

UNIVERSITATEA TEHNICĂ TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ

Ing. ION PIROI

OPTIMIZAREA FUNCȚIONĂRII
GENERATOARELOR DE MICĂ ȘI MEDIE PUTERE
UTILIZATE ÎN ECHIPAREA
MICROHIDROCENTRALELOR

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducători științifici:

Acad. Prof. Dr. Ing. TOMA DORDEA

Prof. Dr. Ing. TUDOR AMBROS

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

1996

CUPRINS

	CUPRINS	3
	INTRODUCERE	7
	LISTĂ DE SIMBOLURI	8
1	PREZENTAREA UNOR METODE ACTUALE DE OBȚINERE A ENERGIEI ELECTRICE PRIN MICROCENTRALE	11
	1.1 Introducere	11
	1.2 Prezentarea critică a posibilităților de producere a energiei electrice în microcentrale autonome	11
	1.2.1 Generatorul de curent continuu, posibil convertor de energie mecanică în energie electrică în microcentrale	11
	1.2.2 Generatorul asincron, posibil convertor de energie mecanică în energie electrică în microcentrale	12
	1.2.3 Generatorul sincron, posibil convertor de energie mecanică în energie electrică în microcentrale	14
	1.3 Tipuri de excitație a generatoarelor sincrone	14
2	CARACTERISTICILE MECANICE ALE MAȘINILOR PRIMARE ȘI INFLUENȚA LOR ASUPRA FUNCȚIONĂRII ANSAMBLULUI MAȘINĂ PRIMARĂ - GENERATOR SINCRO	25
	2.1 Stabilirea funcționării agregatului mașină primară - generator sincron	25
	2.2 Caracteristica mecanică a unei turbine hidraulice și influența ei asupra funcționării grupului turbină hidraulică - generator sincron	26
	2.3 Caracteristica mecanică a unei turbine eoliene și influența ei asupra funcționării grupului turbină eoliană - generator sincron	28
	2.4 Caracteristica mecanică a unui motor cu ardere internă și influența ei asupra funcționării grupului motor cu ardere internă - generator	30
3	PREZENTAREA VARIANTEI ADOPTATE PENTRU CIRCUITUL DE AUTOEXCITAȚIE AL GENERATORULUI SINCRO	30
	3.1 Scheme de autoexcitație propuse și analizate pentru generatorul sincron ce echipează o microhidrocentrală	30
	3.2 Schema bloc a microhidrocentralei echipată cu generator sincron autoexcitat	36
4	PREZENTAREA SCHEMEI BLOC PROPUȘĂ PENTRU O MICRO-HIDROCENTRALĂ ȘI ELEMENTELE COMPONENTE	37
	4.1 Prezentarea elementelor componente ale schemei bloc propuse	37
	4.1.1 Turbina hidraulică cu vană de reglare a debitului de apă	37
	4.1.2 Generatorul sincron autoexcitat	38
	4.1.3 Convertorul frecvență - tensiune	43
	4.1.4 Elementul de prescriere a frecvenței. Elementul comparator, amplificator și regulator	43
	4.1.5 Bolcul de rele	44
	4.1.6 Motorul electric de curent continuu cu două viteze de rotație	44
	4.1.7 Reductorul de turație cu angrenaj melcat	45
	4.2 Prezentarea elementelor componente ale buclei de reglare a tensiunii din schema bloc propusă	45
	4.2.1 Elementul de prescriere a tensiunii	45
	4.2.2 Elementul comparator, amplificator și regulator	46
	4.2.3 Dispozitivul de comandă pe grilă	46
	4.2.4 Elementul de execuție în bucla de reglare a tensiunii	46

5	ALEGEREA ȘI CALCULUL ELEMENTELOR PREZENTATE ÎN SCHEMA BLOC PROPUȘĂ	47
5.1	Alegerea și calculul elementelor componente ale buclei de reglare a frecvenței	47
5.1.1	Alegerea turbinei hidraulice	48
5.1.2	Calculul generatorului sincron	49
5.1.3	Calculul convertorului frecvență - tensiune	50
5.1.4	Calculul elementului de prescriere al frecvenței și al elementului de comparație	52
5.1.5	Dimensionarea blocului de relee	53
5.1.6	Alegerea motorului de curent continuu cu două viteze de rotație având reductor cu angrenaj melcat încorporat	54
5.2	Alegerea și calculul elementelor componente ale buclei de reglare a tensiunii	55
5.2.1	Dimensionarea elementului de prescriere a tensiunii, a elementului comparator, amplificator și regulator	55
5.2.2	Adaptarea dispozitivului de comandă pe grilă	57
5.2.3	Dimensionarea elementului de execuție din bucla de reglare a tensiunii	58
6	FUNȚIILE DE TRANSFER ALE ELEMENTELOR COMPONENTE ȘI ALE BUCLELOR DE REGLARE A FRECVENȚEI ȘI A TENSIUNII	61
6.1	Funcțiile de transfer ale elementelor componente din bucla de reglare a frecvenței	62
6.1.1	Funcția de transfer a elementului de prescriere	62
6.1.2	Funcția de transfer a elementului comparator	63
6.1.3	Funcția de transfer a elementului amplificator	63
6.1.4	Funcția de transfer a elementului de execuție	64
6.1.5	Funcția de transfer a organului de reglare	67
6.1.6	Funcția de transfer a organului reglat	67
6.1.7	Funcția de transfer a elementului de măsurare (a convertorului frecvență - tensiune)	69
6.2	Funcția de transfer a buclei de reglare a turației (frecvenței tensiunii)	69
6.2.1	Funcția de transfer a buclei de reglare a turației când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie	69
6.2.2	Funcția de transfer a buclei de reglare a turației când motorul de c.c. funcționează cu excitație compund	70
6.3	Funcțiile de transfer ale elementelor componente ale buclei de reglare a tensiunii	73
6.3.1	Funcția de transfer a elementului de prescriere	73
6.3.2	Funcția de transfer a elementului de comparare	74
6.3.3	Funcția de transfer a elementului de amplificare	74
6.3.4	Funcția de transfer a elementului de execuție	74
6.3.5	Funcția de transfer a elementului de reglare	74
6.3.6	Funcția de transfer a organului reglat	75
6.3.7	Funcția de transfer a elementului de măsurare	75
6.4	Funcția de transfer a buclei de reglare a tensiunii	75
6.4.1	Funcția de transfer a buclei deschise	75
6.4.2	Funcția de transfer a buclei închise de reglare a tensiunii generatorului sincron	76
6.4.3	Funcția de transfer a buclei închise de reglare a tensiunii generatorului sincron, când se consideră și constanta de timp a excitației	76
7	ANALIZA STABILITĂȚII TEORETICE A CELOR DOUĂ BUCLE DE REGLARE (A FRECVENȚEI ȘI A VALORII TENSIUNII)	77

7.1	Introducere	77
7.2	Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței	77
	7.2.1 Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței, când regulatorul este de tip P și motorul de curent continuu funcționează cu excitație serie (viteza de rotație mare)	77
	7.2.2 Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței, când regulatorul este de tip PI și motorul de curent continuu funcționează cu excitație serie (viteza de rotație mare)	80
	7.2.3 Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței, când regulatorul este de tip P și motorul de curent continuu funcționează cu excitație compund (viteza de rotație mică)	88
	7.2.4 Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței, când regulatorul este de tip PI și motorul de curent continuu funcționează cu excitație compund (viteza de rotație mică)	90
7.3	Analiza stabilității buclei de reglare a tensiunii	93
	7.3.1 Analiza buclei de reglare a tensiunii când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației	93
8	PREZENTAREA MODELULUI EXPERIMENTAL ȘI A REZULTATELOR ÎNCERCĂRILOR ACESTUIA	100
	8.1 Prezentarea modelului experimental al microhidro-centralei	100
	8.2 Prezentarea rezultatelor încercărilor modelului experimental	104
	8.2.1 Comportamentul blocului de alimentare	104
	8.2.2 Comportamentul buclei de reglare a tensiunii	104
	8.2.3 Comportamentul buclei de reglare a frecvenței	114
	8.2.4 Analiza interacțiunilor dintre cele două bucle de reglare, ce determină comportamentul optim al generatorului sincron	116
9	CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE	117
	9.1 Concluzii referitoare la comportarea modelului experimental	118
	9.2 Concluzii referitoare la posibilitatea extrapolării soluției prezentate pentru microhidrocentrale de puteri mai mari	119
	9.3 Contribuții personale	120
	BIBLIOGRAFIE	121
	ANEXE	I-XL

INTRODUCERE

Prezenta lucrare constituie o sinteză a activității de cercetare fundamentală și aplicativă desfășurată de autor în domeniul echipării centralelor electrice de mică putere. Obiectivul principal al lucrării îl constituie adoptarea celei mai simple structuri pentru o microhidrocentrală, care să poată funcționa în regim autonom și automat.

Pornindu-se de la acest obiectiv, s-a adoptat o structură și o schemă de funcționare care să permită funcționarea microhidrocentralei astfel încât valoarea efectivă și frecvența tensiunii la bornele generatorului să fie menținute între anumite limite, prestabilite în concordanță cu cerințele posibililor consumatori.

