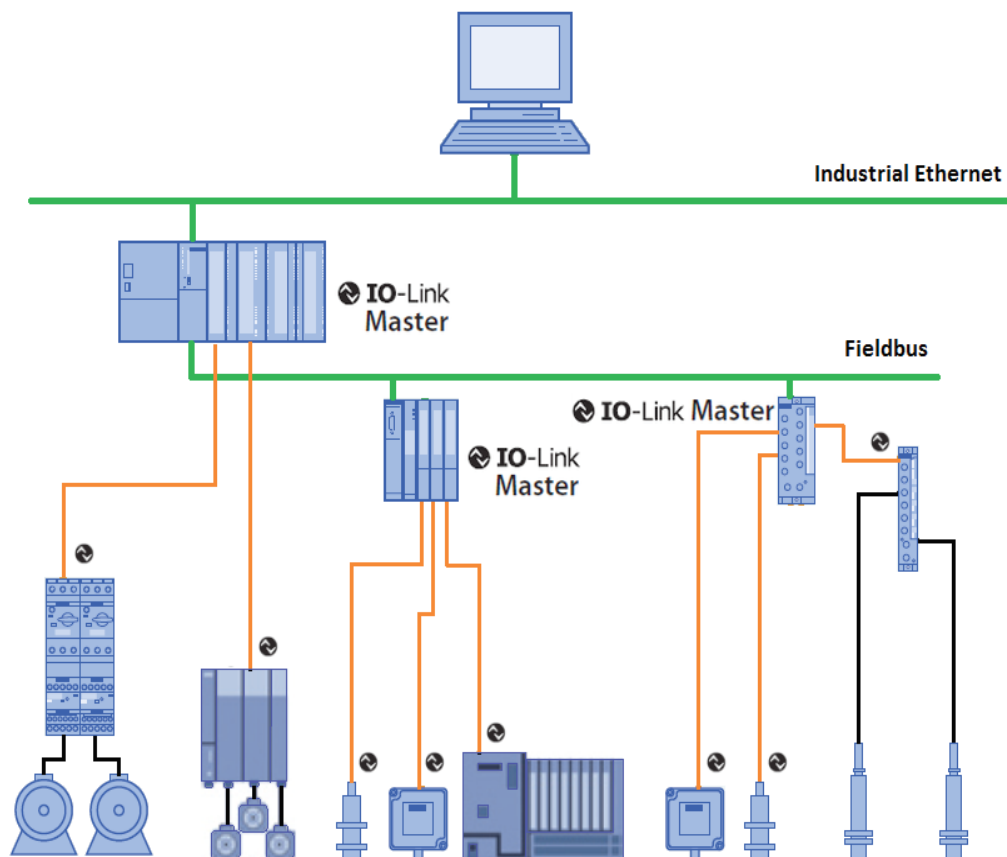


Figura 4.3. Compatibilitatea IO-Link cu Protocoalele industriale existente. [98, 99]

4.2. Proiectare sistemului de control pentru linia de trefilare utilizând protocoalele PROFINET și IO-Link

Indiferent dacă linia de trefilare produce fir din cupru, aluminiu, alamă, argint, aur sau fir de oțel, sistemul de control utilizat trebuie să asigure următoarele cerințe:

- Efort minim pentru configurarea, operarea, întreținerea, vizualizare prietenoasă, diagnostic și comunicare de date suportată de rețeaua ETHERNET;
- Control facil al parametrilor de funcționare ai liniei de trefilare prin intermediul unui controller master SIMATIC S7-300;
- Prevenirea ruperii firului prin sincronizarea electronică a trefilorului și mecanismului de bobinat;
- Control de siguranță prin intermediul funcțiilor de siguranță integrate în SINAMICS G120;
- Compensarea activă a fluctuațiilor de forță, chiar și cu geometrii de înfășurare acentrică;

- Viteze mari de înfășurare, cu o calitate îmbunătățită a înfășurării, comparativ cu sistemele pasive;
- Disponibilitate maximă a instalației datorită utilizării de componente standardizate, disponibile la nivel global;
- Integritate ușoară a liniei în fluxul tehnologic.

În baza cerințelor de performanță impuse sistemului de control a fost elaborată schema structurală a sistemului de control (Figura 4.4.) care are la bază un PLC din seria S7-300 de la compania Siemens CPU319-3 PN/DP.

Arhitectura rețelei de comunicare între PLC și dispozitivele periferice a fost aleasă de tip inel în scopul asigurării fiabilității în funcționare în cazul când pe o porțiune de circuit apare o ruptură.

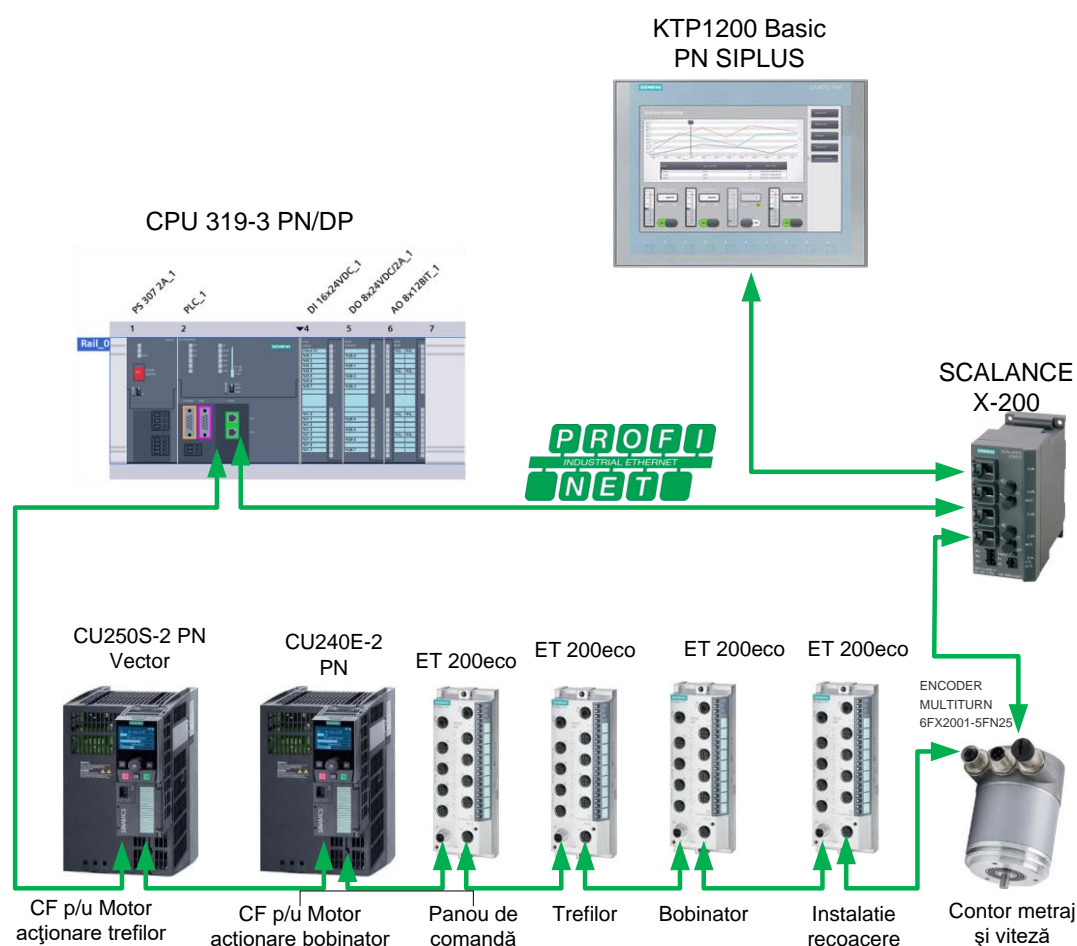


Figura 4.4. Schema structurală a sistemului de control propus pentru linia de trefilare

Partea de forță a sistemului reprezintă două convertizoare de frecvență SINAMICS G120 de puterile nominale respective.

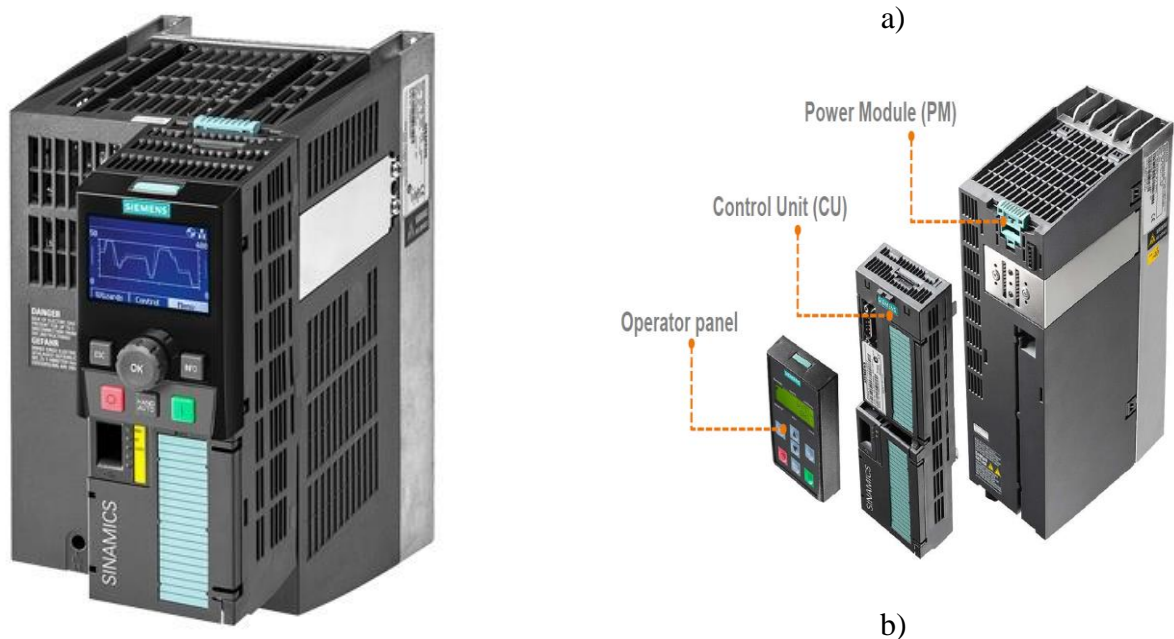


Figura 4.5. Vedere generală a convertorului de frecvență SINAMICS G120-a); conceptul modular a convertorului de frecvență SINAMICS G120-b) [110,112,113,114]

Procedura de Integrarea a invertoarelor în PROFINET

În scopul conectării invertoarelor la un PLC prin PROFINET, se procedează după cum urmează:

1. Se integrează convertorul în sistemul de magistrală (de exemplu, topologia inelelor) a PLC-ului folosind cabluri PROFINET și cele două prize PROFINET X150-P1 și X150-P2. Poziția prizei și alocarea pinului pot fi găsite în secțiunea alocare a interfeței Fieldbus. Lungimea maximă admisă a cablului de la stația anterioară și până la cea ulterioară este de 100 m.
2. Se alimentează extern invertoarelor cu 24 V DC prin bornele 31 și 32. Alimentarea externă de 24 V este necesară numai în cazul când comunicațiile cu controlul trebuie să funcționeze și atunci când tensiunea de alimentare este oprită.

Configurarea comunicării convertorului în rețea cu PLC-ul

1. Dacă invertoarelor este inclus în biblioteca hardware a HW-Config, configurarea convertorului se realizează în HW Config.
2. În situația când invertoarelor nu este inclus în biblioteca hardware sunt posibile următoarele opțiuni:
 - a). Se instalează versiunea STARTER mai actualizată;
 - b). Se instalează GSDML-ul invertoarelor prin „Instalare opțiuni / fișier GSDML” în HW Config.
3. Configurarea comunicării folosind un PLC care nu este produs de compania SIEMENS:

- a). Se importează fișierul de dispozitiv (GSDML) al invertorului în instrumentul de configurare al sistemului de control;
- b). Se configurează comunicarea.

Configurarea rețelei de comunicare Profinet între echipamentele sistemului de control propus este reprezentată în figura.4.6. Conform acestui protocol de comunicare fiecare echipament comunică cu PLC-ul prin intermediul unui IP sau a unui nume de rețea.

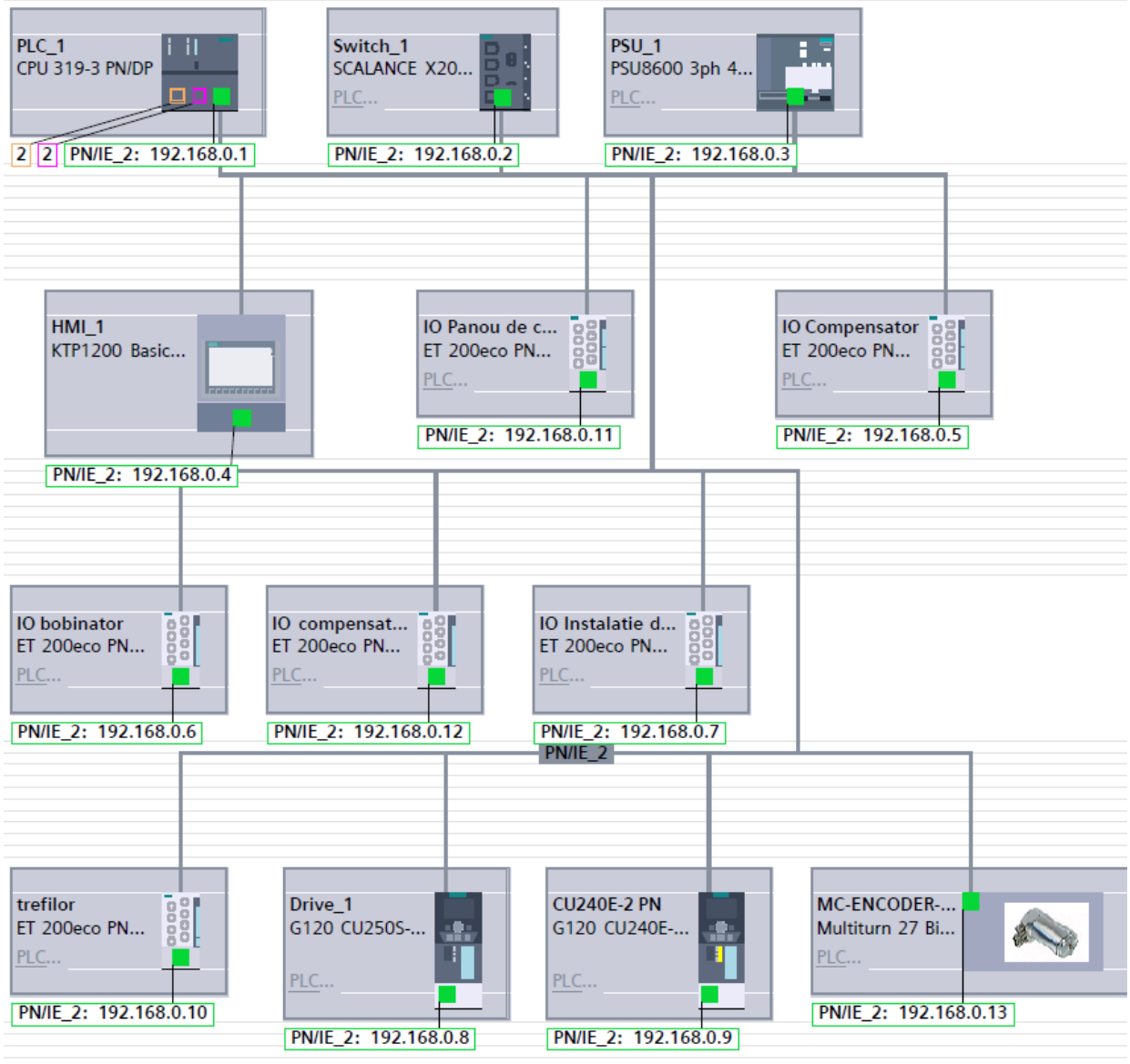


Figura 4.6. Configurarea rețelei de comunicare Profinet în TIA Portal

Tabelul 4.1. Lista echipamentelor necesare pentru elaborarea sistemului propus

Nr.	Denumirea	Cod Producător	Cantitatea, buc.
1.	Controler programabil	CPU 319-3 PN/DP	1
2.	Sursa de alimentare	PS 307 2A_1	1
3.	Convertor de frecvență seria SINAMICS	G120 CU250S-2 PN Vector PM240 IP20 6SL3224-0BE31-5AA0	1
4.	Convertor de frecvență seria SINAMICS	G120 CU240E-2 PN; PM240-2 IP20 6SL3210-1PE31-8ULx	1
5.	Panou HMI	KTP1200 Basic PN SIPLUS	
6.	IO, ET 200eco PN	PROFINET IO compact device; 8DI/4DO x 24VDC / 1.3A 8xM12 6ES7 148-6JA00-0AB0	5
7.	IO, ET 200eco PN	PROFINET IO compact device; 8AI, 4xU/I + 4xRTD/TC 8xM12; 6ES7 144-6KD00-0AB0	1
8.	Switch de rețea	SCALANCE X-200 6GK5 204-2BB10-2AA3	1
9.	Encoder	IO Device MC-ENCODER (27Bit Absolute) with PROFINET-IO 6FX2001-5xN25	1

4.3. Elaborarea algoritmului de setare al regulatorului din bucla de reglare a bobinatorului strungului de trefilare cu convertizoarele existente

Setarea regulatorului PID la mecanismul de bobinat necesită un calcul destul de exact pentru asigurarea unei stabilități bune a sistemului într-un diapazon larg de viteze fără a exclude ruperea firului.