Teza este structurată pe 9 capitole, și se întinde pe 124 pagini (și 40 pagini cu anexe). Ea conține 157 relații, 121 figuri, 10 tabele, 44 anexe. Bibliografia lucrării cuprinde 104 titluri, din care 12 aparțin autorului.

Autorul aduce calde mulțumiri în primul rând d-lui Acad. prof. dr. ing. Toma Dordea, conducător științific, pentru îndrumarea științifică acordată pe perioada elaborării tezei, pentru îndrumarea continuă a activității sale didactice, pentru sprijinul de specialitate și moral acordat și pentru înțelegerea de care a dat dovadă, și d-lui Prof. dr. ing. Tudor Ambros, pentru ajutorul acordat la finalizarea tezei.

În al doilea rând, autorul mulțumește colectivului de cadre didactice de la Catedra de Mașini, Acționări și Utilizări Electrice a Facultății de Electrotehnică Timi-șoara, care - în urma audierii referatelor prezentate de autor - au venit cu o mulțime de sugestii, de care s-a ținut cont în redactarea tezei și în adoptarea structurii microhidrocentralei.

În al treilea rând, autorul mulțumește următorilor colaboratori: d-lui ing. Dorin Gavril, de la R. A. Apele Române, Exploatarea Reșița, d-lui dipl. univ. Ion Bălu, de la Agenția pentru Protecția Mediului, care - lucrând la Oficiul de Gospodărire a Apelor în anii 1987-1988 - au realizat barajul de la Dognecea (Lacul Mare) astfel încât să se poată monta o microhidrocentrală într-o construcție anexă pe care tot O.G.A. a realizat-o.

În al patrulea rând, autorul mulțumește cadrelor didactice din Universitatea „Eftimie Murgu” și inginerilor din cadrul U.C.M.R. S.A. și C.S.R. S.A., care l-au sprijinit prin discuții constructive în timpul elaborării tezei, cu aparatură adecvată înregistrării mărimilor care au fost urmărite, subliniind sprijinul colegial și oportun acordat de dl. Conf. dr. ing. Ioan Ruja, dl. ing. Ioan Ciurel, dl. ing. Teodor Gavrîș, dl. ing. Gheorghe Liuba, și alții, cărora autorul le cere scuzele de rigoare pentru a nu-i fi amintit aici.

În al cincilea, dar nu în ultimul rând, autorul mulțumește celor mai apropiați colaboratori: d-lui ing. Florin Berinde, d-lui ing. Sorin Ștefan și d-lui subing. Florin Pomoja - cu sprijinul căruia teza are aspectul grafic ce se poate constata în continuare.

Reșița, la 21 mai 1996

AUTORUL

LISTĂ DE SIMBOLURI

Simbolul	Semnificația	U.M.
A	amplificator	-
AM	amplificator magnetic	-
C	condensator	-
CfU	convertor frecvență - tensiune	-
CI	circuit integrat	-
d	releu	-
d, q	axă longitudinală, transversală a mașinii sincrone	-
DE	disipator de energie	-
E _s , E _d	excitație serie, excitație derivație	-
E(s)	imaginea funcției de ieșire	-
f	frecvență	-
GAS	generator asincron	-
GS	generator sincron	-
GSA	generator sincron auxiliar	-
GSP	generator sincron principal	-
H	cădere de apă	m
I(s)	imaginea funcției de intrare	-
I, i	curent de sarcină	A
I _E , i _o	curent de excitație	A
INV	invertor	-
i _T	raport de transmisie	-
J	moment de inerție al pieselor în mișcare de rotație	N·m ²
k _E	constantă a mașinii sincrone	-
k _m , k _e	constante ale mașinii de curent continuu	-
L _{E1h}	inductivitate principală a înfășurării de excitație	H
L _{11hd}	inductivitate principală a unei faze după axa longitudinală	H
M	motor electric	-
Mcc	motor electric de curent continuu	-
M ₁	cuplu motor	N·m
M ₂	cuplu dezvoltat de generatorul sincron	N·m
n	viteză de rotație	rot/min.
p	număr de perechi de poli	-
P	putere electrică sau mecanică	W
Q	debit de apă	m ³ ·s ⁻¹
R	rezistor	-
RD	redresor	-
RN	redresor necomandat	-
RC	redresor comandat	-
RM	redresor cu comportare mixtă	-
RAT	regulator automat de tensiune	-
TC	transformator de compundare	-
T, T _E , T _m	constante de timp: electrice, electromecanică	s
U	tensiune la bornele mașinii	V
U _o	tensiune electromotoare indusă	V
U _{o0}	tensiune continuă la bornele redresorului necomandat	V
U _{o1}	tensiune continuă la bornele redresorului comandat	V

U_p	tensiune de prescriere	V
U_c	tensiune de comandă	V
U_{eM}	tensiune electromotoare polară	V
v	viteză	$m \cdot s^{-1}$
X_d, X_q	reactanță sincronă longitudinală, transversală	Ω
X_{md}, X_{mq}	reactanță de reacție longitudinală, transversală	Ω
$Y(s)$	funcție de transfer (s - variabilă complexă)	-
α	unghi de comandă al tiristoarelor	°
β	unghi de deschidere al aparatului director	°
Φ	flux rezultat în mașină	Wb
Φ_s, Φ_d	flux al excitației serie, paralel	Wb
φ	unghi de defazaj între tensiune și curent	°
η	randament	-
Θ	solenajie de excitație	A
θ	unghi intern al generatorului sincron	°

000
0

1.1. Introducere

Producerea energiei electrice în cantități care să acopere, în fiecare moment, cerințele, a fost, este și va fi o problemă a societății, în general, și a fiecărui grup - constituit pe anumite criterii, în particular. Dacă la nivelul fiecărei țări producerea energiei electrice se face în centrale termo sau hidroelectrice, de puteri cât mai mari - pentru a obține parametri cât mai buni - centrale amplasate în imediata apropiere a surselor primare de energie, la nivelul grupurilor umane amplasate în spații izolate, dispunând de surse de energie primară limitate, producerea energiei electrice se face în grupuri de mică putere, care să utilizeze aceste surse locale. În acest ultim caz, primordială nu este obținerea unor parametri cât mai mari ai transformării energetice, ci obținerea unor parametri ai energiei electrice care să se încadreze în prescripțiile actelor normative în vigoare, asigurând astfel funcționarea în bune condiții a consumatorilor.

Obținerea energiei electrice necesară consumatorilor izolați se poate face prin metode clasice, cu ajutorul unor microcentrale electrice care - în funcție de purtătorul de energie primară - pot fi: microcentrale hidroelectrice, microcentrale eolianoelectrice, microcentrale termoelectrice, ș.a.

Obținerea energiei electrice în astfel de locuri se poate face și prin metode neconvenționale (conversia directă a energiei), dar cu prețuri mari.

În acest capitol voi prezenta câteva posibilități de obținere a energiei electrice în centrale autonome, subliniind avantajele și dezavantajele fiecărei metode.

1.2. Prezentarea critică a posibilităților de producere a energiei electrice în microcentrale autonome

Ca generator electric într-o microcentrală, teoretic, se poate folosi orice tip de generator: de curent continuu, de curent alternativ asincron și de curent alternativ sincron.

În literatura de specialitate [82] se recomandă a se folosi generatoare de curent continuu pentru puteri de până la 10 kW, de curent continuu sau alternativ pentru puteri între 10 și 100 kW, și numai de curent alternativ pentru puteri mai mari de 100 kW.

1.2.1. Generatorul de curent continuu, posibil convertor de energie mecanică în energie electrică în microcentrale

Utilizarea unui generator de curent continuu restrânge numărul tipurilor de receptoare ce ar putea beneficia de energia produsă, sau necesită o instalație de conversie a tensiunii continue, ceea ce constituie deja un dezavantaj major.

Construcția acestui tip de generator este mai complicată (deci și mai scumpă și mai greu de întreținut).

Cunoaștem că tensiunea indusă în regim staționar este dată de relația:

$$U_e = k \cdot n \cdot \Phi, \quad (1.1)$$

unde: k - este o constantă a mașinii, n - este viteza de rotație a armăturii mobile; Φ - este fluxul rezultat din mașină.

Dacă viteza de rotație a mașinii primare se modifică în limite largi, pentru a păstra constantă tensiunea la bornele generatorului, fluxul Φ ar trebui să se modifice ca în figura 1.1, curba 1.

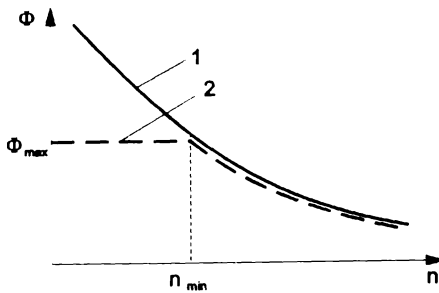


Fig. 1. 1 Dependenta fluxului Φ de turație, la $U=ct.$

de 400 kW, cuplat direct cu turbina. Se subliniază dependența tensiunii și curentului de viteza de rotație a turbinei. Ca sarcină s-au folosit rezistoare, propunându-se utilizarea instalației pentru încărcarea bateriilor.

Din considerentele prezentate, utilizarea generatorului de curent continuu în microcentrale este limitată.

1.2.2. Generatorul asincron, posibil convertor de energie mecanică în energie electrică, utilizat în microcentrale

Generatorul de curent alternativ de tip asincron este des utilizat, mai ales dacă microcentrala poate fi conectată cu o rețea puternică, de unde să își asigure energia reactivă necesară. Generatorul asincron este robust, ieftin, ușor de întreținut.

Generatorul asincron are însă două mari dezavantaje [27]:

- dependența tensiunii la bornele sale de sarcină este puternic influențată de caracterul sarcinii (figura 1.2);
- necesitatea asigurării energiei reactive.

Aceste două dezavantaje conduc la concluzia că utilizarea generatorului asincron într-o centrală electrică autonomă este foarte costisitoare, având în vedere și

costul condensatoarelor, bobinelor și instalației de reglare a tensiunii. Această concluzie se desprinde și din cele ce vor fi prezentate în continuare.

Există și microcentrale autonome echipate cu generatoare asincrone [12], [13]. Astfel, în lucrarea [13] se prezintă schema principală a unui sistem experimental care utilizează un generator asincron și disipatori de energie DE_1 , DE_2 , DE_3 , alimentați prin intermediul amplificatoarelor magnetice AM_1 , AM_2 , AM_3 (figura 1.3).

Schema propusă urmărește să asigure o putere constantă pentru generator,

caz în care nu mai este necesară reglarea vitezei de rotație a turbinei hidraulice. Amplificatoarele magnetice introduc însă distorsiuni ale tensiunii rețelei, dar care se încadrează în prevederile normelor. Puterea disipatorilor este însă de 1,2 ori mai mare decât puterea maximă a consumatorului [13]. Costul ridicat al disipatorilor și al amplificatoarelor magnetice conduce la concluzia că utilizarea unei astfel de soluții duce la un cost global mai mare decât în varianta în care s-ar utiliza un generator sincron.

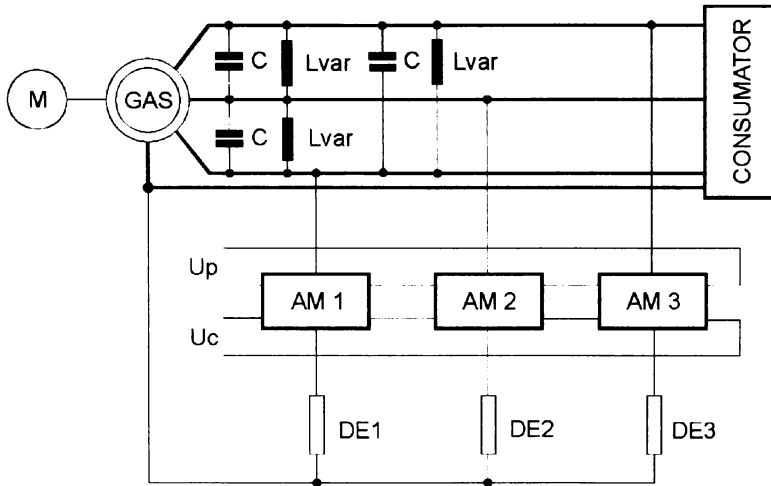


Fig. 1. 3 Schema principală a unui sistem experimental cu generator asincron și cu disipatori de energie alimentați prin intermediul amplificatoarelor magnetice.

În lucrarea [12] se prezintă schema principală a sistemului automat de conversie a energiei cu generator asincron în cascadă suprasincronă (figura 1.4).

Generatorul asincron din sistemul propus este destinat să funcționeze în paralel cu rețeaua, deci nu se pune problema asigurării energiei reactive. Chiar și în această situație, pe lângă generatorul asincron mai sunt necesare trei aparate de putere (redresorul RD, invertorul INV și transformatorul m - vezi figura 1.4).

Evident că acestea necesită aparatură de comandă, reglare, etc.

Dacă ar trebui să lucreze în regim autonom, „puterea reactivă a bateriei de condensatoare necesară compensării a rezultat, la $P=(P_N)_{motor}$, de circa $P_r=3 P$ ” [12]. Evident, aceasta în condițiile menținerii celor trei elemente de putere (RD, INV, m) mai sus amintite.

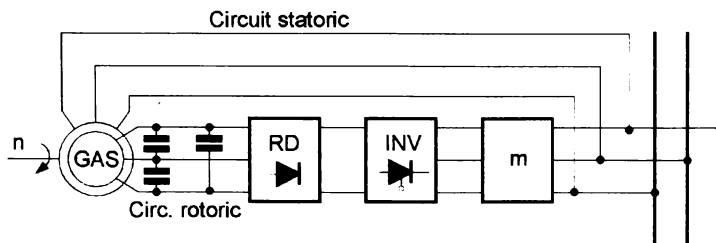


Fig. 1. 4 Schema principală a sistemului de conversie a energiei cu generator asincron în cascadă suprasincronă.

Consider că și în acest caz costul întregii părți electrice a microcentralei ar depăși costul părții electrice a unei microcentrale cu generator sincron.

Preocupări în domeniul obținerii energiei electrice utilizând generatorul asincron au fost și sunt pe toată planeta, dar realizări notabile în acest sens sunt cunoscute doar în ceea ce privește utilizarea generatorului asincron cuplat cu o rețea putemică.

1.2.3. Generatorul sincron, posibil convertor de energie mecanică în energie electrică, în microcentrale

Generatorul de curent alternativ de tip sincron este cel mai des folosit, o garanție a obținerii unor rezultate bune fiind chiar faptul că peste 98% din energia electrică produsă în lume este obținută în centrale electrice echipate cu generatoare sincrone.

Generatorul sincron îmbină avantajele mașinii asincrone (robustețe) cu cele ale mașinii de curent continuu (excitație).

Tensiunea indusă în înfășurarea indusului generatorului sincron are expresia:

$$U_e = 4,44 \cdot f \cdot k \cdot \Phi, \quad (1.2)$$

unde: f este frecvența tensiunii induse; k este o constantă a mașinii, dată de tipul înfășurării ei; Φ este fluxul rezultat în mașină.

Frecvența este dependentă însă de viteza de rotație n a mașinii:

$$f = p \cdot n, \quad (1.3)$$

unde: p este numărul perechilor de poli ai inductorului, deci o constantă pentru o mașină dată.

Rezultă că valoarea tensiunii induse la generatorul sincron este:

$$U_e = k_1 \cdot n \cdot \Phi. \quad (1.4)$$

Relația (1.4) este identică cu relația (1.1), ce indică tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea indusului la mașina de curent continuu, diferită fiind doar valoarea constantelor (k , k_1).

De aici rezultă că și generatorul sincron are aceleași dezavantaje ca și cel de curent continuu, în ceea ce privește obținerea unei tensiuni constante pentru plaja de viteze de rotație (vezi figura 1.1).

Însă inexistența organului colector cu lamele, prezent la generatorul de curent continuu, face din generatorul sincron o soluție preferabilă.

Datorită avantajelor tehnico-economice oferite de generatorul sincron, se va analiza în continuare doar posibilitatea echipării unei microcentrale autonome cu acest tip de generator.

1.3. Tipuri de excitație a generatoarelor sincrone

Se cunoaște că în funcție de autonomia excitației față de exterior se disting sisteme de excitație autonome și neautonome.

Având în vedere că lucrarea de față analizează posibilitățile obținerii energiei electrice în microcentrale autonome, sunt prezentate în continuare doar tipuri de excitație autonomă.

Sistemele autonome de excitație pot fi realizate cu mașini electrice sau cu dispozitive semiconductoare (statice):

a) cea mai simplă schemă de excitație este realizată cu ajutorul excitatoarei autoexcitată montată pe axul generatorului (figura 1.5).

Această schemă permite reglarea tensiunii generatorului sincron prin reglarea poziției reostatului de excitație al excitatoarei. Dezavantajul schemei este acela că necesită o mașină în plus (excitatoarea), iar constanta de timp a sistemului de excitație este mare.

O schemă ce asigură o stabilitate mai mare este prezentată în figura 1.6; cele două mașini auxiliare sunt montate pe axul generato-

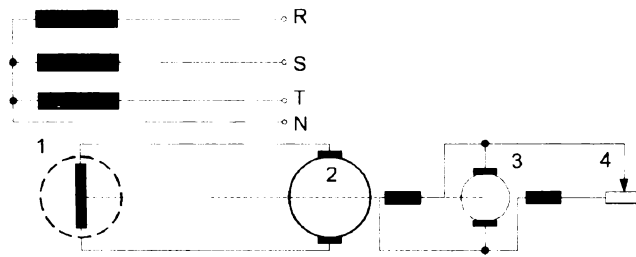


Fig. 1. 5 Schema de excitație autonomă cu excitatoare autoexcitată: 1 - generator sincron; 2 - excitatoare; 3 - reostat de excitație.

rului sincron. Constanta de timp a sistemului de excitație este și mai mare în acest caz, fiind folosite în același timp două mașini auxiliare, ceea ce - pentru o microcentrală autonomă - constituie un dezavantaj major.