O etapă foarte importantă în ajustarea sistemului este calibrarea semnalelor de comandă și reacție în convertor setând limitele maxime și minime ale semnalelor și valoarea lor relativă în procente față de semnalul de bază. Explicativa, la această etapă de setare, este adusă în figura. 4.7 Algoritmul de setarea al convertorului MD380 pe mașina reală cu regulator PID fără corecții după diametrul și momentul de inerție al bobinei este reprezentat în **ANEXA 5**.

Algoritmul de setarea a convertorului MD380 pe mașina reala fără regulator PID cu corecții după diametrul și momentul de inerție al bobinei este reprezentat în **ANEXA 6**.

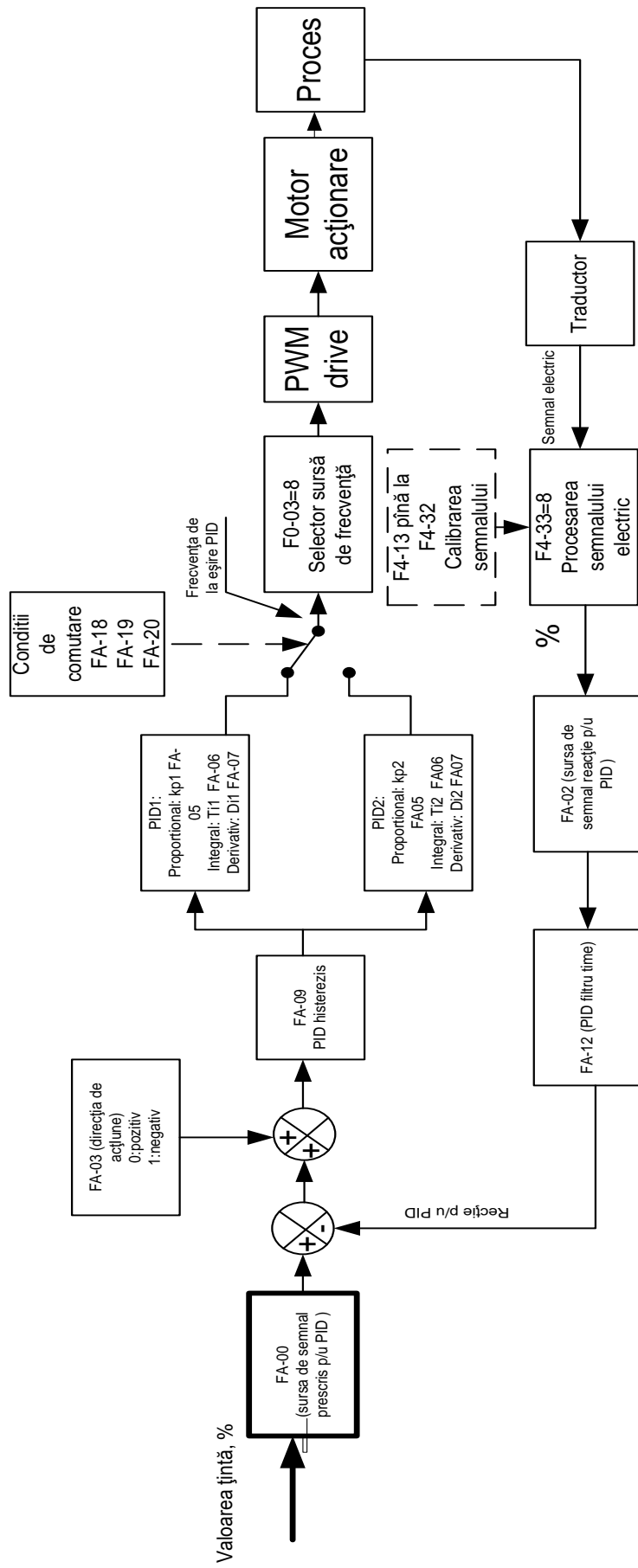
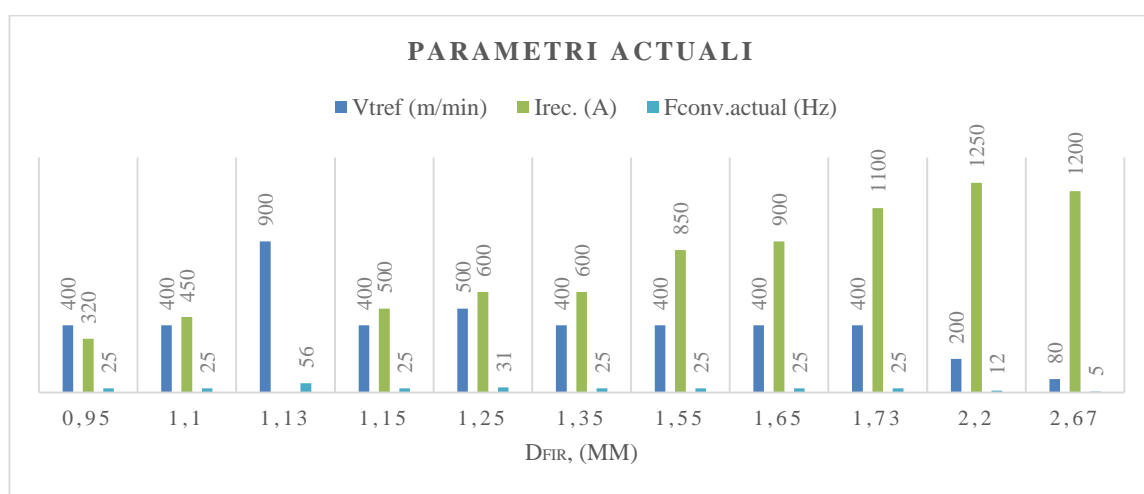


Figura. 4.7. Procedura de setare a regulatorului PID la convertizoarele de frecvență INOVANCE MD380 utilizate la acționarea linie de trefilare [17,18]

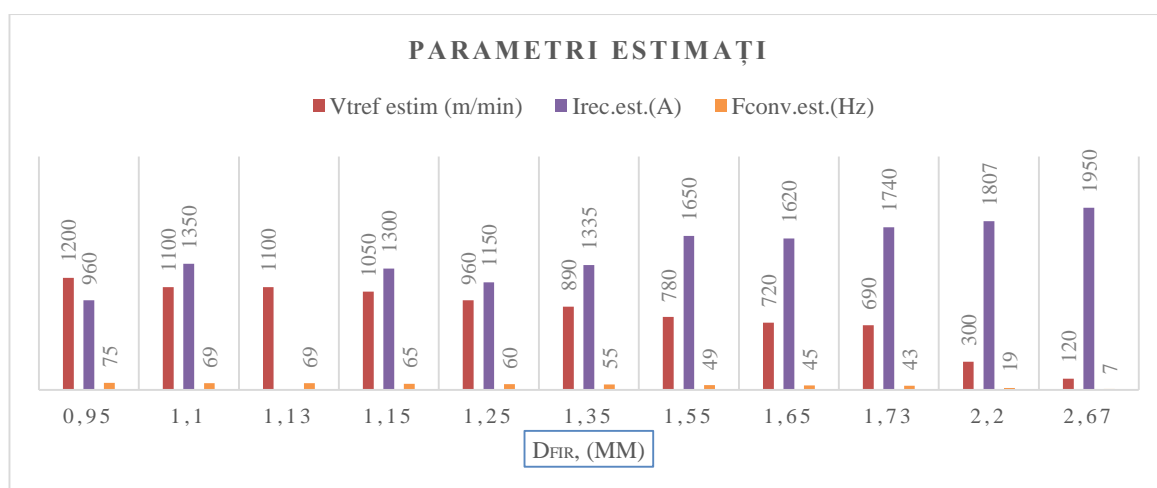
4.4. Analiza rezultatelor privind productivitatea liniei de trefilare

În urma modernizării SEM a trefilarului s-au estimat următoarele rezultate care țin de productivitatea liniei reprezentate în fig. 4.8.

Analiza datelor din fig. 4.8. b) ne permite să afirmăm faptul că linia atinge viteza maximă de funcționare de 1200 (m/min) pentru diametrul minim al firului trefilat de 0,95 (mm). Aceasta se datorează faptului că diametrul firului trefilat se micșorează cu 316 (%), de unde rezultă că și viteza liniară la ieșirea din trefilul (la bobinator) va fi mai mare ca cea la intrare cu aproximativ 316 (%). În aceste condiții motorul de acționare a trefilarului funcționează la o frecvență de 75 (Hz). Totodată, în cazul dat, se atinge și viteza maximă de 400 (m/min) la care poate funcționa instalația de depanare a firului.



a)



b)

Figura 4.8. Parametrii de funcționare ai liniei de trefilare actuali-a) și parametrii estimați după modernizare-b)

Din analiza datelor reprezentate în fig.4.8 b) putem evidenția nivelul de creștere al productivității liniei pe fiecare diametru de fir produs, exploatând linia împreună cu modulul de recoacere la parametri optimi. În rezultatul realizării analizei productivității liniei, în mediu, pe toate diametrele de fir care se produc s-a estimat o creștere a productivității de aproximativ 193(%) (vezi tabelul 4.2)

Tabelul 4.2. Date privind productivitatea liniei de trefilare

D _{fir} , mm	Înainte de modernizare		După modernizare	
	V _{lin1} , (m/min)	Q1, (kg/h)	V _{lin2} , (m/min)	Q2, (kg/h)
0.95	400	160	1200	481
1.1	400	186	1100	511
1.13	900	429	1100	525
1.15	400	194	1050	510
1.25	500	264	960	506
1.35	400	228	890	507
1.55	400	262	780	510
1.65	400	279	720	501
1.73	400	292	690	504
2.2	200	186	300	279
2.67	80	90	120	135

În figura 4.9. este reprezentată grafic productivitatea liniei de trefilare în funcție de diametrele firului prelucrat.

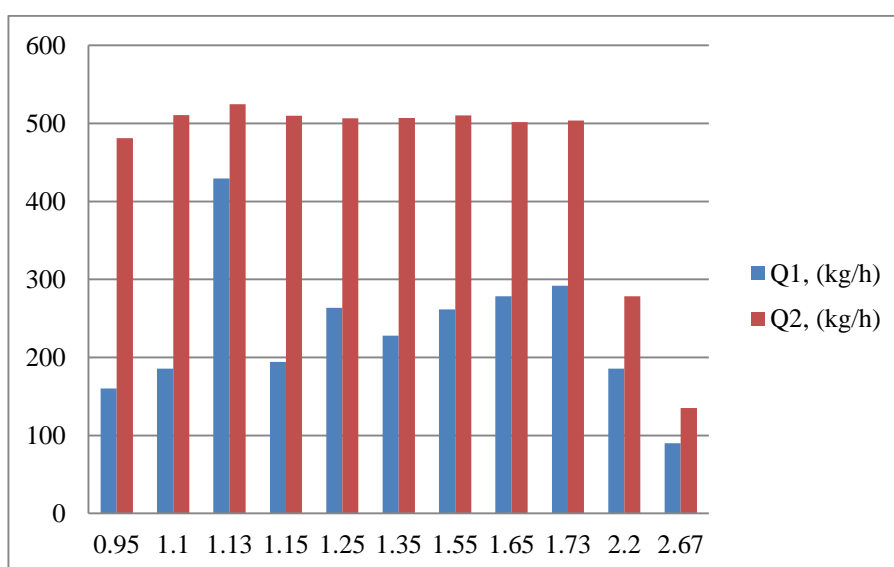


Figura 4.9. Productivitatea liniei de trefilare în funcție de diametrele firului prelucrat: Q1- înainte de modernizare, Q2- rezultate estimate după modernizare.

Tabelul 4.3. Productivitatea liniei de trefilare

Înainte de modernizare		După modernizare			
$V_{lin1med}$, (m/min)	Q1, (kg/h)	$V_{lin2med}$, (m/min)	Q2, (kg/h)	ΔV , %	ΔQ , %
407	234	833	452	199	193

4.5. Concluzii la capitolul 4

- În rezultatul cercetărilor au fost elaborate două moduri de programare a convertorului care controlează motorul mecanismului de bobinat :
 - ✓ Setarea Convertorului INOVANCE MD380 pe mașina reală cu regulator PID integrat fără corecții după diametrul și momentul de inerție al bobinei **Anexa A5**;
 - ✓ Setarea Convertorului INOVANCE MD380 pe mașina reală fără regulator PID cu corecții după diametrul și momentul de inerție al bobinei **Anexa A6**;
- În urma modernizării și ajustării sistemului de reglare al acționării trefilului-bobinatorului poate fi majorată productivitatea, în mediu, pentru toate diametrele de fir produs cu aproximativ 198(%).
- Viteza lineară medie pe toată gama de diametre de fir trefilat poate fi majorată cu 199 (%).
- Gama de diametre ale firului trefilat poate fi majorată de la 1.4 până la 2.76mm (6 diametre) prin recalcularea diametrelor filierelor și combinarea trefilului cu o instalație de recoacere care asigură un curent maxim de 2000 A.
- Viteza lineară maximă 1200(m/min) s-a obținut pentru diametrul firului trefilat 0,95(mm).
- Viteza lineară minimă 120(m/min) s-a obținut pentru diametrul firului trefilat 2.67(mm). Această viteză este limitată de puterea instalației de recoacere care poate asigura un curent maxim de 2000 (A).
- Implimentarea unui sistem de control nou pentru linia de trefilare bazat pe PLC și rețelele PROFINET și IO-Link va asigura posibilitatea integrării într-un sistem SCADA;

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

1. Problemele globale aferente protecției medului ambiant și consumului necontrolat a combustibililor fosili au impus statele lumii, inclusiv republica moldova, să se ocupe cu dezvoltarea și implementarea tehnologiilor performante industriale automatizate cu consum energetic redus. Procesele tehnologice de producere a firelor metalice sunt influențate de mai mulți factori variabili, iar unor erori în sistemele electromecanice de acționare ale instalațiilor de trefilare și bobinare conduce la creșterea excesivă a volumului de deșeuri metalice și a energiei electrice consumate. În acest sens, Republica Moldova a adoptat o serie programe în scopul promovării implementării tehnologiilor moderne de către antreprenorii autohtoni.
2. Performanțele sistemului electromecanic al liniei de trefilare și problemele legate de reglarea vitezei de trefilare, sunt determinate de caracteristicile mecanice neliniare ale acesteia. În urma analizei literaturii de specialitate s-a constatat că randamentul procesului de trefilare cu alunecare crește o dată cu viteza lineară a firului prelucrat.
3. Reieșind din caracteristicile neliniare ale bobinatorului apare necesitatea utilizării unui sistem de reglare al forței din fir adaptabil în funcție de parametrii bobinei și firului bobinat și rezultă faptul că comanda scalară a motorului asincron nu poate fi utilizată la SEM al bobinatorului.
4. A fost propusă o metodologie nouă de calcul a caracteristicilor mecanice ale bobinatorului pentru diferite legi de control a forței din fir la bobinare. S-a demonstrat, că la viteze mici de trefilare, cuplul de rezistență al bobinatorului depășește aproape 60% valoarea nominală, fapt cauzat de lipsa forței de contra-tensionare din fir și insuficiența de lichid lubrifiant în filiere.
5. Valoarea forței din fir la bobinare este un parametru critic care determină eficiența energetică a acestui mecanism, deoarece cuplul dezvoltat de motor este direct proporțional cu forța prescrisă și raza bobinei. O valoare prea mare a acestei forțe duce la supraîntinderea firului trefilat la etapa de recoacere, iar o valoare prea mică duce la creșterea pierderilor prin alunecare în trefil și la scăderea calității bobinajului.
6. Pentru analiza stabilității sistemului s-a obținut o funcție de transfer de ordinul doi, care descrie dinamica sistemului electromecanic al bobinatorului. În urma analizei conform criteriilor de stabilitate *Hurwitz, Bode, Nyquist Simplificat* **demonstrează faptul că sistemul este stabil.**
7. Au fost elaborate modelele Simulink ale sistemelor electromecanice reglabile cu motoare asincrone pentru mecanismele de trefilat și bobinat cu control vectorial și cu controlul direct al cuplului (DTC). A fost analizat SEM dinamic al bobinatorului cu control DTC și regulatoare PI, Fuzzy și Fuzzy-PID și a fost argumentată modalitatea principală de

implimentarea a regulatorului hibrid Fuzzy-PID. Pentru sistemul electromecanic neliniar al bobinatorului regulatorul hibrid Fuzzy-PID asigură performanțe foarte bune.