O schemă și mai complexă este prezentată în figura 1.7. În acest caz, excitatoarea princi-

Fig. 1. 6 Schema de excitație autonomă cu excitatoare principală și auxiliară: 1 - generator sincron; 2 - excitatoare principală; 3 - excitatoare secundară; 4 - reostat de excitație.

pală este excitată prin intermediul unui regulator automat de tensiune, de către un generator sincron auxiliar cu magneți permanenți. Ambele mașini sunt cuplate pe axul generatorului sincron principal.

Această schemă asigură o stabilitate mai mare și este destinată excitației unui generator sincron de mare putere [84]. Deci, pentru o microcentrală autonomă, nu poate fi luată în considerare această schemă.

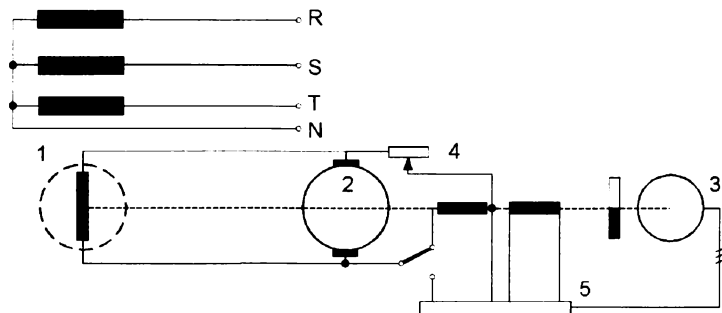


Fig. 1. 7 Schema de excitație autonomă cu excitatoarea excitată de un generator sincron auxiliar și cu regulator automat de tensiune: 1 - generator sincron; 2 - excitatoare principală; 3 - generator sincron auxiliar cu magneți permanenți; 4 - reostat de excitație; 5 - regulator automat de tensiune.

Pe măsură ce puterea generatorului sincron - a cărei excitație se asigură - crește, complexitatea schemei de excitație crește și ea, avându-se în vedere asigurarea unei bune funcționări pentru orice regim de lucru al generatorului sincron. Astfel, în schema de excitație se pot folosi și mașini speciale [84], ce asigură factori de amplificare mari și deci contribuie la realizarea unor timpi de răspuns mai mici.

Schemele prezentate au un dezavantaj major, și anume acela de a fi folosite una sau mai multe mașini auxiliare, care la viteze de rotație mici sunt voluminoase și conduc la un cost mare al sistemului de excitație.

b) sistemele de excitație statice sunt practic fără inerție și elimină parțial sau total mașinile rotative auxiliare.

În figura 1.8 este prezentată schema de excitație statică autonomă cu alimentare

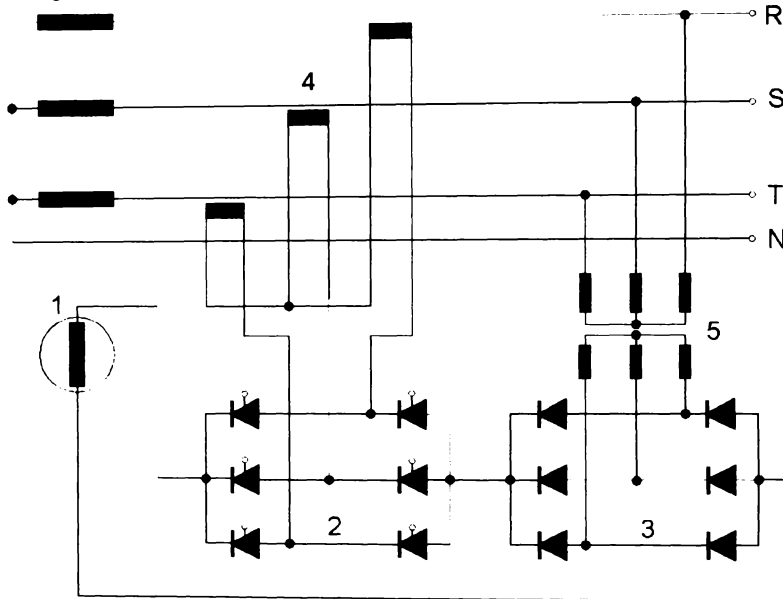


Fig. 1.8 Schema de excitație statică, autonomă, cu alimentare de la bornele generatorului sincron: 1 - generator sincron; 2 - redresor în punte comandat; 3 - redresor în punte necomandat; 4 - transformator de curent; 5 - transformator de tensiune.

de la bornele generatorului sincron.

Această schemă are avantajele că nu există mașini electrice de rotație auxiliare, asigură componenta de tensiune, respectiv de curent, a curentului de excitație corespunzător gradului de încărcare a generatorului sincron.

Schema asigură parametrii de excitație foarte ridicați. Are însă dezavantajul de a fi influențată de avariile care apar la bornele generatorului sincron. În plus, dacă și blocurile de comandă ale tiristoarelor din redresorul 2 ar fi alimentate de la generatorul sincron 1, schema nu ar asigura pornirea și autoexcitarea generatorului, deci putem considera această schemă cvasiautonomă.

În figurile 1.9 și 1.10 se prezintă scheme de excitație autonomă ce elimină acest ultim dezavantaj.

În ambele cazuri, generatoarele sincrone auxiliare sunt montate pe axul generatorului sincron principal. Cele două scheme asigură o mai mare stabilitate a

funcționării generatorului sincron principal, dar au același dezavantaj dat de prezența mașinilor rotative auxiliare, ce complică și scumpesc realizarea practică.

În toate schemele prezentate, în care apar mașini auxiliare, acestea sunt realizate pasiv, adică au la trecerea spre rotor contacte alunecătoare.

Acestea aduc cu ele dezavantajele cunoscută în vederea eliminării contactelor alunecătoare sau înregistrat și aplicat o mare varietate de scheme se realizează acest lucru. Cea mai simplă schemă de acest tip este redată în figura 1-9.

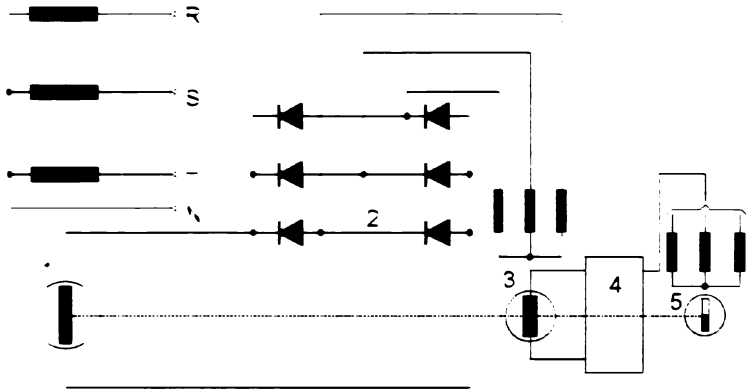


Fig. 1-9 Schema de excitatie autonomă cu generatoare sincrone auxiliare și punte redresoare: 1 - generator sincron principal; 2 - redresor în punte; 3 - generator sincron auxiliar; 4 - redresor trifazat; 5 - generator sincron cu magneti permanenți.

Genera-

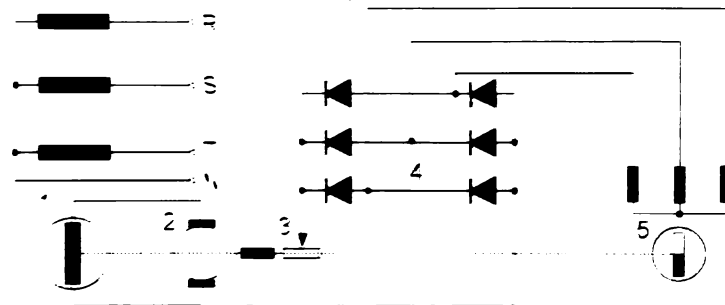


Fig. 1-10 Schema de excitatie autonomă cu generator sincron și de curent continuu auxiliar și punte redresoare: 1 - generator sincron principal; 2 - generator de curent continuu auxiliar; 3 - reostat de excitatie; 4 - punte redresoare necomandată; 5 - generator sincron cu magneti permanenți.

torului sincron auxiliar realizat „în construcție inversă” are excitația în stator, iar în rotor este montată puntea redresoare - drept pentru care schema mai este cunoscută sub numele de schema de excitatie „în diode rotitoare”.

Tensiunea continuă obținută de la puntea redresoare este aplicată înfășurării generatorului sin-

cron principal plasată pe rotor. În acest fel sunt eliminate atât contactele mobile la generatorul sincron auxiliar cât și la generatorul sincron principal. Excitația generatorului auxiliar poate fi alimentată printr-un bloc de reglare automată a tensiunii: chiar de la bornele generatorului principal, caz în care schema asigură o divasi-autonomie. Schema se aplică acolo unde nu este necesară o forțare puternică a excitației. Că astfel de schemă este utilizată la C.H.E. Grebla din județul Caraș-Severin unde există două generatoare de 5,5 MW antrenate cu turbine Francis cu ax orizontal [75].

Elaborarea unei astfel de scheme a fost posibilă ca urmare a aportului adus de electronică în realizarea mașinilor electrice. Fără existența elementelor semicon-

ductoare această schemă nu s-ar fi putut realiza.

Generatoarele fără contacte mobile aduc o serie de avantaje sub raportul comportării dinamice: o eroare tranzitorie mai redusă, timp de răspuns mai bun, timp de reglare mai scurt [92].

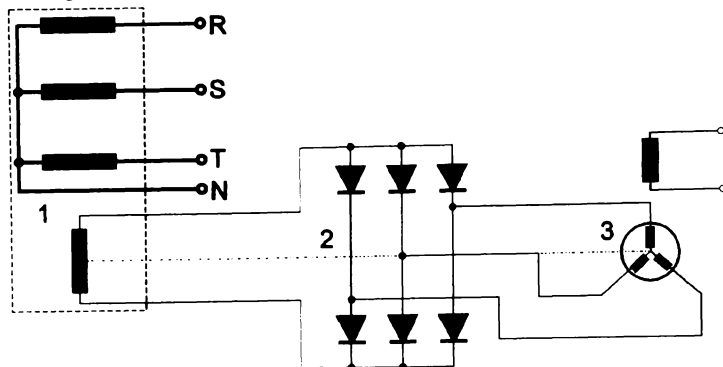


Fig. 1. 11 Schema de excitație fără contacte alunecătoare: 1 - generator sincron principal; 2 - redresor în punte necomandat; 3 - generator sincron auxiliar.

În figura 1.12 este prezentată schema concretă a unui generator sincron fără perii, propusă într-un brevet japonez [92].

Funcționarea ei presupune existența unui câmp remanent în cele două generatoare sincrone.

Tensiunea de excitație a generatorului principal este asigurată de generatorul auxiliar prin

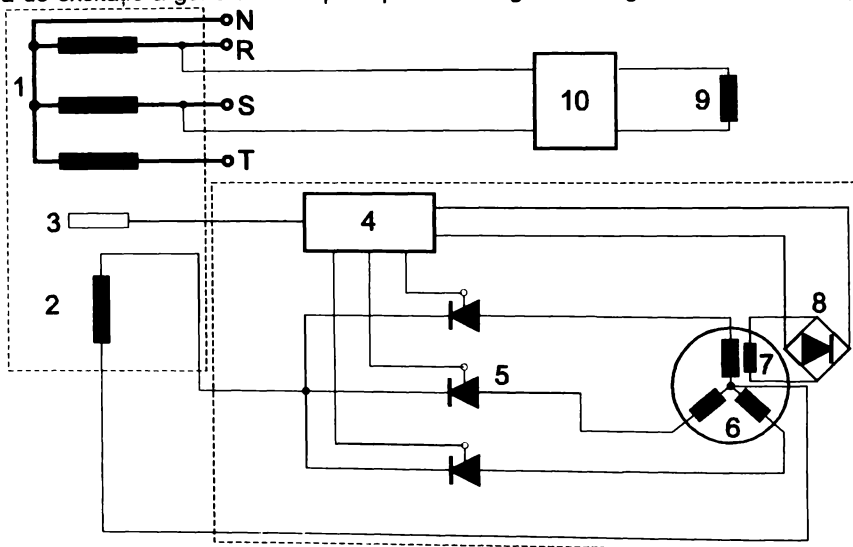


Fig. 1. 12 Schema de excitație fără contacte alunecătoare, cu reglare a tensiunii și menținere a câmpului de excitație între limitele dorite: 1, 2 - înfășurarea statorică, respectiv de excitație, a generatorului sincron principal; 3 - transformator de câmp magnetic; 4 - bloc electronic de comandă; 5 - punte redresoare comandată rotitoare; 6, 9 - înfășurări rotorice trifazate, respectiv de excitație, a generatorului sincron auxiliar; 7 - înfășurare monofazată rotitoare; 8 - punte redresoare monofazată rotitoare; 10 - regulator electronic de tensiune.

intermediul redresorului trifazat comandat 5. Acesta primește impulsuri de comandă de la blocul electronic 4, alimentat și comandat de înfășurarea 7 și redresorul 8, cât timp câmpul magnetic din generatorul principal - sesizat de traductorul 3 - este menținut în limitele impuse. Înfășurarea de excitație 9 a generatorului sincron auxiliar este alimentată de la regulatorul electronic de tensiune 10. Schema permite menținerea constantă a tensiunii generatorului sincron chiar la modificări puternice ale sarcinii [92].

Avantajele aduse de această schemă sunt deci următoarele: lipsa contactelor mobile, menținerea câmpului magnetic al generatorului principal între anumite limite dorite, menținerea constantă a tensiunii la bornele generatorului sincron principal la variații puternice ale sarcinii.

Ca dezavantaj al acestei scheme ar putea fi amintit acela că la sarcini puternic inductive (pornirea unui motor asincron de putere apropiată de cea a generatorului sincron principal), când reacția indusului este puternic demagnetizantă, înfășurarea de excitație 2 trebuie să asigure un anumit câmp. Aceasta presupune ca generatorul sincron auxiliar să fie supradimensionat, pentru a putea asigura puterea cerută de înfășurarea 2. Ori, în această situație tensiunea pe înfășurarea 9 are tendințe de scădere a puterii furnizate de către generatorul auxiliar.

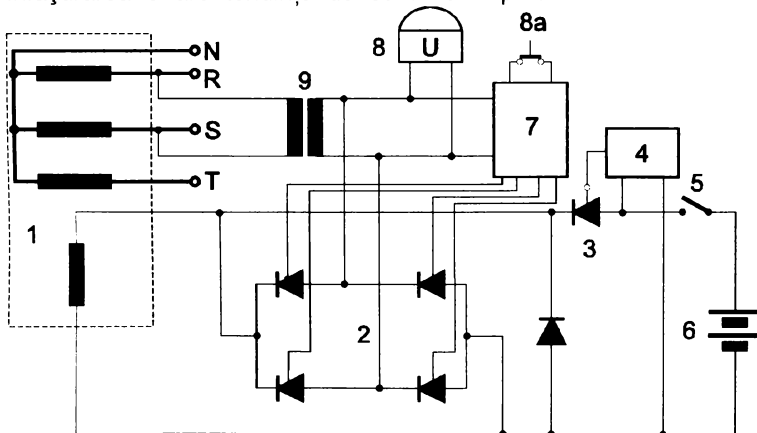


Fig. 1. 13 Schemă de excitație fără mașini auxiliare: 1 - generator sincron; 2 - redresor comandat; 3 - tiristor pentru excitație; 4 - generator de impulsuri; 5 - întreruptor de pornire; 6 - baterie de acumuloare; 7 - regulator automat de tensiune; 8 - releu de minimă tensiune; 9 - transformator de tensiune.

În figura 1.13 este prezentată o schemă de excitație ce nu mai necesită generator auxiliar. Pentru pornirea grupului, se închide manual întreruptorul 5; cu aceasta, generatorul de impulsuri 4 este alimentat de la bateria de acumuloare 6 și comandă

tiristorul 3.

În acest moment, excitația generatorului sincron 1 este alimentată de la bateria de acumuloare 6. La bornele generatorului sincron apare tensiunea indusă; când aceasta atinge un prag minim impus, releu de minimă tensiune 8 închide contactul normal deschis 8a și conectează regulatorul automat de tensiune 7. Acesta comandă tiristoarele din puntea redresoare 2. Cu aceasta, înfășurarea de excitație a generatorului sincron este alimentată chiar de la bornele sale, prin intermediul elementelor de circuit 9, 7, 2. Acum, întreruptorul 5 trebuie deschis. Deschiderea se poate face manual (ca în figură), dar și automat - cu o anumită întârziere - după închiderea contactului 8a.

Schema prezentată, tot într-un brevet japonez [92], este destul de simplă și poate fi utilizată într-o microcentrală autonomă. Ea asigură o tensiune constantă dacă variațiile de sarcină nu sunt prea puternice.

Dintre dezavantaje, pot fi amintite următoarele: prezența unei baterii de acumuloare; pornirea manuală; imposibilitatea forțării excitației la variații mari ale sarcinii sau la conectarea unor sarcini inductive. Prezența bateriei de acumuloare aduce însă avantajul funcționării generatorului sincron și la anumite avarii pe rețea, prin proiectarea instalației de automatizare astfel încât - la scăderea tensiunii sub o anumită valoare (când contactul 8a se deschide) - să reentre în funcțiune elementele 3, 4, 5, și 6 din figura 1.13.

De avantajele prezentate de generatorul sincron în comparație cu cel de curent continuu s-a ținut seama și la realizarea echipamentului electric al automobilelor. Astfel, „dinamul” primelor decenii de viață ale automobilului a fost înlocuit cu „alternatorul”, care este de fapt un generator sincron trifazat autoexcitat, cu redresor încorporat, realizat pentru tensiuni nominale de 12 V sau 24 V.