8. Pentru ajustarea sistemului electromecanic existent au fost elaborate două metodologii de programare ale convertorului care controlează motorul mecanismului de bobinat:
 - pe mașina reală cu regulator PID integrat fără corecții după diametrul și momentul de inerție al bobinei;
 - fără regulator PID cu corecții după diametrul și momentul de inerție al bobinei.
9. În cadrul acestei lucrări în urma modernizării sistemului de reglare al acționării trefilorului-bobinatorului s-a estimat o majorare a productivității în mediu pentru toate diametrele de fir produs cu aproximativ 198(%), viteza lineară maximă 1200 (m/min) s-a obținut pentru diametrul firului trefilat 0,95(mm). Totodată, pentru diametrul maxim al firului trefilat 2.67 (mm) s-a obținut o viteză lineară 120(m/min), această viteză este limitată de putere a instalației de recoacere, în același timp la viteză redusă este necesară o răcire forțată pentru ambele motoare.
10. După recalcularea diametrelor filierelor și combinarea trefilorului cu o instalație de recoacere gama de diametre ale firului trefilat a fost majorat de la 1.4 pînă la 2.76 mm (6 diametre).
11. Implementarea sistemelor electromecanice avansate ale proceselor de trefilare și bobinare a firelor sa estimat o reducere a rebutului de materie primă cu 20% și a consumului de energie electrică cu 40%.
12. În scopul ridicării fiabilității SEM și capacității de integrare ulterioară, într-un sistem SCADA, la finalul acestei lucrări este propus un sistem de control nou pentru linia de trefilare bazat pe PLC și tehnologiile PROFINET și IO-Link.

Problema științifică importantă soluționată

Prezenta teza de doctorat aduce contribuții științifico-practice într-o tematică de larg interes – *Sisteme electromecanice*. În urma cercetărilor realizate, în lucrare a fost soluționată problema stabilirii metodelor de modernizare ale sistemelor electromecanice în instalațiile de producere a firelor electrice, estimarea efectului asupra productivității în urma implementării acestora.

Din această lucrare derivă următoarele *sugestii*, privind cercetările de perspectivă, cu caracter științific și aplicativ:

- Dezvoltarea conceptului propus de modernizare a liniilor de trefilare și modelarea acestuia în scopul determinării parametrilor optimi.
- Modelarea în SimPowerSystem a Trefilorului cu bobinatorul și cu modulul de recoacere a firului în scopul determinării curentului optim de recoacere a firului.

BIBLIOGRAFIE

1. LIVINȚ, Gheorghe. *Modelarea și identificarea sistemelor*. Iași, România: Editura "Gheorghe Asachi", 2002.
2. BIROU, Iulian. *Metode performante de control în acționările electrice de curent alternativ*. Cluj Napoca: Casa cărții de știință, 1999.
3. HORGA, Vasile. *Introducere în controlul numeric al proceselor*, Note de curs. Iași: Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" din Iași, 2017.
4. NUCA, Ilie. *Acționări electrice*, Note de curs. Chișinău: U.T.M., 2010.
5. BIROU, Iulian. *Sisteme de calcul în timp real pentru comanda acționărilor electrice*. Cluj Napoca: Editura Mediamira, 2000. ISBN 973-9358-44-6.
6. LEGE Nr. 139 cu privire la eficiența energetică. În: *Monitorul Oficial al Republicii Moldova*. din 19-07-2018, pp. 309-320.
7. Hotărârea Guvernului Republicii Moldova nr. 1. din 07.02.2013, Planul Național de Acțiuni în Domeniul Eficienței Energetice pentru anii 2013-2015. În: *Monitorul Oficial al Republicii Moldova*, 2013 .
8. Hotărârea Guvernului Republicii Moldova nr. 1. din 30-12-2016, Planului național de acțiuni în domeniul eficienței energetice pentru anii 2016-2018, Vol. 1, din 23-03-2017. În: *Monitorul Oficial al Republicii Moldova*, 2017, nr. 92-102, art. 257.
9. Hotărârea Guvernului Republicii Moldova nr. 3. din. 01.08.2019, Programului național în domeniile Cercetării și Inovării pentru anii 2020-2023. În: *Monitorul Oficial al Republicii Moldova*. 2019.
10. LUCACHE, Dorin. *Instalații electrice de joasă tensiune. Baze teoretice și elemente de proiectare*. Iași: Editura PIM, 2009. ISBN 978-606-520-442-3.
11. PENTIUC, Radu. *Alimentarea cu energie electrica a consumatorilor industriali*, Îndrumar de laborator. Suceava: Editura Universității , 2001.
12. ПЕШКОВ, И.Б., МЕШАНОВ Г.И. Анализ основных тенденций в развитии мирового производство кабелей и проводов. В: *Анализ и прогнозы, Кабели и провода.*, pp. 3-7, 2012.
13. РЕЗВИН, С.Б. Система поддержания натяжения провода на базе частотно-регулируемого электропривода. В: *Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов*, vol. Т.2, с.143, 2005.

14. КАРАНДАЕВ, А.С., РАДИОНОВ, А.А. *Электропривод моталок и разматывателей агрегатов прокатного производства*. Магнитогорск: Учеб. пособие, МГТУ, 2003.
15. KNITTEL, D., VEDRINES, M. *Modelling and H_{∞} low order control of web handling systems with a pendulum dancer*. Strasbourg I University, ERT Enroulement IPST 15, rue du Mal Lefebvre, F-67000 Strasbourg, FRANCE.
16. User Manual, *MD380 series AC drive V0.0* developed by Shenzhen Inovance Technology Co., Ltd.
17. User Manual, *Tension Control Inverter MD330*, V. S. I. T. C. Ltd., Ed., Shenzhen: Service Department .
18. NUCA, Ilie, **CAZAC, Vadim**. Adjusting the driving control system of wire drawing machine and winding mechanism with asincronus motors. In: *10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems SIELMEN 2015* , Vol. 1 din 2 , 0.28 c.t., 6-Craiova, 8-9 Chişinău october 2015, ISBN 978-606-567-284-0.
19. SAMPSTEMI. Drawing Technology[online] [citat martie 2016]. Disponibil: <http://www.sampsistemi.com/drawing-technology/13146.html>.
20. *Siemens*, ©Siemens 1996–2021 [citat december 2015]. Disponibil: www.automation.siemens.com/.../wire-drawing-machines.aspx.
21. ТРОИЦКИЙ, О.А. Электропластическое волочение проволок из металлов и сплавов как элемент технологии создания облегченных проводов и кабелей. В: *Наука и Техника, Кабели и провода* [Online]. № 3, 2011. ISSN: 2072-215X. Disponibil: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16498881>
22. БАРАНОВ, Ю.В., АВРАМОВ, Ю.С., ШЛЯПИН, А.Д. ТРОИЦКИЙ, О.А. *Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства)*. Т. 1. Москва – Ижевск: Изд-во АНО ИКИ, 2004, 563 с.
23. DIXON, R. F. Company Works to Develop Die-Less Drawing Process. In: *Wire Journal International* [Online]. Vol. 1 din 2Vol. 20, No. 10. [citat december 2017]. ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.
Disponibil:https://www.academia.edu/7871380/THEORY_OF_WIREDRAWING
24. WISTREICH, J.G. The Fundamenatls of Wire Drawing. In: *Metalurgical Review* [Online]. Vol. 3, 1958, pp. 97-141. [citat december 2017]. Disponibil: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/mtlr.1958.3.1.97>
25. Morgan-Koch Corporation, [citat december 2016.]. Disponibil: <http://morgan-koch.com/>.

26. КРАСИЛЬНИКОВ, Л.А., ЛЫСЕНКО, А.Г. *Волочи́лишик проволоки*. Москва: Издательство „Металлургия”, 1987. УДК 621.778.-426(075).
27. CADDELL, R. M., ATKINS, A. G. The Influence of Redundant Work When Drawing Rods through Conical Dies. In: *Journal of Engineering for Industry [Online]*. Vol. 90, 1968, pp. 411–419. [citat november 2017]. ISSN 0022-0817(Print). Disponibil: <https://doi.org/10.1115/1.3604653>
28. FLANDERS, M. A. Analysis of Wire Temperature and Power Requirements on Multi-Pass Drawing Productivity. In: *Wire Journal International [Online]*. The Wire Association International, Inc., Guilford, Connecticut, Vol. 1 din 2 Vol. 12 , No. 4, 1979, pp. 60–64. [citat november 2017]. Disponibil: <https://www.wirenet.org/wire-journal-international>
29. GOLOVANOV, N., ŞORA, I. *Electrotermie și electrotehnologii Electrotehnologii*. Vol.II Ed., București, 1999.
30. BIROU, Iulian. *Acționări electrice sisteme de reglare și control*. Cluj Napoca: Editura Mediamira, 2003.
31. **CAZAC, Vadim**. The drive system optimization of single screw extruder to control thickness of insulation. In: *International Conference on Electromechanical and Power System (SIELMEN)*, 12-13 October 2017, pp. 501-505, ISBN 978-1-5386-1846-2
32. VAS, Peter. *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. Oxford New York Tokyo: Oxford University Press, 1998.
33. PASSINO, K.M., ANTSAKLIS, P.J. *An introduction to inteligent and autonomus control*. Kluwer Academic Publisher, 1992. ISBN 0-7923-9267-1.
34. WITTENMARK, B. ASTROM, K.J. *Adaptive control*. 1st edition, Addison Wesley, 1989. ISBN (Online) 978-3-662-08546-2. ISBN (Print) 978-3-662-08548-6
35. WITTENMARK, B. ASTROM, K.J. *Adaptive control*. 2nd edition, Addison Wesley, 1995. ISBN-13: 978-0201558661
36. MARTON, L., DAVID, L. *Rețele neuronale și logica Fuzzy în automatizări*. Târgu Mureș: Ed. Universității ”Petru Maior”, 2000.
37. MARTON L., DAVID L. *Rețele neuronale și logica fuzzy în automatizări*. Tîrgu Mureș: Editura Universității ”Petru Maior”, 2000. ISBN 973-8084-02-4.
38. DUMITRACHE, I. *Ingineria reglării automate*”. Ed. Polipres, 2007.

39. PASSINO, K.M. *Intelligent control. An overview of techniques*. [Online] The Ohio State University, Ohio, 1998. [citat november 2017].
Disponibil:<http://biblioteca.uccm.md/images/library/foto2013/STASreferintebibliografice.pdf>
40. MANOLEA, Gheorghe. *Sisteme automate de acționare electromecanică*. Craiova: Editura Universitaria 2004. ISBN 973-8043-525-5.
41. OLTEAN, Stelian Emilian, *Control Inteligent și adaptiv [Online]*. Note de curs. Târgul Mureș, 2009. [citat november 2017].
Disponibil:<http://docshare04.docshare.tips/files/30508/305082796.pdf>
42. HORGA, Vasile. *Contribuții la analiza și sinteza structurilor echipamentelor electronice pentru comanda acțiunilor electrice*. Teză de doctorat, Iași, 2003. 170 p.
43. VARGA, A., IONESCU, V. *Teoria sistemelor*. București: Ed. All, 1994.
44. PENTIUC, Radu., IOACHIM D. *Utilizările energiei electrice: Instalații electrice de joasă tensiune*. Suceava: Editura Universității din Suceava, 1997. ISBN:973-9-7787-1-2
45. STOICUȚA, O., PANĂ, T. *Stabilitatea sistemelor de acționare vectorială cu motoare de inducție*. Cluj-Napoca: Mediamira, 2016. ISBN 978-973-713-341-0.
46. BELDIMAN, N., AMBROS T. *Teorie și aplicații pentru mașini asincrone și sincrone*. Material didactic. Chișinău: U.T.M, 2002.
47. BALABAN, E., BOȚAN, C., s.a. *Regimuri economice ale sistemelor de acționare electrică*. București Ed. Tehnică, 1985.
48. HUGHES, A. *Electric Motors and Drives*. Third edition, Burlington: Elsevier Ltd., 2006. ISBN-13: 978-0-7506-4718-2.
49. PANĂ, T. *Controlul sistemelor de acționare vectorială cu motoare de inducție*. Cluj-Napoca: Editura Mediamira, 2001. ISBN 973-9358-85-3.
50. GRIGORAȘ, D. BOȚAN, C. *Tehnici de optimizare*. Îndrumar de laborator, Rotaprint, IP, București, 1991.
51. NUCA, Ilie. *Acționări Electrice*. Îndrumar metodic pentru lucrări practice. Chișinău. U.T.M, 2012.
52. BOLDEA, Ion. *Parametrii mașinilor electrice. Identificare, estimare și validare*. București: Ed. A. Române, 1991.
53. MANOLEA, Gheorghe. *Acționări electrice*. Suport de curs, Craiova: 2008.

54. IVANOV, Sergiu. *Modelare si Simulare-sisteme electromecanice, procese de mediu*. Craiova: Ed.Universitaria, 2007.
55. SILAGHI, H. *Acționări electrice*. Note de curs, Oradea: 2009.
56. CIURU, T. *Sisteme de comandă automată ale acționărilor electrice*. Teorie și aplicații, Chișinau: UTM, 2003.
57. MAZUR, G. A. *Depanarea motoarelor electrice și a convertizoarelor de frecvență: de la atestarea de bază pînă la diagnosticarea avansată*. Illinois: American Technical Publishers, 2011.
58. IOANNOU, P. *Robust adaptive control*. Los Angeles: 2003.
59. CIORBĂ, R.C., VIOREL I.A. *Mașini electrice în sisteme de acționare*. Cluj-Napoca: Editura U.T. PRES, 2002. ISBN 973-8335-37-x.
60. MANOLEA, G. *Acționări electromecanice*. Tehnici de analiză teoretică și experimentală, Craiova: Ed. Universitaria, 2003.
61. NASAR, S.A., BOLDEA, I. *Electric Drives*. New York: Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 978-1-4987-4820-9.
62. CÂMPEANU, A. *Introducere în dinamica mașinilor electrice de curent alternativ*. Craiova: Editura Academiei Române, 1998. ISBN 973-27-0669-4.
63. NUCA, I., **CAZAC, V.** AC Drive Control System of the Winder with DTC control and Fuzzy controller. In: *13th International Conference on Development and Application Systems, DAS*, Vol. 1 din 2, Pages: 126-129, May 19-21, Suceava, Romania 2016. Catalog number: CFP1665Y-ART. ISBN: 978-1-5090-1993-9
64. NUCA, I., **CAZAC, V.** Modelarea sistemului de control al trefilorului cu modul de recoacere a firului. În: *Conferința tehnico-stiințifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM*. Vol. 1 din 2 Chisinau, Vol.1, octombrie 2011, pp. 308-311.
65. NUCA, I., **CAZAC, Vadim.** The Control System Modeling of Winder with Hybrid Fuzzy-PID Controller. In: *International conference and exposition on electrical and power engineering, EPE 2016*, , Vol. 1 din 2, 20-22 Octombrie 2016, p. 492-497. ISBN:978-1-5090-7. IEEE Catalog Number: CFP1647S-ART
66. NUCA, I., TODOS, P., NUCA, I., **CAZAC, V.** Control system of the wire drawing machine with anealing module. In: *International Conference on Electromechanical and Power Systems*, Chisinau, 13-15 Octombrie 2011. Ed. UNIVERSITARIA. ISSN 1842 – 4805

67. CAZAC, V. The Winder Control System with Alternative Current Drive of Wire Drawing Line. În: *Meridian Ingineresc*, Vol. 1 din 2. pag. 68-75, 2016. ISSN 1683-853X. Disponibil: <http://utm.md/meridian/2016/mi-nr2-2016.pdf>,
68. SICARD P., BOUSCAYROL, A., THIFFAULT, C. Desensitization to voltage sags of a rewinder by using an active dancer roll for tension control. In: *IEEE-IEMDC'05*, San Antonio (USA), May 2005, pp. 409-423.
69. JANG, J.I., KANG, H.K., SONG, S.H., SHIN K.H. Compensation method for tension disturbance due to an unknown roll shape in a web transport. In: *IEEE Transactions on Industry Applications.*, Vol. 39, No 5, 2003, pp. 1422-1428.
70. ZHU, Y., PAGILLA, P. R., DWIVEDULA, R. V. Characteristics of active and passive dancers : A comparative study. In: *Control engineering Practise*, vol. 14, , 2006, pp. 409-423.
71. LIAO, J. *Research on filament winding tension controlling based on ac servo motor*. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2011.
72. AICHER M. and SCHRÖDER D. Time-optimal tension control for processing plants with continuous moving webs. In: *Annual Meeting-IEEE Industry Applications Society*. Proc. 35th, Rome, 2000, pp. 3505-3511.
73. WOLFERMANN, G. Tension control of webs. A review of the problems and solutions in the present and future. In: *Proceedings IWEB3*. Oklahoma, 1995, pp. 198-229.
74. РЕЗВИН, С. Б. *Разработка системы комплексной автоматизации кабельной линии на базе преобразователей частоты и контроллеров с сетевыми возможностями*. Диссертация кандидата технических наук : 05.09.03.- Москва, 2005.- 158 с.: ил. РГБ ОД, 61 05-5/2751
75. РАДИОНОВ, А.А. *Автоматизированный электропривод совмещенного прокатно-волоочильного проволочного стана*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2009. 38 с.
76. КИДЯЕВ, В.Ф., КИЖАЕВ, С.А., БУЛЬХИН, А.К. *Электропривод и автоматизация волоочильного оборудования*. Самара: ИЦ Книга, 2002, 482 с.
77. ФАДЕЕВ, А.В., ОМЕЛЬЧЕНКО, Е.Я. *Электропривод намоточного устройства волоочильного стана 80/19*. Магнитогорск: Магнитогорский филиал ООО «НТЦ Приводная техника» 1983. УДК 621.778.1.068–83.