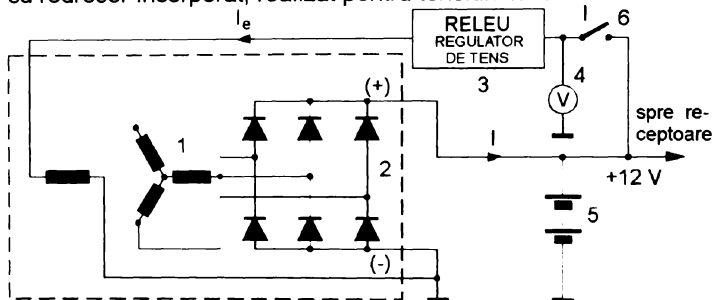


Fig. 1. 14 Schema bloc a instalației de alimentare cu energie electrică a unui automobil: 1 - generator sincron (alternator); 2 - redresor trifazat în punte; 3 - releu regulator de tensiune; 4 - voltmetru de bord; 5 - baterie de acumuloare; 6 - întrerupător - cheie de contact.

Altematoarele sunt mai avantajoase decât dinamurile deoarece, având o construcție și o întreținere mai simple, sunt mai robuste și mai fiabile. La aceleași dimensiuni, altematoarele au o putere de 3-5 ori mai mare decât dinamurile [31]. Ele pot funcționa la vi-

teze de rotație mari și furnizează un curent considerabil chiar la viteza de rotație corespunzătoare mersului în gol al automobilului.

Asigurarea unei tensiuni constante se face cu ajutorul unui releu regulator de tensiune, montat în circuitul excitației generatorului. La pornire, excitația generatorului sincron este asigurată de bateria de acumuloare.

În lucrarea [94] sunt prezentate încercările la care sunt supuse altematoarele de 12 V și 24 V, în scopul determinării modului de funcționare al acestora.

Schema bloc a altematorului pentru alimentarea cu energie electrică a receptorilor de pe un automobil este redată în figura 1.14 [31].

Prezența bateriei de acumuloare în instalație asigură - pe lângă funcția legată de pornire - și alte funcții, cum ar fi:

- furnizarea energiei necesare receptorilor, când puterea acestora depășește puterea electrică maximă a generatorului;
- preluarea de la generator a energiei produse, cât timp tensiunea sa la borne este sub valoarea de 14 V;
- menținerea tensiunii între limitele impuse, indiferent de sarcina și viteza de rotație a generatorului.

Reglarea tensiunii la bornele altematorului are în vedere prezența bateriei de acumuloare tampon.

Alura caracteristicilor externe $U=f(I)$ ale alternatorului, în condițiile $n=ct.$ și $i_{ex}=ct.$, este căzătoare, după cum se observă în figura 1.15. Se constată, de asemenea, că pentru menținerea constantă a tensiunii generatorului sincron, în condițiile $n=variabil$ și $i_{ex}=ct.$, este necesară modificarea curentului de sarcină (punctele A, B, C). Acest lucru este posibil (între anumite limite) tocmai datorită prezenței bateriei de acumulatori. Caracteristica $I=f(n)$ - pentru $U=ct.$ și $i_{ex}=ct.$ - din figura 1.16, indică faptul că există o viteză de rotație minimă, sub care generatorul nu debitează curent de sarcină.

Această viteză de rotație minimă este determinată tocmai de faptul că, pentru a asigura o tensiune constantă, fluxul de excitație ar trebui să crească peste Φ_{max} (vezi figura 1.1), lucru imposibil din cauza apariției saturației.

Schema prezentată în figura 1.14 nu pare a avea alt dezavantaj decât acela dat de prezența bateriei de acumulatori. Pentru echiparea unei microcentrale cu

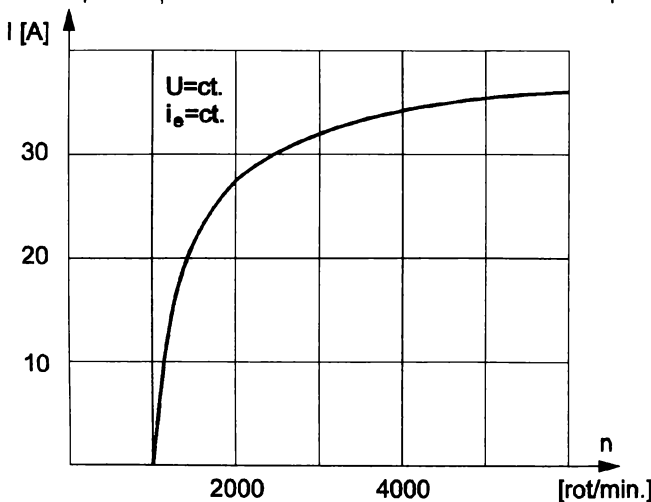


Fig. 1.16 Caracteristica $I=f(n)$, pentru $U=ct.$ și $i_{ex}=ct.$

- proiectarea și realizarea unui regulator de tensiune adecvat.

Într-o altă variantă, ce ar elimina transformatorul coborâtor de tensiune, numărul acumulatorilor necesare pentru constituirea bateriei de acumulatori ar fi mare (circa 37).

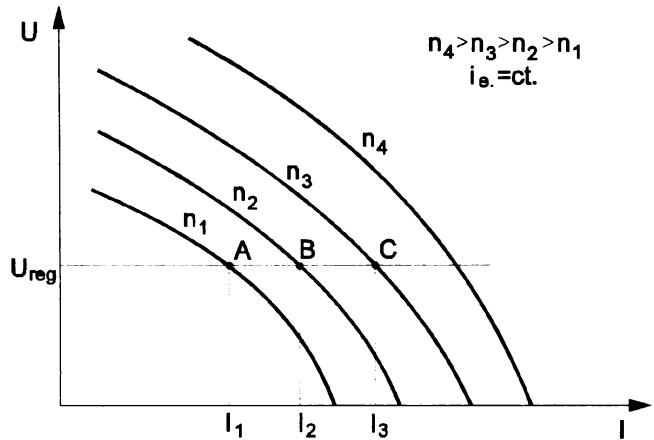


Fig. 1.15 Caracteristicile externe $U=f(I)$, pentru diferite turații constante.

un generator sincron utilizând această schemă, ar fi necesare unele modificări, care ar aduce cu sine și dezavantaje.

Aceste modificări ar fi:

- introducerea unui transformator coborâtor de tensiune înainte de redresorul trifazat în punte;
- dimensionarea excitației la o tensiune scăzută (12 V), ceea ce ar presupune un curent de excitație mare, deci putere de excitație mare;

Ambele variante conduc însă la creșterea costului microhidrocentralei, nerealizându-se nici cerința impusă de consumatorii casnici, referitoare la variațiile de frecvență ale tensiunii de alimentare.

Utilizarea generatoarelor sincrone ca surse independente de energie este abordată și în lucrările [20] și [47]. Astfel, în lucrarea [20] este prezentată seria de generatoare sincrone fără inele și perii tip IMEB, cu puteri între 10 kVA și 220 kVA. Acestea sunt executate după schema de principiu prezentată în figura 1.17.

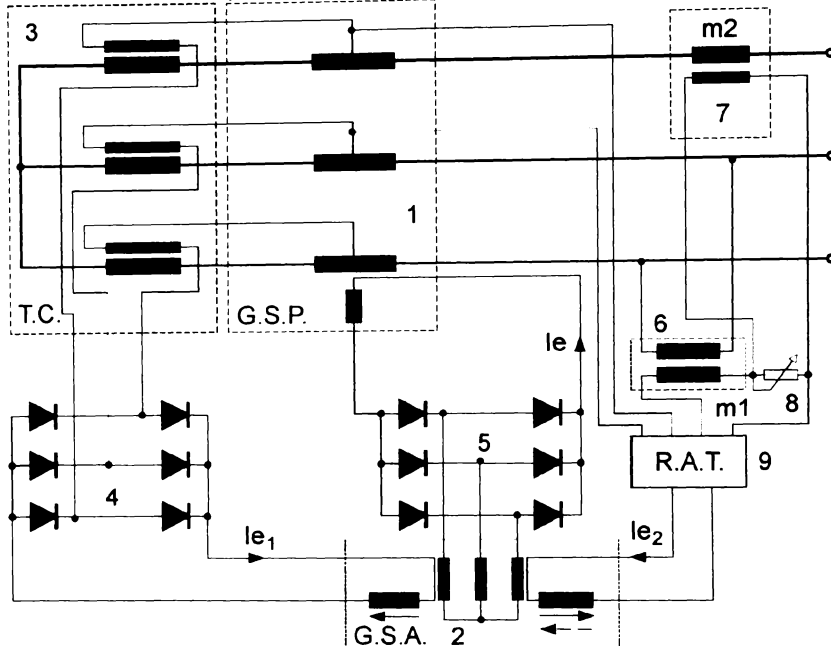


Fig. 1.17 Schema de excitație fără contacte alunecătoare pentru generatoarele din seria IMEB: 1 - generator sincron principal (G.S.P.); 2 - generator sincron auxiliar (G.S.A.); 3 - transformator de compoundare (T.C.); 4 - punte redresoare trifazată secundară; 5 - punte redresoare trifazată principală; 6 - transformator de curent; 7 - transformator de tensiune; 8 - rezistență de statim; 9 - regulator de tensiune (R.A.T.).