78. KNITTEL A.D., OSTERTAG E. Robust decentralized control strategies for large scale web handling systems. In: *Control Engineering Practice*. Volume 16, Issue 6, June 2008, Pages 736-750.
Disponibil:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967066106000748?via%3Dihub>
79. BASTOGNE H. Application of subspace methods to the identification of a winding process. In: *Proceedings of the 4th European Control Conference*, 1-7 July, 1997. Brussels, 1997. ISBN:978-3-9524269-0-6
80. XU, M.J., YANG, M. Modeling and simulation of tension control system in web press based on MATLAB. In: *Packaging Engineering*, vol. 32(7), 2011, pp. 22-25.
81. ZĂRNESCU, H. *Ingineria reglării automate II. Proiectarea sistemelor convenționale*. Târgu Mureș: Ed. Univ. "Petru Maior", 1999.
82. KELEMEN, A. *Acționări Electrice*. București: Editura Didactică și Pedagogică, 1979.
83. МИРОШНИК, И.В., НИКИФОРОВ, В.О. ФРАДКОВ, А.Л. *Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами*. СПб.: Наука, 2000, 548с.
84. IZVORENU Bartolomeu, COJUHARI, Irina. Contributions of controllers tuning in the multiple-loop feedback control system with two contours with inertia. In: *Proceedings of the 9 International Conference on Development and Application Systems*, Suceava, România, 22. 05.2008. Disponibil: <http://www.dasconference.ro/papers/2008/A15.pdf>
85. COJUHARI, I. Tuning Controllers in the Multiple-Loop Feedback Control System to the Objects with Inertia, Time Delay and Non Minimal Phase. In: *10th International Conference on Development and Application Systems, May 27-29, 2010. Suceava, Romania*, Disponibil: <http://www.dasconference.ro/cd2010/data/papers/A93.pdf>
86. CĂLIN, S. *Conducerea adaptivă și flexibilă a proceselor industriale*. București: Ed. Tehnică, 1988.
87. PETRESCU, M., LUCACHE, Dorin. Vehicles dynamic control, using fuzzy logic. In: *9th WSEAS International Conference on AUTOMATION and INFORMATION (ICAI'08)*, Bucharest, Romania, pp. 488 - 493, 24-26 June 2008. ISBN: 978-960- 6766-77-0, ISSN 1790-5117.
88. KOO, J. *Design of stable adaptive fuzzy control [Online]*. Hong Kong, 1994. [citat november 2017]. Disponibil: <https://core.ac.uk/download/pdf/48547266.pdf>

89. KOO, J. *Design of stable adaptive fuzzy control [Online]*. Master Thesis, Univ. of Hong Kong, Hong Kong, 1994. [citată noiembrie 2017]. Disponibil: <https://core.ac.uk/download/pdf/48547266.pdf>
90. PREITL, Ș., PRECUP R.E. *Fuzzy controllers*. Timișoara: Ed. Orizonturi Universitare, 212 pp., 1999.
91. PRECUP, R.E., PREITL, Ș. *Introducere în conducerea Fuzzy a proceselor*. București: Ed. Tehnică, 1997.
92. PUIU, G., FLORESCU, I. *Reglarea adaptivă și optimală*. Note de curs. Bacău: Editura ALMA MATER, 2007.
93. PASSINO, J.R., LAYNE, K.M. Fuzzy Model Reference Learning Control for Cargo Ship Steering. In: *Proceedings of 8th IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 25-27 August 1993. ISBN:0-7803-1206-6
94. PASSINO, K.M., YURKOVICH, S. *Fuzzy control [Online]*. Addison Wesley Longman, Inc., California, 1998. ISBN 0-201-18074-X. [citată decembrie 2017]. Disponibil: <https://www2.ece.ohio-state.edu/~passino/FCbook.pdf>
95. PASSINO, K. *Intelligent control. An overview of techniques [Online]*. Ohio: The Ohio State University, 1998. [citată ianuarie 2018]. Disponibil: <http://www2.ece.ohio-state.edu/~passino/ic-chapter.pdf>
96. VERBRUGGEN, H., OSTERGAARD, J.J., JANTZEN, J. Fuzzy control in the process industry. In: *Zimmermann HJ. (eds) Practical Applications of Fuzzy Technologies. The Handbooks of Fuzzy Sets Series*, vol 6. Springer, Boston, MA. ISBN 978-1-4613-7079-6 https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4601-6_1
97. BODSON, M., SASTRY, S. *Adaptive control. Stability, convergence and robustness*. New Jersey: Prentice Hall, 1989. ISBN-13: 978-0-486-48202-6
98. NUCA, I., PUSCĂ, R., CAZAC, V. Modeling of the temperature control system of injection molding machine. In: *Annals of the University of Craiova, Electrical Series, International Conference on Applied and Theoretical Electricity – ICATE 2012*, Ed. Universitaria, vol. No.36, 26-27 octombrie 2012, ISSN: 1842-4805.
99. NUCA, I., CAZAC, V. Modeling of the temperature control system of the plastification cylinder of injection molding machine. In: *International Conference of Scientific Paper AFASES 2012*, Brasov, Vol. 1 din 2, 24-26 May 2012, pp.785-790. ISSN-L: 2247-3173.

- 100 NUCA, I., CAZAC, Vadim. Performace of Injection Molding machines with induction heating system. In: *ACTA Electrotehnica, Proceedings of the 5th International Conference on Modern Power Systems MPS-2013*, Vol. 1 din 2 Vol. 54, No.5, nr. Speciasl Issue, 28-31 May, Romania, Cluj-Napoca, 2013, pp. 336-339. ISSN 1841-3323
- 101 MAN, K. F., CHEN, G., KWONG, S.K., TANG, S. An Optimal Fuzzy PID Controller. In: *Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 1 din 2 Vol. 48, No. 4, August 2001, pp. 757-765. DOI: 10.1109/41.937407
- 102 PONGAEN, W., PRATUMSUWAN, P., SINTHIPSOMBOON, K. A Hybrid of Fuzzy and Fuzzy self-tuning PID Controller for Servo Electro-hydraulic System. In: *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2011 pp.220-225. DOI: 10.5772/48614
- 103 ZULFATMAN and RAHMAT, M. F. Application of Self Tuning Fuzzy PID Controller On Industrial Hydraulic Actuator Using System Identification Approach. In: *International Journal On Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 1 din 2 Vol. 2, No. 2, June 2009, pp.246-261. DOI: <https://doi.org/10.21307/ijssis-2017-349>
- 104 VOLOSENCU, C. *Tuning Fuzzy PID Controllers*. U. o. T. Romania, Ed., Timișoara: “Politehnica”, 2000. DOI: 10.5772/32750
- 105 CAZAC, Vadim, NUCA, Ilie. Performace of Injection Molding machines with induction heating system. In: *ACTA Electrotehnica, Proceedings of the 5th International Conference on Modern Power Systems MPS-2013*, Vol. 1 din 2 Vol.54, No.5, Cluj Napoca, Romania, nr. Speciasl Issue, 28-31 May 2013. pp.336-339. ISSN 1841-3323.
- 106 WANG, L. The research for tension fuzzy variable-structure control system of electric cable plastic wrapping process. In: *Inner Mongolia University of Science and Technology*, vol. Inner Mongolia, 2008. DOI: 10.1109/CHICC.2008.4604994
- 107 KRISHNAN, R. *Electric motor drives: Modeling, Analysis and Control*. New Jersey: Prentice Hall. ISBN 0-13-0910147, 2001.
- 108 NUCA, Ilie, CAZAC, Vadim. Modelarea sistemului de control a temperaturii cu regulator fuzzy la masinile de injectare a polimerilor. În: *Conferinta tehnico-științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților UTM*. Chișinău, vol. Vol.1, 15-17 noiembrie 2012. pp. 427-432.
- 109 *MaTlab*. The MathWorks,Inc. ©1994-2021 [citat: decembrie 2016]. Disponibil: www.mathworks.com.

- 110 *IO-Link technology*. TMG Technologie und Engineering GmbH, © 2021. [citat: January 2019]. Disponibil: https://io-link.com/en/Technology/what_is_IO-Link.php?thisID=73.
- 111 БИКИНЕЕВА, Ю.Л., ГРОМАКОВ, Е.И., АЛЕКСАНДРОВА, Т.В. *Интегрированная система автоматизации кабельного производства*. Ед., Томск: Институт «Кибернетический центр», 2002. Т. 3., К. 3. У. 658.512.02.
- 112 *IO-Link technology*. TMG Technologie und Engineering [citat: ianuarie 2018] Disponibil: <https://www.tmgte.de/en/products/io-link.html>.
- 113 *IO-Link technology* TMG Technologie und Engineering [citat: februarie 2018]. Disponibil: <https://io-link.com/en/index.php?thisID=51>.
- 114 Siemens Limited.[citat: aprilie 2019] Disponibil:<https://new.siemens.com/in/en/products/drives/sinamics/low-voltage-converters/standard-performance-frequency-converter/sinamics-g120.html>.
- 115 WRIGHT, R. N. *Workability in Extrusion and Wire Drawing, in Workability Testing Techniques*. Ohio: G. E. Dieter, p. 255, ASM International, Materials Park, 1984.
- 116 LANCASTER, P. R., FOWLER, T. Factors limiting speed in wire drawing. In: *Wire Industry*, vol. 50, 1983, pp. 208-211. ISBN 0900816007.
- 117 WINSPEER, C. E., SANSOME, D. H. Fundamentals of Ultrasonic Wire Drawing. In: *Journal of the Institute of Metals* ,Vol. 97, September 1969. ISSN 0020-2975.
- 118 LEHFELDT R., POHLMAN, E. Influence of Ultrasonic Vibration on Metallic Friction. In: *Ultrasonics*. Volume 4, Issue 4, October 1966, Pages 178-185. DOI: [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(66\)90244-7](https://doi.org/10.1016/0041-624X(66)90244-7)
- 119 WRIGHT, R. *Wire technology: process engineering and metallurgy*. Elsevier, 2010. ISBN: 9780128026502. eBook ISBN: 9780128026786
- 120 ERMURACHI Iu.; BERZAN V. Power Converter with High Value of Power Factor. In: *Problemele energeticii regionale*. Vol. 1-3 (42). Chisinau 2019. Pag. 86-93. DOI: 10.5281/zenodo. 3243550
- 121 ERMURACHI Iu.; BERZAN V. Innovative solutions power electronic converters for energy. In: *Energetica Moldovei*. Aspecte regionale de dezvoltare. Ediția III, 2016, Chișinău, Moldova, 29 septembrie - 1 octombrie 2016. Pag. 610-617. ISBN 978-9975-4123-5-3.

- 122 КЛУБОВИЧ, В. В. *Ультразвук в технологии производства композиционных кабелей*. Минск: Беларус. Наука, 2012, 294 с. ISBN 978-985-08-1449-4.
- 123 ATANASIU, Gh., BOLDEA, I. *Analiza unitară a mașinilor electrice*. București: Editura Academiei, 1983, 216 p. Clasificare:621.313
- 124 SCHMID, E. Plasticity of Insonated Metals. In: *Transactions of the Japanese Institute of Metals [Online]*, Vol. 9, 1968, pp. 798–804. [citat: aprilie 2019]. Print ISSN : 0021-4434, Online ISSN: 2432-4701
Disponibil:https://www.jstage.jst.go.jp/browse/matertrans1960/9/0/_contents/-char/en

A1. Aspecte generale privind procesul de trefilare

Înainte de adoptarea unor practici de trefilare continuă, puțină atenție a fost acordată pentru înțelegerea teoriei trefilării firului. Acest lucru poate fi atribuit, în mare parte faptului, că, până la introducerea aburului ca sursă de putere, cea mai mare problema cu care se confruntă a fost obținerea forței motrice necesare pentru procesul de trefilare.

Odată cu evoluția și îmbunătățirea mecanizării dezvoltate în timpul Revoluției Industriale, accentul a fost puțin pus pe înțelegerea procesului fizic de trefilare, rezultatele satisfăcătoare au fost, în general, realizabile cu viteze de trefilare moderate. În orice caz, firele puteau fi prelucrate numai în volumul nivelului de viață scurtă al filierei și erau preferate orice creșteri suplimentare de productivitate și calitate. [23,24, 100]

Cu toate acestea, introducerea comercială a filierelor din carbură de cimentare, în Germania, în timpul anilor 1920, a dus la o creștere a vitezelor de trefilare și rafinament în fabricile de firuri/cabluri, ceea ce a creat posibilitate producerii volumelor mai mari care puteau fi trefilate. Prin urmare, rapid s-a conștientizat necesitatea unei înțelegeri mai detaliate a procesului de trefilare a firelor de cupru sau aluminiu. [24,101]



Figura A1.1. Produse ale tragerii și trefilării

Deformarea prin tragere pune în discuție prelucrarea plastică a unor semifabricate de secțiune constantă, trase cu o forță exterioară printr-o *matriță* sau *filieră*. Secțiunea semifabricatului se micșorează, treptat, la ieșirea din focarul de deformare, astfel, că, secțiunea la ieșirea din filieră sau matriță este mai mică decât secțiunea la intrare.

În situația când forța necesară procesului de tragere este dezvoltată de organe de mașini cu mișcare rectilinie (obținându-se produse finite rectilinii), procedeul se numește *tragere*, scula de deformare se numește *matriță*, iar produsele obținute, *bare* și *țevi*.

În cazul când forța necesară procesului de tragere este dezvoltată de organe de mașini cu mișcare de rotație (tobe rotative), procedeul se numește **trafilare**, sculele de deformare se numesc **filiere**, iar produsele obținute, **fire**. Altfel spus, tragerea firelor se numește **trafilare**.

Tragerea și trefilarea se realizează de regulă la rece. Calitatea suprafeței și precizia dimensională obținute prin tragere-trefilare sunt corespunzătoare prelucrărilor de finisare. Deformarea plastică la rece va conduce la efecte ca *ecruisarea* și *texturarea*, care stau la baza creșterii proprietăților de rezistență și scăderea celor de plasticitate. **Ecruisarea** este proporțională cu gradul de deformare, ceea ce face ca deformarea să fie îngreunată odată cu creșterea gradului de deformare. Din acest motiv, caracteristica principală a procedeelor de tragere-trefilare constă în faptul că mărimea deformației, rezultată la o singură trecere, depinde de valoarea maximă a tensiunii din secțiunea transversală a produsului tras și care, totodată, nu trebuie să depășească valoarea rezistenței la ruperea materialului, condiție exprimată prin coeficientul de siguranță al tragerii.

Trefilarea:

- Etapa I de trefilare Cu 8mm la 3mmØ;
- Etapa II de trefilare Cu 3mm la 1,7-1,3mmØ;
- Etapa III de trefilare Cu 1,7mm la 0,25-0,2mmØ:

Recoacerea:

- Recoacere fir monofilar Cu 3mm la 1,7-1,3mmØ;
- Recoacere fir monofilar Cu 1,7mm la 0,25-0,2mmØ;

Cele mai cunoscute procedee de prelucrare prin tragere la rece ale metalelor și aliajelor sunt tragerea firelor (trafilarea), barelor și a țevilor. În aceste condiție putem obține produse trase de secțiune rotundă. Schemele de principiu ale tragerii firelor și barelor de simetrie cilindrică fiind similare vor fi prezentate împreună într-o singură schemă de principiu.