Alimentarea înfășurării de excitație a excitatoarei 2 din figura 1.17 se face de la sistemul trifazat de tensiuni produse de generatorul sincron principal 1, prin intermediul unui redresor sau a unui transformator cu redresor.

Tensiunea remanentă a fiecăruia dintre cele două generatoare sincrone asigură alimentarea înfășurării de excitație a celuilalt generator sincron. Procesul de autoexcitație continuă până la asigurarea unei anumite tensiuni la bornele G.S.P. În lipsa R.A.T., a transformatoarelor m_1 și m_2 și a înfășurării de excitație II a G.S.A., valoarea tensiunii produse de către G.S.P. ar depinde de sarcină, prezentând variații mari. Prezența elementelor amintite - în circuitul înfășurării de excitație II al G.S.A. - asigură demagnetizarea sau magnetizarea suplimentară a G.S.A., în funcție de valoarea măsurată a tensiunii la bornele G.S.P.

Caracteristicile de reglaj ale generatorului sincron fără contacte alunecătoare compundat sunt reprezentate în figura 1.18. Regulatorul de tensiune utilizat are schema de principiu prezentată în figura 1.19 [20].

Această schemă asigură variațiile impuse pentru tensiunea la borne numai pentru sarcini active și inductiv statice, dar se comportă nesatisfăcător pentru situația când se pornesc motoare cu puterea de 40-50% din puterea generatorului. În acest caz, datorită constantei de timp relativ mare a ansamblului, „groapa de tensiune” a devenit supărătoare, ducând la declanșarea releelor și contactoarelor din circuitul de sarcină [20].

Autorii lucrării amintite au utilizat în această situație o soluție originală, și anume hipercompundarea mașinii (figura 1.20).

Hipercompundarea presupune reglarea curentului de compundare prin scurtcircuitarea bomelor înfășurării de compundaj periodic, cu ajutorul unui tranzistor de putere (T_{II} din figura 1.20), tranzistor comandat în contra-timp cu tranzistorul principal (T_I din aceeași figură). Când tranzistorul T_I conduce, este aplicată tensiunea maximă înfășurării de excitație principală E_I , tranzistorul T_{II} este blocat și tot curentul debitat de către transformatorul de curent este injectat în înfășurarea de excitație II . Cu această soluție, s-a reușit păstrarea constantă a tensiunii generatorului sincron principal, atât în regim dinamic, cât și în regim static. Soluțiile prezentate în lucrarea [20] răspund unor condiții impuse prin tema de proiectare.

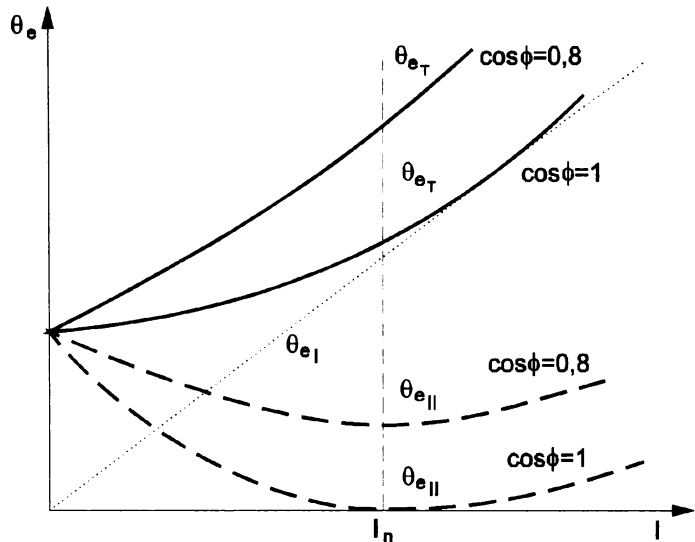


Fig. 1. 18 Caracteristicile de reglaj ale generatorului sincron fără contacte alunecătoare compundat: θ_{eT} - solenația totală; θ_{eI} - solenația de excitație asigurată de transformatorul de compundare; θ_{eII} - solenația de excitație asigurată de către regulatorul de tensiune.

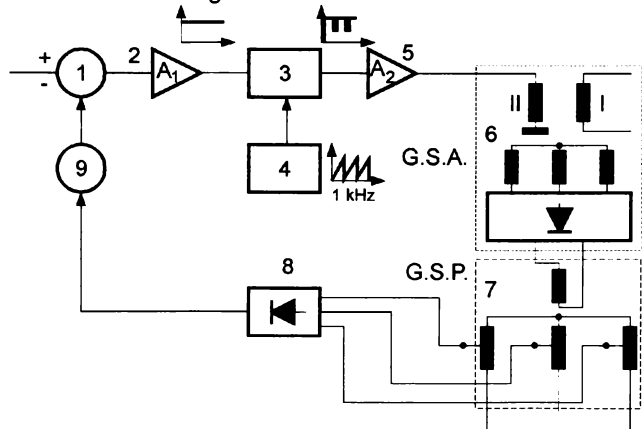


Fig. 1. 19 Schema de principiu a regulatorului de tensiune: 1 - comparator; 2 - amplificator diferențial; 3 - comparator; 4 - generator de semnal în dinți de ferestru; 5 - amplificator; 6 - generator sincron auxiliar (excitatrice); 7 - generator sincron principal; 8 - redresor; 9 - filtru de tip R.C.

atât în regim dinamic, cât și în regim static. Soluțiile prezentate în lucrarea [20] răspund unor condiții impuse prin tema de proiectare.

La prima vedere, seria de generatoare IMEB nu prezintă dezavantaje. La o analiză mai atentă rezultă însă următoarele dezavantaje:

- nu se amintește de controlul și reglajul frecvenței;
- există o mașină auxiliară (G.S.A.), care conduce atât la creșterea costului ansamblului, cât și la creșterea timpului de răspuns. Neliniaritatea caracteristicilor celor două mașini și histerezisul miezului magnetic amplifică diferența între curenții de excitație necesari obținerii aceleiași tensiuni la borne, pentru cele două situații: creșterea și descreșterea ten-

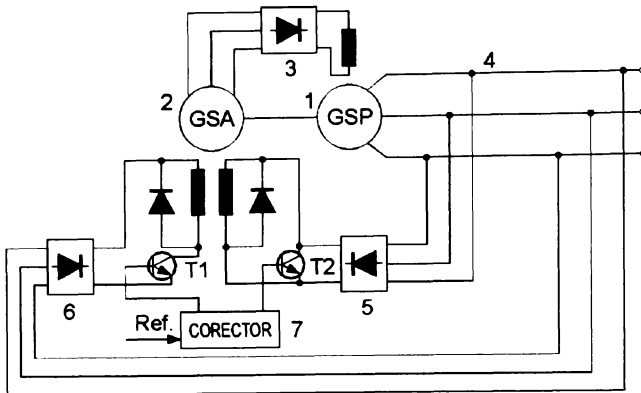


Fig. 1.20 Schema de principiu a regulatorului de tensiune cu sistem de hipercompundare controlată: 1 - generator sincron principal; 2 - excitatricea; 3, 5, 6 - punți redresoare; 4 - transformator de compundare; 7 - corector.

siunii către valoarea prescrisă;

- hipercompundarea - care este de fapt o forțare a excitației, este limitată superior pentru a nu se ajunge în zona saturată a caracteristicii de magnetizare, unde eficiența ei ar fi extrem de redusă;
- prizele de la înfășurarea generatorului sincron principal, când sunt necesare, complică construcția și întreținerea acestuia.

O soluție mai simplă este prezentată în lucrarea [47], soluție ce are în vedere compundajul de fază (după valoarea curentului de sarcină și defazajul acestuia față de tensiune). Soluția - utilizată și de unele firme străine, cum ar fi A.E.G. și Siemens - este indicată în figura 1.21 și utilizează o bobină de reactanță în paralel cu transformatorul de compundaj.

Această schemă este extrem de simplă, însă nu se indică performanțele ei în regim static și dinamic. Reglarea curentului de excitație, în vederea păstrării unei valori constante a tensiunii la bornele generatorului sincron, necesită un sistem de modificare a valorii reactanței bobinei B (element neliniar), ceea ce aduce dezavantajele cunoscute.

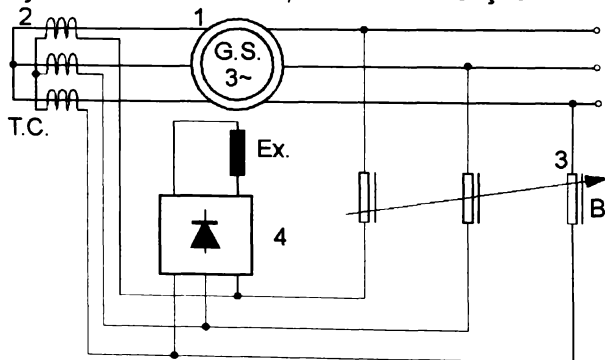


Fig. 1.21 Schema de compundaj paralel cu bobină de reactanță: 1 - generator sincron; 2 - transformator de compundaj; 3 - bobină de reactanță; 4 - redresor trifazat.