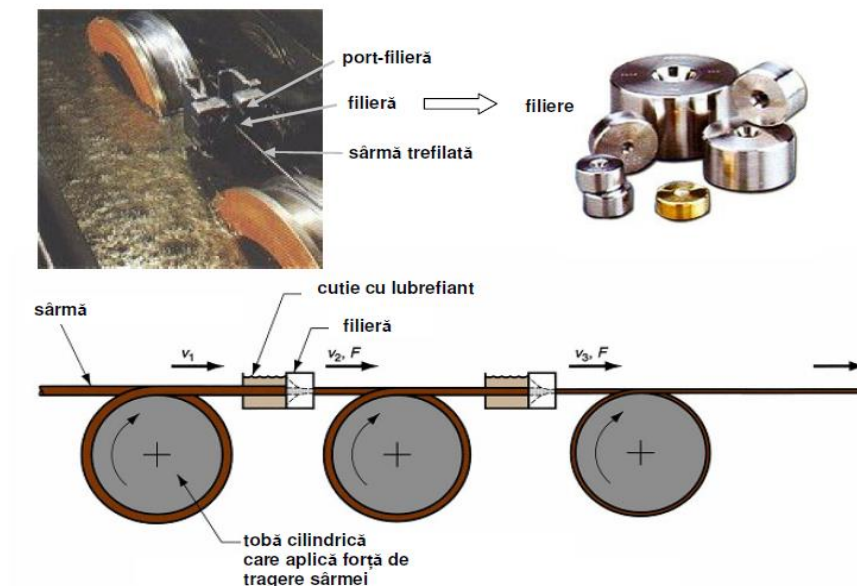


Figura A1.2. Elemente principale la procesul de trefilare

Clasificarea procedeeleor de tragere și trefilare poate fi efectuată după două criterii: modul de realizare și condițiile termice la care se efectuează deformarea, figura.A1.3.

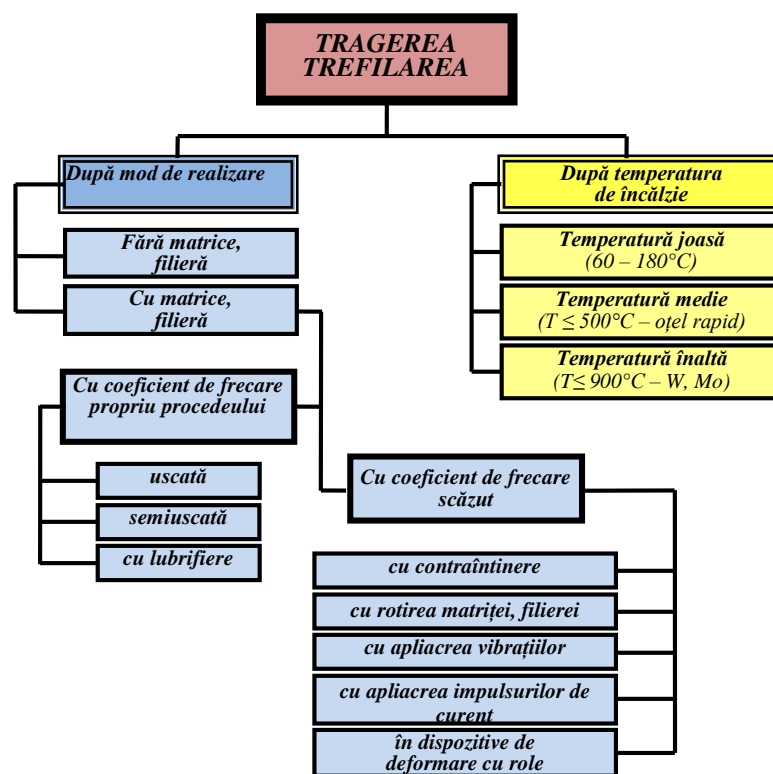


Figura A1.3. Clasificarea procedeeleor de tragere și trefilare [21,24,63]

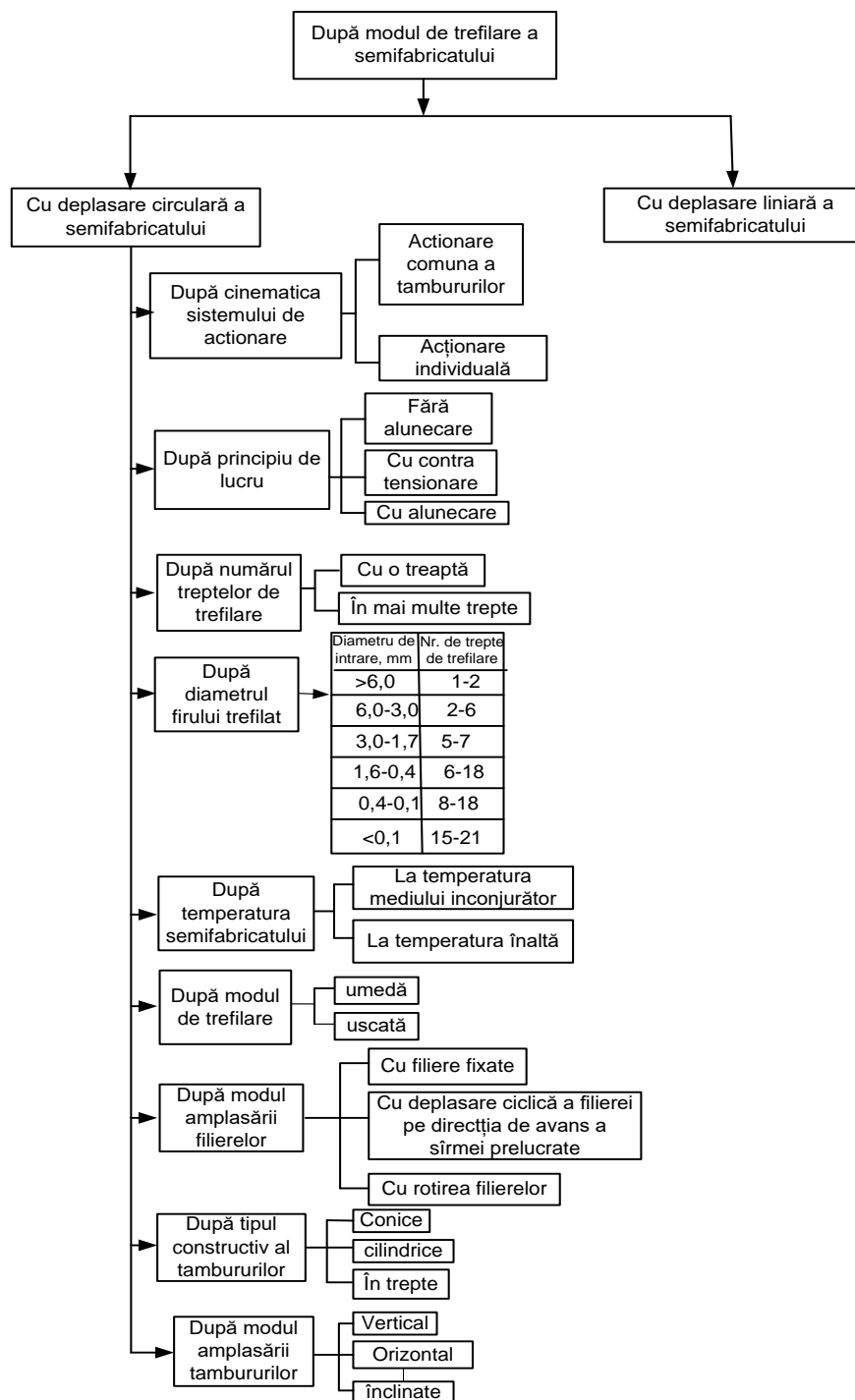


Figura A.1.4 Clasificarea trefiloarelor după principiul de trefilare.

Operațiile de pregătire pentru trefilare (tragere) sunt reprezentate în figura.A1.5:

Decaparea se alege în funcție de scopul urmărit și de condițiile locale. Decaparea poate fi :

- **mecanică**, care constă în curățirea firului și se realizează în mai multe feluri (prin sablare, izbire cu nisip trimis cu aer comprimat sau cu perii rotative, cu role, la prese);
- **termică**, care se realizează prin încălzirea firului și răcirea imediată cu apă (firul și arsura au coeficienți de contracție diferiți);

– *electrolitică și chimică* care poate fi acidă și bazică.

Decaparea *acidă* se produce în acid sulfuric sau acid clorhidric, când sunt atacați oxizii de fier (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4), formând nămolul care cade la fundul băii de decapare.

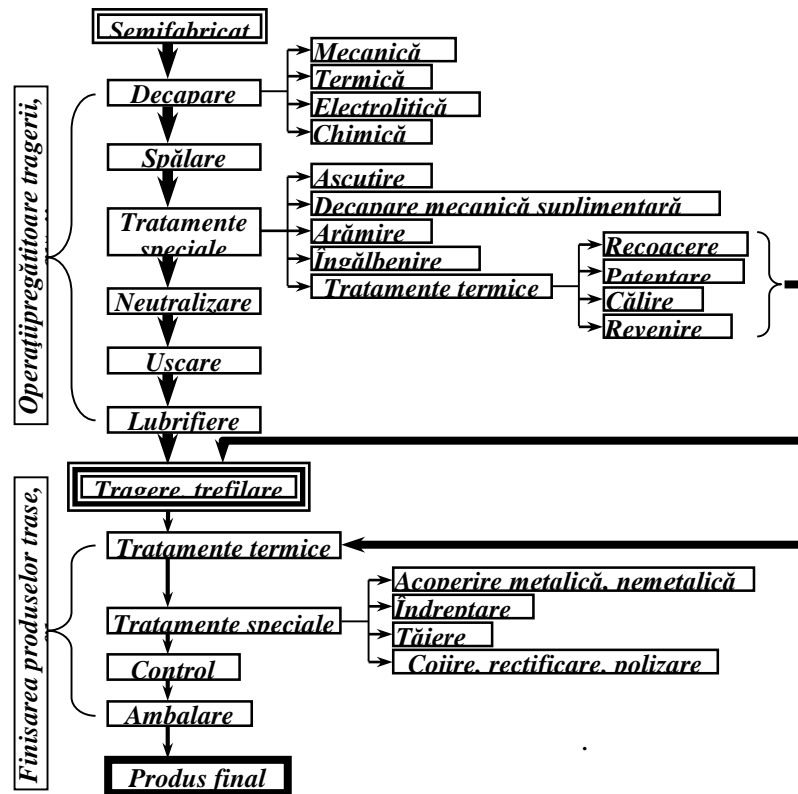


Figura A1.5 Schema fluxului tehnologic de trefilare și tragere a firelor de cupru sau aluminiu. [19,21,102, 103]

Spălarea firului se face cu apă pentru îndepărtarea urmelor de acid după scoaterea firului din bazinul de decapare și eventualul strat de oxid care mai există;

Tratamentele speciale se aplică firelor care urmează a fi ascuțite, arămite, lustruite, zincate etc., între spălare și neutralizare. Tratamentele speciale, mai frecvent folosite, sunt: decaparea mecanică suplimentară, arămirea prealabilă, (care se realizează într-o baie acidulată de sulfat de cupru); îngălbenirea realizată cu scopul îmbunătățirii condițiilor de lubrifiere a firelor, care vor fi trase de mai multe ori prin filieră, lăsând firul după spălare 15-30 min în aer liber (pentru a îngălbeni firele, instalațiile moderne sunt realizate dintr-o cameră de ceață, în care se introduce apă pulverizată amestecată cu o mică cantitate de aer);

Tratamentele termice la care este supus firul urmăresc realizarea a două scopuri: obținerea unor caracteristici ale firului pentru desfășurarea în condiții optime ale procesului de trefilare și obținerea unor caracteristici ale firului, necesare scopului la care va fi folosită. În funcție de scopul urmărit tratamentele termice pot fi aplicate la începutul trefilării, între treceri sau la sfârșitul trefilării.

Principalele tratamente termice aplicate semifabricatelor trefilate sunt:

- **Recoacerea**, care se aplică înaintea trefilării, deoarece pentru realizarea acestui proces, metalul trebuie să aibă un anumit grad de maleabilitate la rece.
- **Patentarea** este un alt tratament termic care se aplică firelor cu 0,4 - 0,9% C. Aplicată între treceri, face ca firele ecruisate, în urma primelor treceri, să capete o structură sorbitică cu mari avantaje privind deformarea plastică. De asemenea, produsul final are rezistență la rupere superioară obținând fire de înaltă rezistență.
- **Călirea**, la prelucrarea prin trefilare, se aplică oțelurilor austenite: manganoase (cu 1% C și 12% Mn) și oțelurilor inoxidabile (cu 0,1%C, 18%Cr și 9%Ni). Prin trefilare aceste oțeluri se ecruisează foarte repede, iar pentru ca trefilarea să poată fi continuată li se aplică un tratament de călire, constând dintr-o încălzire la 1370-1420 K, urmată de o răcire în apă sau aer.
- **Călirea și îmbunătățirea oțelurilor carbon** se aplică unor fire din oțel carbon pentru majorarea durității (călirea), iar pentru obținerea unei structuri stabile după călire se supun revenirii (îmbunătățire).

Neutralizarea se realizează în instalații speciale de neutralizare cu var. În acest sens, se produc câteva imersii în funcție de grosimea stratului de var care urmează a fi depus pe fir. Prin neutralizare cu var se urmărește neutralizarea urmelor de acid rămase pe fir după decapare și spălare, formarea unui strat protector care să împiedice ruginirea firului până la începerea trefilării și în fine, formarea unui strat care să asigure, împreună cu lubrifianul întrebuințat, o bună lubrifiere a firului la trefilare.

Uscarea firului este ultima operație înaintea trefilării, prin care se urmărește uscarea substanței de neutralizare și împiedicarea ruginirii sau oxidării. Uscarea firului contribuie la eliminarea hidrogenului difuzat în interiorul acestuia în timpul decapării. Firul se usucă în cuptoare în care este ținută cca 30 min la o temperatură de 300-350 K.

Operații care urmează după trefilare. În afara tratamentelor termice care se aplică firelor după trefilare și descrise mai sus, acestea mai pot fi supuse tratamentelor speciale, care prevăd următoarele operații: acoperire metalică sau nemetalică (zincare, cositorire, acoperiri polimerice, vopsire), îndreptare, tăiere, cojire, rectificare și polizare.

Acoperire metalică sau nemetalică. Zincarea sau cositorirea se aplică cu scopul protejării suprafețelor firelor împotriva acțiunii atmosferei și poate fi realizată la cald sau electrolytic prin galvanizare.

Zincarea (sau cositorirea) la cald se face printr-o decapare a firelor trefilate și apoi trecerea acestora printr-o instalație de zincare. Firul sub formă de colaci se introduce, mai întâi, în baia cu

o soluție de acid sulfuric cu concentrația de 10-12%, după care se scoate și se spală, iar apoi se introduce în baia cu soluție de acid clorhidric cu o concentrație de 200gr/l, pentru decaparea finală.

Zincarea (sau cositorirea) galvanică se realizează printr-o decapare după care, firul introdus într-o baie de soluție de clorură de zinc (sau sulfat de staniu) are funcția de catod, iar o tablă de zinc (sau cositor) funcția de anod. În același mod se realizează și nichelarea, cromarea galvanică etc. a firelor.

Îndreptarea și tăierea se realizează pentru firele care nu se livrează în colaci, și la cerere, pe mașini de îndreptat cu role, așezate în linie, două câte două.

Rectificarea și polizarea firelor din oțel se realizează special, tăiate în lungimi precise. Rectificarea, care se realizează pe mașini de rectificat, urmărește să îndepărteze eventualul stratul decarburat și să asigure același diametru pe întreaga lungime. Roțile de polizat sunt confecționate din discuri de plută sau pâslă îmbibate cu pastă de polizat, care se rotesc și prin care trece firul.

Finisarea produselor trefilate sau trase. În cazul firelor obținute prin trefilare, se practică protejarea suprafețelor acestora împotriva coroziunii prin acoperiri metalice (zincare, cuprare, alămire, cositorire, cromare, fosfatare) sau nemetalice (emailare, lăcuire, acoperiri cu mase plastice). În cazul barelor și țevilor se execută operații de șutare și debitare, de îndreptare, cojire, șlefuire sau lustruire și de asemenea, acoperiri metalice sau nemetalice.

Indiferent de tipul de produs, obținut prin trefilare sau tragere, aceasta se supune și operațiilor de control și de îndepărtare ale defectelor constatate. În final firele, barele și țevile sunt marcate, cântărite și ambalate, după care intră în depozitul de produse finite în vederea expedierii.

Trefilarea conductoarelor și a tijelor este mai economică față de alte metode de prelucrare, la trefilare dispar pierderile de metal în așchii, care sunt caracteristice prelucrării prin așchiere.

În comparație cu prelucrarea la cald, trefilarea mai are un avantaj: se poate obține fire de grosimi foarte mici cu o structură omogenă și cu dimensiuni de o exactitate înaltă, asigurând în același timp o calitate înaltă a suprafețelor firului și înregistrarea unor caracteristici mecanice superioare.

Firele și tijele pot fi de diferite forme și dimensiuni a secțiunii transversale. Firele rotunde de oțel se confecționează cu diametre de la 0,005 până la 8 mm și mai mult.

După diametru firele se clasifică: foarte groasă (mai mult de 8mm), groasă (de la 6 până la 8mm), cu grosime medie (mai puțin de 6,0 până la 1,6mm), subțire (mai puțin de 1,6 până la 0,4 mm), fină (mai puțin de 0,4 până la 0,1 mm), foarte fină (mai puțin de 0,1mm). Dimensiunile tijelor se află în diapazonul de la 0,3 până la 100 mm.

Procesul de trefilare are loc la o viteză de 50 m /s (în medie 20 - 25 m /s). [23]

A2. Eficientizarea procesului tehnologic de trefilare în câmp ultraacustic

Deformarea plastică a metalelor în câmp ultrasonic este în prezent utilizată în industrie având în vedere faptul, că, în prezența câmpului ultrasonor se constată un efect de înmuiere a metalului și reducerea tensiunii statice de deformare. Efectul de înmuiere este determinat de creșterea mobilității dislocațiilor datorită tensiunilor acustice periodice [19,20,101,104].

În condițiile în care deformarea se produce cu scule activate acustic (filiere, matrițe), apare un efect de reducere al frecării de contact în planul de separație între sculă și piesă.

Suprafețele de contact au o mișcare relativă între ele, în situația când viteza de vibrație este mai mare decât viteza relativă de deplasare, iar forța de frecare este mult mai redusă.

Executându-se, în mod obișnuit, la rece trefilarea este însoțită de ecruisare. Gradul de reducere al secțiunii metalului depinde în primul rând de capacitatea acestuia de ecruisare. De asemenea, pentru evitarea ruperii materialului este necesar ca efortul principal la ieșirea din filieră să nu depășească limita de curgere. [19,20,101,104]

În operațiile de trefilare, scula de lucru/filiera poate fi plasată în centrul oscilației undelor ultrasonore longitudinale (în nodul de presiune) sau în maximul de presiune (nodul oscilației), în cazul în care filiera este activată paralel cu direcția de tragere și, respectiv, perpendicular pe aceasta.

Rotirea matricelor și filierelor, conduce la micșorarea coeficientului de frecare, dar necesită utilizarea unui echipament special, considerent din care rar se utilizează.

La tragerea și trefilarea cu aplicarea vibrațiilor, (cu frecvența optimală 200-500 Hz), vibrațiile sunt aplicate atât semifabricatului cât și sculei de deformare sau concomitent ambelor (figura A2.1).

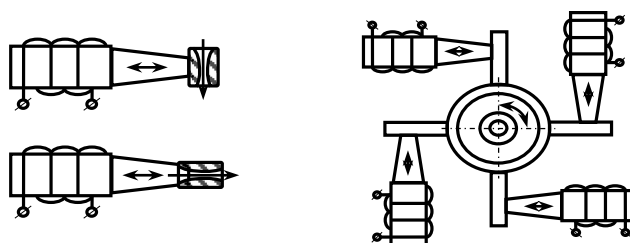


Figura A2.1. Scheme de tragere, trefilare cu aplicarea ultrasunetului. [118]

Activarea ultraacustică a sculei permite reducerea forței de tragere cu (30-50%), cu fluctuații care pot fi atenuate prin realizarea rezonanței sistemului mecanic.

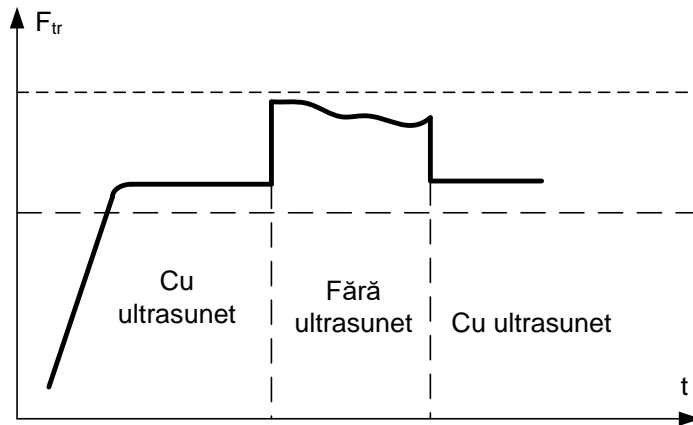


Figura A.2.2. Variația forței de tragere la deformarea în prezența și absența câmpului ultraacustic [104, 105]

Pentru aceasta este necesar ca lungimea firului între filieră și tambururile de tragere să fie de valoare determinată. Astfel, pentru oțel cu plasticitate ridicată, la o configurație optimă a sistemului acustic rezultă o reducere importantă a forței F_{tr} . Un efect benefic important îl are realizarea de unde staționare în firul tras (figura. A.2.3). În acest scop sunt plasate, în mod special, role de presiune R_1 și R_2 de o parte și de alta a filierei 4, poziționată în zona de maxim a oscilației undelor ultrasonore.

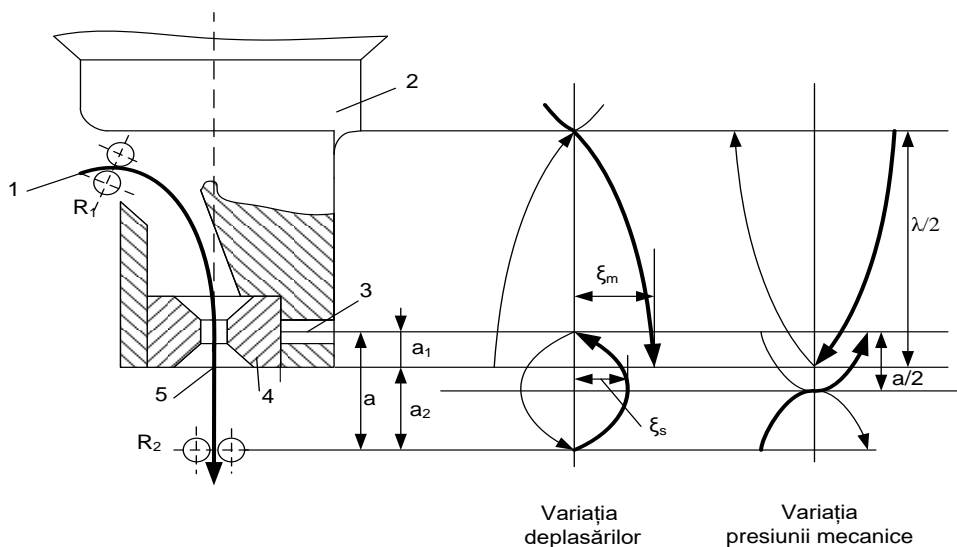


Figura A2.3. Plasarea rolor de presiune la trefilarea ultrasonică. [118]

Filiera 4, fixată cu ajutorul șurubului 3, este supusă acțiunii undelor ultrasonore transmise prin intermediul concentratorului 2. O deosebită importanță o prezintă distanța a_2 , la care sunt plasate rolele reflectoare R_2 . Această distanță asigură, în cazul activării ultraacustice longitudinale, în sensul tragerii, în funcție de cinetica trefilării, apariția în fir a undelor staționare de amplitudine ξ_s . Astfel, viteza de vibrație a filierei v_v poate ajunge superioară vitezei de tragere v_{tr} (figura. A.2.4)

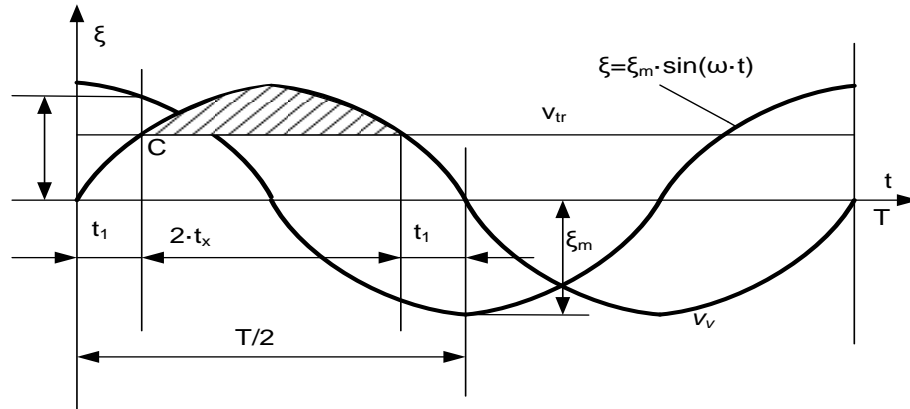


Figura A.2.4. Variația vitezei de vibrație și a celei de tragere.

În punctul C viteza de vibrație v_v a filierei devine mai mare ca viteza de tragere v_{tr} , iar în fir apare un efort de compresie (zona hașurată în figura A.2.4).

Durata în care apare fenomenul de compresie (reducerea forței de tragere) este $2 t_x$

$$2 \cdot t_x = T / 2 - (T / \pi) \cdot \arcsin(v_{tr} / v_{vm}) \quad (\text{A2.1})$$

Unde: v_{vm} – este maximul vitezei de vibrație a filierei ($v_{vm} = \omega \cdot \xi_m$).

Amplitudinea vibrațiilor din fir este dependentă de cea a oscilațiilor din filieră și de viteza de tragere.

Gradul de reducere R a forței medii de tragere datorită activării ultraacustice poate fi determinată din relația [102, 106, 107]:

$$R = \frac{(T / 2 + 2 \cdot t_1) + (T / 2 - 2 \cdot t_1)}{(T / 2 + 2 \cdot t_1) - (T / 2 - 2 \cdot t_1)} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{\arcsin(v_{tr} / v_{vm})} \quad (\text{A 2.2})$$

A3. Necesitatea și Importanța tratării termice a firului trefilat (recoacerea)

Recoacere – este un mod de prelucrare termică, la care după înfierbântare, menținere și răcire bruscă se obține un metal moale și plastic, liber de tensiunile interioare. Recoacerii se supun firele și tijele înainte sau după trefilare.

Tratamente termice ale firelor sun foarte variate:

- Încălzire înainte de decaparare la circa 150 °C;
- Încălzire pentru acoperire prin plastifiere la circa 200 °C;
- Încălzire înainte de galvanizare la circa 700 °C;
- Recoacere la temperaturi cuprinse între 400 și 700 °C;
- Încălzire înainte de trefilare la circa 900 °C;
- Supracălire la circa 1500 °C.

După caracterul prelucrării termice semifabricatul ajunge în hala de calibrare, unde este supus:

- 1) unei recoaceri preventive înainte de subțierea capetelor;
- 2) recoacerea după trifilare; metalul are o duritate, care permite subțierea lui și trefilarea fără înmuiere preventivă;
- 3) recoacere înainte de subțiere, trefilare și după aceste operații.

Valoarea temperaturii, utilizate la recoacere poate fi mai sus sau mai jos de cele critice, la care metalul suportă transformări interioare. În general, există tendința recoacerii metalului la temperaturi cât mai mici posibile, fiindcă aceasta ieftinește procesul și micșorează posibilitatea supraîncălzirii și decarbonării. Durata de recoacere depinde de greutatea, natura și structura inițială a metalului tratat. La fel, aceasta este determinată și de proprietățile pe care dorim să le obținem în urma tratării.

Viteza de înfierbântare a firului sau a tijelor, dacă ele sunt tratate în bobine sau pachete, trebuie să asigure încălzirea uniformă a întregii mase de metal, viteza de înfierbântare depinde de conductibilitatea termică și de poziția materialului în cuptor.

Viteza de răcire se determină din compoziția metalului și duritatea lui care vrem s-o obținem după tratare. În literatura de specialitate s-a constatat că la mărirea deformației totale pot fi obținute rezultate bune, dacă folosim la recoacere temperaturi mai scăzute decât cele normale.

Recoacerea cu recristalizare firelor și tijelor se produce la temperaturi mai joase decât cele critice. În procesul unei, astfel, de recoaceri în locul cristalelor de metal întinse cresc altele noi,

nedeformate. În legătură cu acest proces duritatea metalului se micșorează și se mărește plasticitatea.

În fig. 1.29. este reprezentat procesul schimbării proprietăților metalului în dependență de temperatura de recoacere. După cum se știe la recoacerea firului într-o atmosferă unde este oxigen duce la oxidarea și, respectiv, la înrăutățirea calității suprafeței firului. Considerent din care în practică recoacerea are loc într-o atmosferă cu conținut redus de oxigen, în vid sau în medii unde are loc arderea substanțelor organice.

Cea mai bună metodă de protejare împotriva oxidării firului este crearea unui mediu protector. Aceste medii, după acțiunea lor asupra metalului, pot fi neutre și regenerabile. Ele sunt alese în funcție de cerințele impuse suprafeței metalului, de temperatura, durata recoacerii, construcția cuptorului, costul gazului protector și instalația pentru obținerea lui.

Proprietățile firului de cupru după recoacere

Tabelul A3.1. Proprietățile mecanice a firului de Cupru

Indicatorul	Unitatea de măsură	Valorile indicatorilor	
		pentru <i>Cu</i> moale	pentru <i>Cu</i> tare (ne tratat termic)
Limita de rezistență la întindere	Kg/mm ²	20-26	40-50
Limita de curgere	-	7	38
Limita de rezistență la îndoire	-	2,8	4,8
Rezistența la forfecare	-	19	43
Alungirea relativă la rupere	%	40-60	2-4

Proprietățile mecanice ale firului de cupru sunt puternic dependente de valoarea temperaturii la care este tratat termic (Figura A3.1).

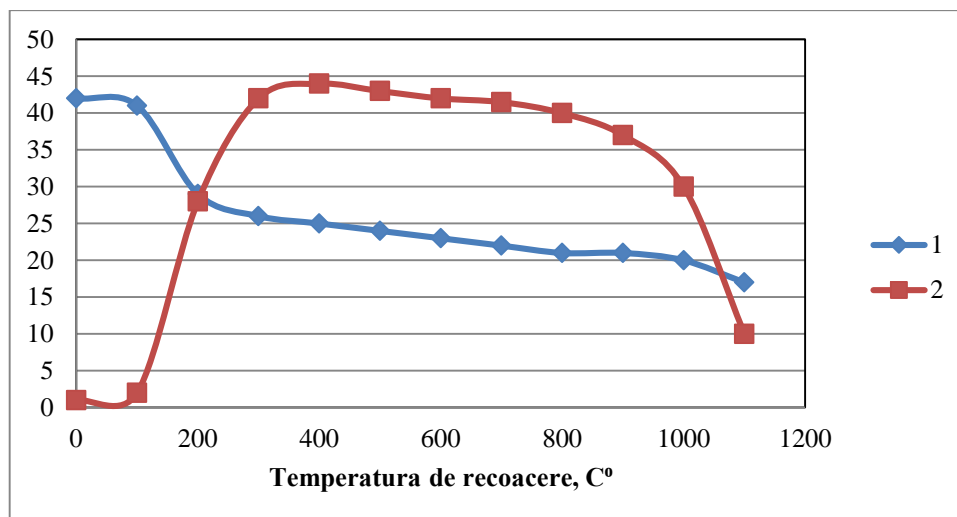


Figura A3.1 Influența temperaturii de recoacere asupra:
1-rezistența la rupere (kg/mm²); 2-alungirea relativă (%).

Influența temperaturii de recoacere asupra conductibilității este reprezentată în Figura.

A3.2.

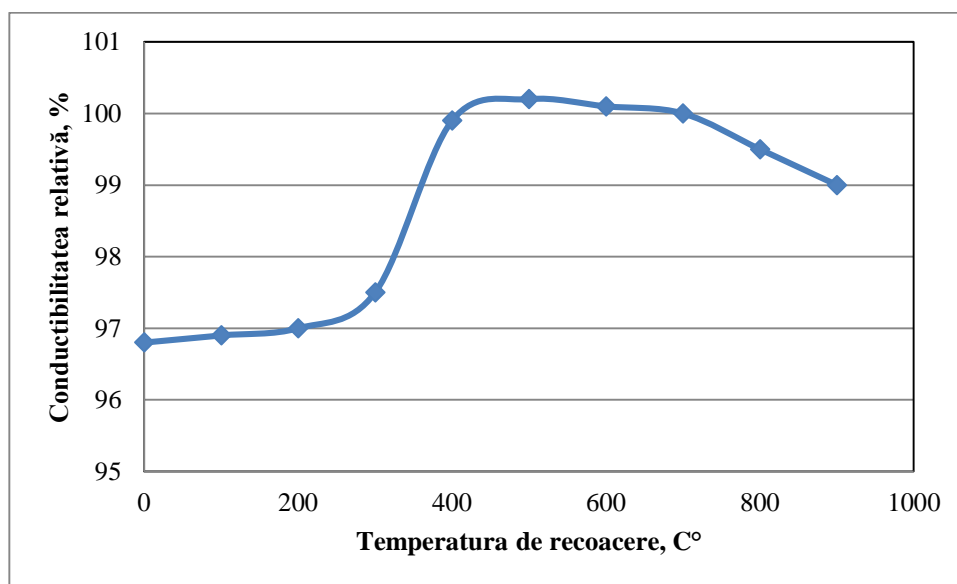


Figura A3.2 Influența temperaturii de recoacere asupra conductibilității

A4. Calculul parametrilor sistemului de reglare vectorială a mecanismului de bobinat

A4.1. Calculul parametrilor sistemului

A4.1.1. Calculul parametrilor motorului mecanismului de bobinat

Calculul buclelor de reglare se realizează conform schemei din figura 2.8.

Amplitudinea tensiunii de inducție a statorului [108, 109, 121]:

$$E_s = U_{sm} - R_s I_{sm} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_s - R_s \sqrt{2} I_s = \frac{1.414}{1.732} 400 - 1.23 \cdot 1.414 \cdot 8.3 = 312.11 \text{ V} \quad (\text{A4.1})$$

Amplitudinea fluxului statoric:

$$\psi_s = \frac{E_s}{\Omega_s} = \frac{312.114}{157} = 1.98 \text{ Wb} \quad (\text{A4.2})$$

Amplitudinea tensiunii circuitului de magnetizare:

$$E_m = \frac{\sqrt{2} U_s}{\sqrt{3}} - I_{sm} \sqrt{R_s^2 + (X_{s\sigma})^2} = \frac{1.414}{1.732} 400 - 8.3 \sqrt{1.2^2 + 2.197^2} = 304 \text{ V} \quad (\text{A4.3})$$

Amplitudinea fluxului de magnetizare:

$$\psi_m = \frac{E_m}{\Omega_s} = \frac{304}{157} = 1.93 \text{ Wb} \quad (\text{A4.4})$$

Amplitudinea tensiunii rotorice:

$$E_r = E_m - \sqrt{2} I_r X_{r\sigma} = 304 - 1.414 \cdot 6.92 \cdot 2.197 = 282.5 \text{ V} \quad (\text{A4.5})$$

Amplitudinea fluxului rotorice:

$$\psi_r = \frac{E_r}{\Omega_s} = \frac{282.5}{157} = 1.79 \text{ Wb} \quad (\text{A4.6})$$

Inductivitățile schemei echivalente:

$$L_{s\sigma} = \frac{X_{s\sigma}}{\Omega_s} = \frac{2.197}{157} = 0.013 \text{ Hn.} \quad (\text{A4.7})$$

$$L_{s\sigma} = L_{r\sigma} = 0.013 \text{ Hn} \quad (\text{A4.8})$$

$$L_m = \frac{X_m}{\Omega_s} = \frac{64.48}{157} = 0.41 \text{ Hn.} \quad (\text{A4.9})$$

$$L_s = L_r = L_{s\sigma} + L_m = 0.013 + 0.41 = 0.423 \text{ Hn} \quad (\text{A4.10})$$

Factorul de legătură electromagnetică a rotorului:

$$k_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0.41}{0.423} = 0.96 \quad (\text{A4.11})$$

Factorul total de dispersie:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} = 1 - \frac{0.41^2}{0.423 \cdot 0.423} = 0.06 \quad (\text{A4.12})$$

Rezistența echivalentă a motorului:

$$R_E = R_s + k_r R_r = 1.23 + 0.96^2 \cdot 0.52 = 1.7 \, \Omega \quad (\text{A4.13})$$

Constanta de timp a înfășurării statorice:

$$T_s = \frac{L_s}{R_E} = \frac{0.423}{1.7} = 0.248 \, s \quad (\text{A4.14})$$

Constanta de timp a înfășurării rotorice:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{0.423}{0.52} = 0.813 \, s \quad (\text{A4.15})$$

A.4.1.2. Calculul canalului de reglare a fluxului magnetic

Schema structurală a canalului fluxului magnetic la un reglaj vectorial include două bucle de reglare automată: bucla interioară a curentului reactiv de magnetizare $I_{sx}=I_m$ și bucla exterioară a fluxului de magnetizare (fig.A.2). [1,122]

Sistemul rotitor de coordonate x - y este orientat după fluxul rotoric $\psi_r = \psi_{rx} = |\psi_r|, (\psi_{ry} = 0)$ ceea ce asigură cea mai simplă structură a SRA. Această schemă nu ia în considerație transformările directe de coordonate $ABC/\alpha\text{-}\beta$, $\alpha\text{-}\beta/x\text{-}y$ și inverse $x\text{-}y/\alpha\text{-}\beta$ și $\alpha\text{-}\beta/ABC$, deoarece aceste transformări au coeficienți de transfer opuși care se compensează unii pe alții.

În bucla exterioară este introdus un bloc de limitare al curentului de magnetizare (BLCM). Calculul se efectuează începând cu bucla interioară.

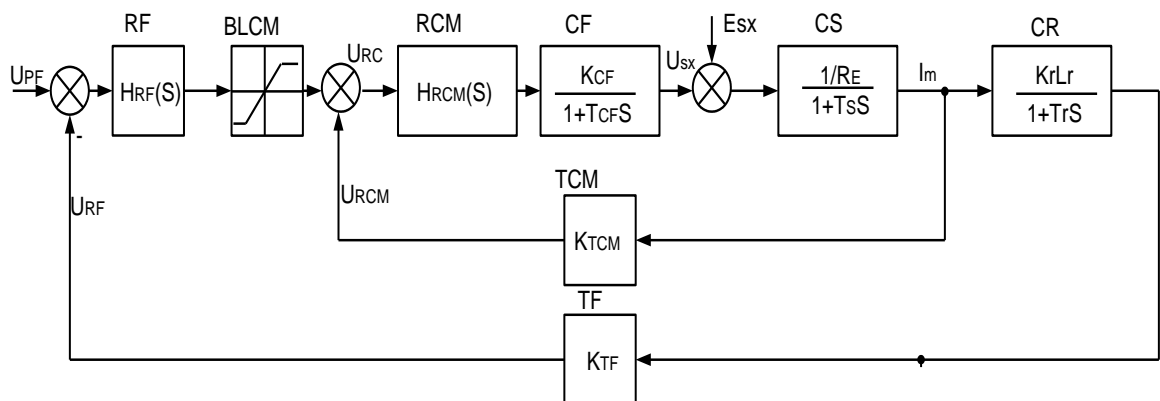


Figura A4.1 Schema structurală a canalului fluxului magnetic la reglajul vectorial.

A.4.1.3. Calculul buclei curentului de magnetizare

Acest calcul are ca scop principal determinarea funcției necesare a regulatorului curentului de magnetizare (RCM) și acordarea parametrilor lui conform obiectului de reglare a acestui curent. El poate fi efectuat în acest caz fără a lua în considerație influența tensiunii de autoinducție E_{sx} .

Convertorul de frecvență poate fi aproximat cu un element aperiodic de gradul întâi

$$H_{CF}(S) = \frac{U_{SX}(S)}{U_c(S)} = \frac{k_{CF}}{1 + T_{CF}S} \quad (A4.16)$$

$$\text{Unde: } k_{CF} = \frac{U_{sx.N}}{U_{CN}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_s}{U_{CN}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{400}{5} = 65.3 \quad (A4.17)$$

$T_{CF}=0,005s$ – constanta interioară a CF fără element integrator de prescriere.

În situația când alegem un traductor de curent de tipul Holl, atunci acest traductor poate fi descris printr-un element neinertial:

$$k_{TCM} = \frac{U_{TCM.N}}{I_{SX.N}} = \frac{3.5}{3.5} = 1\Omega \quad (A4.18)$$

Acordarea RCM se face relativ simplu pe baza criteriului modulului utilizând f.d.t dorită a buclei deschise de curent:

$$H_{d.c}^d(S) = \frac{1}{2T_{\mu c}S(T_{\mu c}S + 1)} \quad (A4.19)$$

Unde $T_{\mu c}$ – constanta mică (necompensabilă de către regulator) a buclei curentului:

Obiectul de reglare a RCM

$$\begin{aligned} H_{ORC}(S) &= H_{CF}(S) \cdot H_{CS}(S) \cdot H_{TCM}(S) = \\ &= \frac{k_{CF}}{1 + T_{CF}S} \cdot \frac{1/R_E}{1 + T_S S} \cdot \frac{k_{TCM}}{1 + T_{TCM}S} = \frac{k_{OR.C}}{(1 + T_{\mu c}S)(1 + T_S S)} \end{aligned} \quad (A4.20)$$

$$\text{Unde: } T_{\mu c} = T_{CF} = 0.005 \text{ S}; \quad k_{OR.C} = \frac{k_{CF} \cdot k_{TCM}}{R_E} \quad (A4.21)$$

F.d.t a buclei deschise de curent

$$H_{d.c}(S) = H_{RCM}(S) \cdot H_{OR.C}(S) \quad (A4.22)$$

Ca urmare dacă se egalează $H_{d.c}(S) = H_{d.c}^d(S)$

$$H_{RCM}(S) = \frac{H_{d.c}^d(S)}{H_{OR.C}(S)} = \frac{1}{2T_{\mu c}S(T_{\mu c}S + 1)} \cdot \frac{(1 + T_{\mu c}S)(1 + T_S S)}{k_{OR.C}} = \frac{(1 + T_S S)}{2k_{OR.C}T_{\mu c}S} \quad (A4.23)$$

Adică regulatorul RCM trebuie să fie un regulator PI.

Constanta izodromă a acestui regulator compensează constanta mare a buclei – constanta rotorică $T_{IZ.C} = T_S = 0,248 \text{ S}$

Constanta de integrare a RCM este:

$$T_{I.C} = 2k_{OR.C} \cdot T_{\mu c} = 2 \frac{k_{CF} \cdot k_{TCM}}{R_E} \cdot T_{\mu c} = 2 \frac{65.3 \cdot 1}{1.7} \cdot 0.005 = 0.381 \text{ S} \quad (\text{A4.24})$$

Coeficientul părții proporționale a RCM:

$$k_{RCM} = \frac{T_{IZ.C}}{T_{I.C}} = \frac{0.248}{0.381} = 0.65 \quad (\text{A4.25})$$

F.d.t. a buclei închise de curent (acordate):

$$H_{BC}(S) = \frac{I_{SX}(S)}{U_{PC}(S)} = \frac{H_{d.c}(S)}{1 + H_{d.c}(S)} = \frac{1/k_{TCM}}{2T_{\mu c}^2 S^2 + 2T_{\mu c} S + 1} \quad (\text{A4.26})$$

Unde: $1/k_{TCM}$ - f.d.t. inversă a TCM, introdusă în circuitul de prescriere a curentului $H_{OR.C}(S)$, pentru ca SRA să fie echivalentă la introducerea TCM în $H_{OR.C}(S)$ când circuitul de reacție devine unitar.

A.4.1.4. Calculul buclei exterioare de flux

Funcția de transfer a traductorului de flux

$$k_{TF} = \frac{U_{RF}(S)}{\psi_{rx}} = \frac{8}{1.79} = 4.46 \text{ V / Wb} \quad (\text{A4.27})$$

F.d.t. a obiectului de reglare a acestei bucle:

$$H_{OR.F}(S) = H_{BC}(S) \cdot H_{CR}(S) = \frac{1/k_{TCM} \cdot k_{TF}}{2T_{\mu c}^2 S^2 + 2T_{\mu c} S + 1} \cdot \frac{k_r \cdot L_r}{(1 + T_r S)} = \frac{k_{OR.F}}{(2T_{\mu c}^2 S^2 + 2T_{\mu c} S + 1)(1 + T_r S)} \quad (\text{A4.28})$$

$$\text{Unde: } k_{OR.F} = \frac{k_{TF} \cdot k_r \cdot L_r}{k_{TCM}} = \frac{4.46 \cdot 0.96 \cdot 0.423}{1} = 1.81 \quad (\text{A4.29})$$

Pentru acordarea regulatorului de flux RF utilizăm același criteriu al modulului cu f.d.t. a lui dorită

$$H_{d.F}^d(S) = \frac{1}{2T_{\mu F} S (2T_{\mu c}^2 S^2 + 2T_{\mu c} S + 1)} \quad (\text{A4.30})$$

F.d.t. necesară RF se determină în mod analogic, obținând un regulator PI

$$H_{RF}(S) = \frac{H_{d.F}^d(S)}{H_{OR.F}(S)} = \frac{1}{2T_{\mu F}S(2T_{\mu c}^2S^2 + 2T_{\mu c}S + 1)} \cdot \frac{(2T_{\mu c}^2S^2 + 2T_{\mu c}S + 1)(1 + T_rS)}{k_{OR.F}} =$$

$$= \frac{1 + T_rS}{k_{OR.F}T_{\mu F}S} \quad (A4.31)$$

Unde: $T_{\mu F} = 2T_{\mu c} = 2T_{CF} = 0.01 S$

Constanta izodromă a regulatorului de flux în acest caz :

$$T_{IZ.F} = T_r = 0.813 S$$

$$\text{Constanta de integrare a RF: } T_I = k_{OR.F} \cdot T_{\mu F} = 1.81 \cdot 0.01 = 0.0181 S \quad (A4.32)$$

Coeficientul de amplificare a părții proporționale:

$$k_{RF} = \frac{T_{IZ.F}}{T_{I.F}} = \frac{0.813}{0.0181} = 44.9 \quad (A4.33)$$

A.4.1.5. Calculul canalului de reglare vectorială a vitezei motorului

Canalul de reglare vectorială a vitezei motorului de acționare a tamburului de înfășurare are, conectate în cascadă bucla interioară a curentului statoric activ $I_{sy} = I_r$ cu regulatorul RCA și bucla exterioră de viteză (RV) și traductorul de viteză (figura A4.2).

Acest canal include trei dispozitive de multiplicare-divizare DMD a parametrilor la ieșirea RV, iar altul la ieșirea buclei de curent.

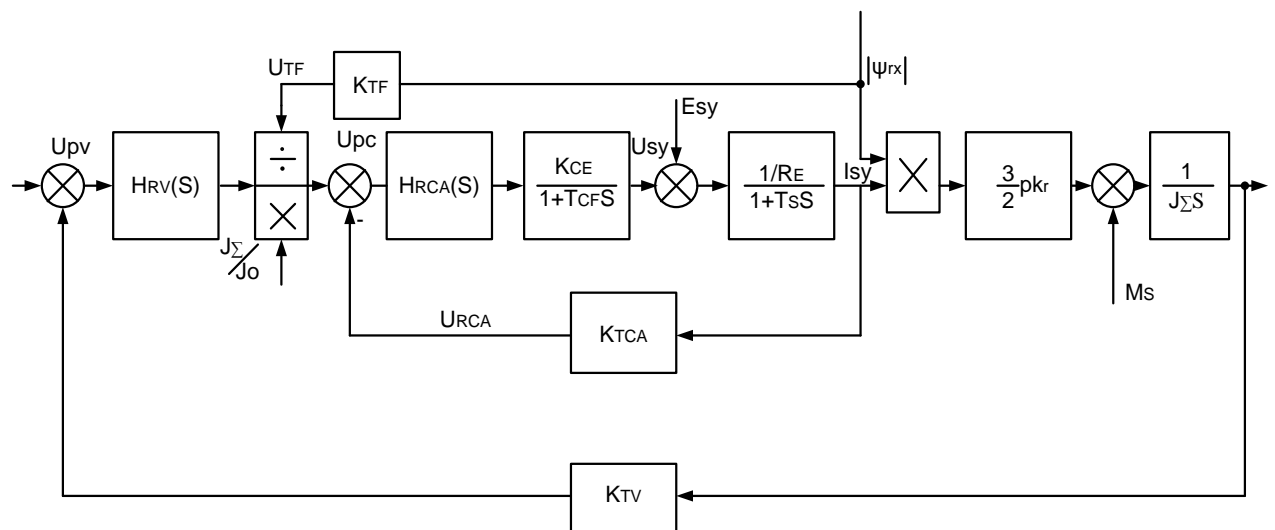


Figura A4.2 Schema structurală simplificată a canalului de reglare vectorială a vitezei.

Dispozitivul de divizare de la ieșirea RV este determinat de faptul că acest regulator generează un semnal de prescriere al cuplului electromagnetic al motorului, care este proporțional cu fluxul ψ_r și curentul statoric activ $I_{SA} \approx I_r$.

Ca urmare, semnalul de prescriere pentru bucla de curentului statoric activ:

$$U_{PCA} = \frac{U_{RV}}{U_{TF}} \quad (\text{A4.34})$$

Dispozitivul de multiplicare de la eșirea RV este destinat pentru corecția cuplului în funcție de momentul variabil de inerție al tamburului.

A.4.1.6. Calculul buclei curentului statoric activ

Traductorul de curent statoric activ trebuie ales cu același semnal de ieșire $U_{TCA,N}=3,5$ V la un curent nominal 3.5 A. Însă, curentul activ este de două ori mai mare, de aceea la intrarea RCA se introduce un divizor de tensiune cu coeficientul 0,5

$$k_{TCA} = \frac{U_{TCA,N}}{I_{CA,N}} = \frac{3.5}{2 \cdot 3.5} = 0.5 \Omega \quad (\text{A4.35})$$

F.d.t. a CF este aceeași ca și în cazul curentului statoric reactiv:

$$H_{CF}(S) = \frac{k_{CF}}{1+T_{CF}S} = \frac{65.3}{1+0.005S} \quad (\text{A4.36})$$

$$\text{Unde: } k_{CF} = \frac{U_{sy,N}}{U_{CN}} = 65.3; T_{CF} = 0.005 S \quad (\text{A4.37})$$

F.d.t. a obiectului de reglare a CSA:

$$H_{OR.A}(S) = \frac{k_{CF}}{1+T_{CF}S} \cdot \frac{1/R_E}{1+T_S S} \cdot \frac{k_{TCA}}{1+T_{TCA}S} = \frac{k_{OR.A}}{(1+T_{\mu C}S)(1+T_S S)} \quad (\text{A4.38})$$

$$\text{Unde: } k_{OR.A} = \frac{k_{CF} \cdot k_{TCA}}{R_E} = \frac{65.3 \cdot 0.5}{1.7} = 19.2 \quad (\text{A4.39})$$

$T_{\mu C} = T_{CF} = 0.005 S$ - constanta necompensabilă a buclei de curent.

Aplicând această f.d.t dorită a buclei deschise de curent, obținem un regulator PI de curent cu f.d.t.:

$$H_{RCA}(S) = \frac{1+T_{IZ.C}S}{T_{I.C}S} = \frac{1+T_S S}{2k_{OR.A} \cdot T_{\mu C} S} \quad (\text{A4.40})$$

$$\text{Unde: } T_{IZ.C} = T_S = 0.248 S.$$

$$T_{I.C} = 2k_{OR.A} \cdot T_{\mu C} = 2 \cdot 19.2 \cdot 0.005 = 0.192 S. \quad (\text{A4.41})$$

Coeficientul de amplificare al RCA

$$k_{RCA} = \frac{T_{IZ.C}}{T_{I.C}} = \frac{0.248}{0.192} = 1.29 \quad (\text{A4.42})$$

F.d.t. a buclei incluse de curent:

$$H_{BC}(S) = \frac{1/k_{TCA}}{2T_{\mu C}S^2 + 2T_{\mu C} + 1} = \frac{2}{2T_{\mu C}S^2 + 2T_{\mu C} + 1} \quad (\text{A4.43})$$

A.4.1.7. Calculul buclei de viteză

Alegem traductorul de viteză cu nu coeficient de transfer:

$$k_{TV} = \frac{U_{TC.V}}{\Omega_{rN}} = \frac{8}{150} = 0.053 \text{ V.S} \quad (\text{A4.44})$$

Momentul total de inerție al motorului și tamburului:

$$\begin{aligned} J_{\Sigma} &= J_M + J_T = J_M + m_B \cdot (R_T^2 - R_{TO}^2) / i_R^2 = \\ &= 0.118 + 500 \cdot (0.3^2 - 0.15^2) / 1.5^2 = 15.118 \text{ kg} / \text{m}^2 \end{aligned} \quad (\text{A4.45})$$

Unde: $m_B = 500 \text{ kg}$; $R_T = 0,3\text{m}$; $R_{TO} = 0,15\text{m}$

F.d.t. a obiectului de reglare a vitezei:

$$H_{OR.V}(S) = H_{BC}(S) \cdot k_{TV} \cdot \Psi_r \frac{3}{2} p \cdot k_r / J_{\Sigma} S = \frac{k_{OR.V}}{S(T_{\mu C}^2 S^2 + 2T_{\mu C} S + 1)} \quad (\text{A4.46})$$

Unde $k_{OR.V} = 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot 0.96 \cdot 1.79 \cdot 0.053 / 15.118 = 0.036$

Dacă pornim de la această, f.d.t. dorite a buclei deschise de viteză:

$$H_{d.v}^d(S) = \frac{1}{T_{\mu V} S(2T_{\mu C} S^2 + 2T_{\mu C} S + 1)} \quad (\text{A4.47})$$

Atunci obținem un regulator pur proporțional de viteză:

$$H_{RV} = \frac{H_{d.v}^d}{H_{OR.V}} = \frac{1}{k_{OR.V} T_{\mu V}} = \frac{1}{2k_{OR.V} T_{\mu C}} = \frac{1}{2 \cdot 0.036 \cdot 0.005} = 2766.57 \quad (\text{A4.48})$$

F.d.t. a buclei de viteză închise cu regulator proporțional este:

$$H_{BV}(S) = \frac{1/k_{TV}}{2T_{\mu C} S(T_{\mu C} S^2 + 2T_{\mu C} S + 1) + 1} \quad (\text{A4.49})$$

Însă, un regulator pur proporțional de viteză nu asigură o eroare staționară în raport cu cuplul de sarcină al motorului. Mecanismul de înfășurare a cablului nu necesită o eroare staționară nulă, de aceea alegem un regulator PI de viteză. [53]

A5.Setarea Convertorului MD380 la linia de trefilare cu regulator PID fără corecții după diametrul și momentul de inerție al bobinei

Codul funcției	Denumirea	Valoarea
F1-00	Tipul motorului	0
F1-01	Puterea motorului	De pe motor
F1-02	Tensiunea nominală	380V
F1-03	Curentul nominal	De pe motor
F1-04	Frecvența nominală	50Hz
F1-05	Turațiile nominale	De pe motor
F1-37	Regimul de setare: static	1
FP-01	Funcție specială: regim de bobinator	5
F0-02	Sursa de semnal de comandă	1
F0-03	Sursa internă de semnal=PID	8
F0-10	Frecvența maximă	80.00Hz
F0-12	Frecvența maximă posibilă	80.00Hz
F0-17	Timpul de accelerare 1	1.0s
F0-18	Timpul de decelerare	1.0s
F4-00	DI1=pornire in corotație	1
F4-01	DI2=resetare eroare	9
F4-13	Pozitia de jos a brațului compensator	0~2
F4-15	Pozitia de sus a brațului compensator	8~10
F5-02	TA-TC=control aranjător	3
F5-04	DO1=eșire eroare	2
F6-10	Tipul de oprire=Oprire liberă	1
F8-13	Controlul sensului de rotație	1
F8-19	Detectarea valorii frecvenței(FDT1)	1.5Hz
FA-05	Coeficientul proporțional al regulatorului Kp1	10~15
FA-06	Coeficientul integral al regulatorului Ti1	0,8
FA-07	Coeficientul diferențial al regulatorului Td1	0,35

FA-08	PID Frecvența de oprire inversă	0
FA-10	PID valoarea de histerezis	0,5
FA-11	PID timpul de schimb prescris	5s
FA-13	Poziția de sus a brațului compensator în raport cu cea de jos	60-80
FA-23	Valoarea maximă pozitivă a deviației dintre două ieșiri	0,3
FA-24	Valoarea maximă negativă a deviației dintre două ieșiri	0,3
FA-15	Coeficientul proporțional al regulatorului Kp2	25
FA-16	Coeficientul integral al regulatorului Ti2	0,12
FA-18	Condiția de comutare dintre parametrii regulatorului PID2: Comutarea automată în baza valorii deviație semnalului de la compensator.	2

A6. Setarea Convertorului MD380 la linia de trefilare fără regulator PID cu corecții după diametrul și momentul de inerție al bobinei

Codul funcției	Denumirea	Valoarea
F1-01	Puterea motorului	Pe placuță
F1-02	Tensiunea nominală	380V
F1-03	Curentul Nominal	Pe placuță
F1-04	Frecvența nominală	50Hz
F1-05	Numărul de rotații nominal	Pe placuță
F1-11	Regim de setarea statică	1
FP-01	Resetarea parametrilor de fabrică	1
F0-02	Alegerea surse de semnal	1
F0-03	Sursa de semnal principală a convertorului	1
F0-10	Frecvența Maximă	75
F0-17	Timpul de accelerare	1
F0-18	Timpul de decelerare	1
F4-00	DI1=pornire în corotație	1
F4-02	DI3=resetarea diametrului bobinei	31
F4-03	DI4=comutator de viteze	33
F4-04	DI5=resetarea erorii	9
F4-13	A11 valoarea maximă a semnalului în poziția de jos a brațului compensator	
F4-15	A11 valoarea minimă a semnalului în poziția de sus a brațului compensator	
F5-02	TA/TC control aranjator	3
F5-04	DO1= ieșire logică în caz de eroare	2
F6-10		1
FH-00	Regim de lucru pentru trefilor	1
FH-01	Raportul de transmisie	1,33
FH-02	Diametrul maxim al bobinei pline	600

FH-03	Diametrul 1 al bobinei	Diametrul 1
FH-04	Diametrul 2 al bobinei	Diametrul 2
FH-08	Viteza maximă a liniei	500
FH-29	Resetarea automată a erorii	1
FH-30	Intervalul de timp la autoresetare	3

A7.Mențiuni

MINISTERUL EDUCAȚIEI
AL REPUBLICII MOLDOVA

UTM

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

DIPLOMĂ

Gradul II

*Conferința Tehnico-Științifică
a Doctoranzilor și Studenților
26-28 noiembrie, 2015*

Se decernează

Vadim Carac

Facultatea F.E.T.E.

*Pentru cea mai bună
comunicare științifică*

Ion Bostan
Rector, academician

Chișinău 2015

MINISTERUL EDUCAȚIEI
AL REPUBLICII MOLDOVA



UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

DIPLOMĂ



Se decernează d-lui

CAZAC Vadim

drd.

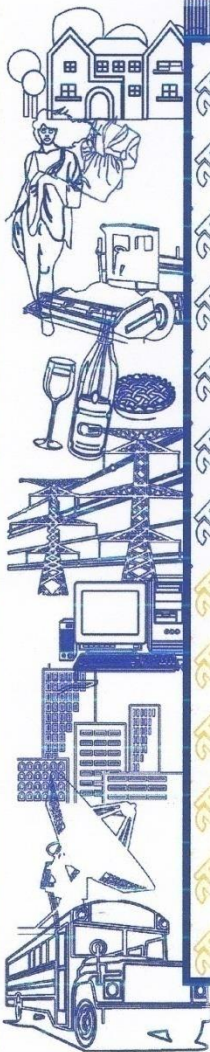
FEIE, Catedra EM

**Cel mai bun doctorand
al anului 2014-2015**



Viorel Bostan
Rector, doctor habilitat

Chișinău 2015



SIEMEN 2015
DIPLOMA OF PARTICIPATION

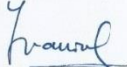
Awarded to

VADIM CAZAC

In acknowledgement of your participation at the
10th International Conference on Electromechanical and Power Systems

CHAIRS OF THE ORGANIZING COMMITTEE

Sergiu IVANOV

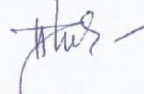


06-09.10.2015

Ilie NUCA



Dorin Dumitru LUCACHE



Craiova - Chişinău

CERTIFICATE OF ATTENDANCE

This is to certify that:

MR. VADIM CAZAC

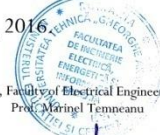
has presented a scientific contribution at
the 9th INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXPOSITION ON
ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING - EPE 2016

held in IASI, ROMANIA, October 20 - 22, 2016

Conference chairman,
Prof. Marcel Istrate



Dean, Faculty of Electrical Engineering,
Prof. Mirinel Temneanu







Universitatea
Ștefan cel Mare
Suceava



Erasmus+

NR. 6750/20.05.2016

ATESTAT DE PERIOADĂ
MOBILITĂȚI DE FORMARE - STT
Anul academic 2015-2016

Prin prezentul document se certifică faptul că domnul lector univ. dr. ing. **Vadim CAZAC** de la Facultatea de Energetică și Inginerie Electrică a Universității Tehnice a Moldovei, a desfășurat activități de formare la Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor a Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava (RO SUCEAVA01), de la data de **16.05.2016** până la data de **20.05.2016**, în cadrul programului ERASMUS+, Mobilități în domeniul universitar între țările programului și țările partenere.

Numărul zilelor de mobilitate: **5 zile**

PRORECTOR

COORDONATOR INSTITUȚIONAL ERASMUS+

Prof.univ.dr. Ștefan PURICI



CERTIFICAT

Prin prezentul certificat se confirmă faptul, că rezultatele încercărilor experimentale și simulării proceselor tranzitorii, efectuate pe parcursul realizării tezei de doctorat “ELABORAREA ȘI MODERNIZAREA SISTEMELOR ELECTROMECHANICE INDUSTRIALE DE PRODUCERE A CABLURILOR ELECTRICE” a doctorandului CAZAC Vadim, Departamentul Inginerie Electrică, Facultatea de Energetică și Inginerie Electrică, U.T.M., au fost implementate la modernizare sistemului electromecanic a strungului de trefilare prin integrarea lui într-un sistem unic de comandă cu modulul de recoacere a firului electric, două convertoare de frecvență, cu un traductor de viteză și un traductor a fortei de tensionare în cadrul întreprinderii TEHELECTRO-SV S.R.L.

Petelca Viorel,
directorwww.tehelectro-sv.com

Grădina Botanică, 9/1 Chișinău - Moldova
TELEFON: +373 22 527140, FAX: +373 22 527140, E-MAIL: sales@tehelectro-sv.com, office@tehelectro-sv.com, COD FISCAL: 1003600053851
CONT BANCAR: 22514010149299 BANCA: Moldova Agroindbank SA Chișinău AGRNMD2X

DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII

Subsemnatul, declar pe răspundere personală că materialele prezentate în teza de doctorat sunt rezultatul propriilor cercetări și realizări științifice. Conștientizez că, în caz contrar, urmează să suport consecințele în conformitate cu legislația în vigoare.

Cazac Vadim

Semnătura

Data:

CURRICULUM VITAE

Numele, prenumele:	CAZAC Vadim	
Data și locul nașterii:	18.12.1987, satul Climăuții de Jos, raionul Șoldănești, Republica Moldova	
Starea familială:	Celibatar	
Adresa la domiciliu:	Satul Climăuții de Jos, r-nul Șoldănești, Republica Moldova, Tel: 0272-55-120	
Adresa la serviciu:	Str. 31 August 1989 nr. 78, mun. Chișinău, Republica Moldova. Tel: 022-23-72-82	
Funcția:	Lector universitar	
Studii:	<ul style="list-style-type: none">• 2010 - diplomă de licență, specialitatea Masini si Acționări Electrice, UTM, FE, catedra EMM• 2012 - diplomă de masterat, specialitatea Inginerie electrică, UTM, FEIE, catedra EMM	
Activitatea profesională:	2012 – prezent: cadru didactic, departamentul Inginerie Electrică, FEIE, UTM Cursuri predate: 2012-prezent – Instalații Electrotehnologice 2015-prezent – Electrotehnica și Electronica Industrială	
Domeniu de interes științific:	<ul style="list-style-type: none">- Sisteme de control automat.- Acționări electrice	
Participări la evenimente științifice internaționale	<ol style="list-style-type: none">1. 11th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems SIELMEN 2017 11-October Iași Romania, 12-13 Chișinău Republic of Moldova.2. International conference and exposition on electrical and power engineering, EPE 2016 20-22 Octombrie, Iasi 20163. 13th International Conference on Development and Application Systems, Suceava, Romania, May 19-21, 20164. 10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems SIELMEN 2015 6-Craiova, 8-9 Chișinău October 20155. 5th International Conference on Modern Power Systems MPS-2013, 28-31 May 2013, Cluj-Napoca, Romania6. A 9-a conferință internațională cu expoziție de sisteme electromecanice și energetice SIELMEN 2013, Chișinău, Republica Moldova7. International Conference on Applied and Theoretical Electricity - ICATE 2012, Craiova, 26-27 october8. International Conference of Scientific Paper AFASES 2012 Brasov, 24-26 May 20129. Conferința Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice, SIELMEN 2011, Chișinău, 13-14 octombrie 2011,	
Cunoașterea limbilor:	Română – excelent (nativă) Rusă – bine Engleza - bine	
E-mail:	vadimcazac@gmail.com; vadim.cazac@ie.utm.md	
Tel:	+373 79019692	