Generatoarele sincrone autonome sunt utilizate și pe locomotivele Diesel electrice de mare putere [15], [80]. Aceste generatoare au puteri cuprinse între

2.200 W și 4.000 kVA, și folosesc pentru excitație generatoare sincrone auxiliare autoexcitate, după scheme asemănătoare cu cea din figura 1.20. La aceste aplicații ale generatoarelor sincrone nici nu se pune problema păstrării frecvenței între anumite limite, deoarece ulterior tensiunea furnizată de ele este redresată.

În concluzie, adoptarea - cu modificările de rigoare - a uneia dintre soluțiile prezentate în figurile 1.17, 1.20 și 1.21, nu ar satisface exigențele consumatorului izolat de energie electrică.

□

Capitolul 2.

CARACTERISTICILE MECANICE ALE MAȘINILOR PRIMARE ȘI INFLUENȚA LOR ASUPRA FUNCȚIONĂRII ANSAMBLULUI MAȘINĂ PRIMARĂ - GENERATOR SINCRON

Mașina primară, ce antrenează generatorul sincron, poate folosi energia apelor (turbină hidraulică), a vântului (turbină eoliană), sau energia combustibililor (turbine cu abur și mașini cu piston cu abur sau motoare cu ardere internă ori turbine cu gaz).

2.1. Stabilitatea funcționării agregatului mașină primară - generator sincron

Ecuția de mișcare a agregatului mașină primară - generator sincron este, în regim dinamic, următoarea:

$$M_1 - M_2 = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}, \quad (2.1)$$

unde: M_1 este cuplul produs de mașina primară; M_2 este cuplul dezvoltat de generatorul sincron; J este momentul de inerție al maselor aflate în mișcare de rotație; $d\Omega/dt$ reprezintă variația vitezei de rotație în timp.

La funcționarea staționară (viteză de rotație constantă), ecuația de mișcare conduce la:

$$M_1 - M_2 = 0, \quad (2.2)$$

adică punctul de funcționare se află la intersecția caracteristicilor mecanice ale celor două mașini.

Agregatul mașină primară - generator sincron se comportă bine la acțiunea factorilor de dezechilibru dacă punctul de funcționare este stabil.

Considerăm două cazuri posibile de variație cu viteza de rotație a cuplurilor M_1 și M_2 (figura 2.1, a) și b)).

În cazul din figura 2.1 a), dacă dintr-un anumit motiv viteza de rotație crește de la n_1 la n_2 , cuplul dinamic $M_1 - M_2$ devine negativ, conducând la scăderea vitezei de rotație până la restabilirea echilibrului. Analog se arată că la scăderea - dintr-un motiv oarecare - a vitezei de rotație, cuplul dinamic $M_1 - M_2$ devine pozitiv, conducând la creșterea vitezei de rotație. Deci, pentru cazul prezentat în figura 2.1 a), punctul A este un punct de funcționare stabil.

În cazul din figura 2.1 b), dacă dintr-un anumit motiv viteza de rotație crește, de la n_1 la n_2 , cuplul dinamic $M_1 - M_2$ devine pozitiv, conducând la creșterea turajului, teoretic spre valori oricât de mari. Analog, se arată că la scăderea - dintr-un motiv

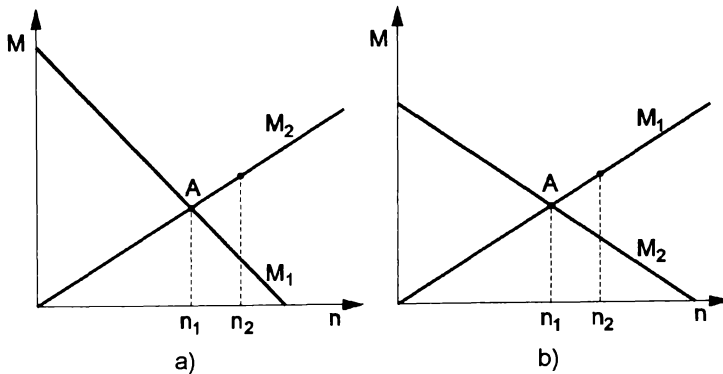


Fig. 2. 1 Caracteristicile mecanice ale agregatului mașină primară - generator sincron ce conduce la funcționarea stabilă a) sau instabilă b).

oarecare - a vitezei de rotație, cuplul dinamic M_1-M_2 devine negativ, conducând la scăderea în continuare a vitezei de rotație, până la oprire. Deci, punctul A din figura 2.1 b) este un punct de funcționare *instabilă* a grupului mașină primară - generator.

În figura 2.1 am considerat două cazuri posibile extreme de variație a cuplurilor M_1 și M_2 .

În realitate, dacă excitația generatorului sincron este constantă, cu creșterea vitezei de rotație crește atât tensiunea la borne - aproximativ proporțional cu viteza de rotație - cât și puterea consumată de o impedanță de sarcină, aproape după o parabolă [88]. Putem considera deci că variația cuplului generatorului sincron este proporțională cu viteza de rotație, și pentru ca agregatul mașină primară - generator sincron să funcționeze stabil este necesar ca mașina primară să aibă o caracteristică mecanică cu alură similară celei din figura 2.1 a).

2.2. Caracteristica mecanică a unei turbine hidraulice și influența ei asupra funcționării grupului turbină hidraulică - generator sincron

Cu toată diversitatea turbinelor hidraulice, caracteristicile mecanice (moment - funcție de turație) au aceeași alură (figura 2.2) [2]. Cu creșterea vitezei de rotație, momentul se micșorează - variația fiind liniară.

Din figura 2.2 se constată că pentru deschideri ale aparatului director tot mai mari ($\beta_4 > \beta_3 > \beta_2 > \beta_1$), panta dreptei $M_1 = f(n)$ este mai mare.

Cunoscând că variația cuplului generatorului sincron cu viteza de rotație este liniar crescătoare (sau apropiată de

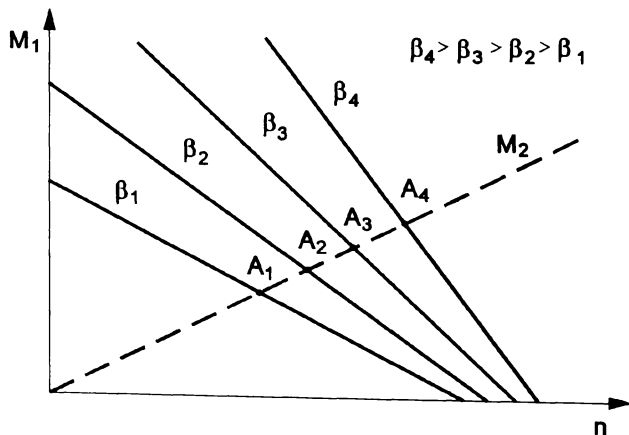


Fig. 2. 2 Caracteristicile mecanice ale turbinei hidraulice.

o parabolă [88]), rezultă că punctele de funcționare A_1 , A_2 , A_3 și A_4 sunt stabile (vezi § 2.1).

Viteza de rotație pentru care momentul turbinei este nul se numește *viteză de rotație de ambalare*. Cunoașterea acestei valori este importantă deoarece aceasta este viteza de rotație pe care o poate atinge în funcționare agregatul turbină - generator, când sarcina generatorului scade brusc la zero și nu sunt luate măsuri pentru reducerea debitului apei. Dacă această viteză de rotație este periculoasă pentru grup (și în majoritatea cazurilor este periculoasă), prin intermediul aparatului de reglare a debitului apei se asigură evitarea ajungerii la viteza de rotație de ambalare. Funcționarea agregatului turbină hidraulică - generator sincron este caracterizată prin faptul că - în vreme ce energia hidraulică disponibilă este aproximativ constantă - energia electrică furnizată de generator se modifică în permanență, în funcție de nevoile consumatorului.

Pentru ca frecvența tensiunii la bornele generatorului sincron să rămână constantă, este necesar ca viteza de rotație stabilită de turbina hidraulică să rămână constantă.

Deci, în componența agregatului trebuie să existe un organ - numit regulator automat de viteză de rotație (frecvență) - care să modifice în permanență cuplul motor al turbinei în funcție de variația cuplului rezistent (cuplul electromagnetic al generatorului sincron și cuplul corespunzător pierderilor).

Variația cuplului motor al turbinei se poate face numai prin modificarea debitului, ceea ce necesită existența unui aparat director la turbină, asupra căruia să se poată acționa.

În lucrarea [72] se arată că - la aceeași valoare a diferenței $M_1 - M_2$ - variația vitezei de rotație a agregatului turbină - generator sincron este cu atât mai mică cu cât momentul de inerție

J al grupului este mai mare, la aceeași variație de sarcină. Acesta poate fi mărit prin completarea grupului cu un volant.

Volantul se caracterizează prin mărimea GD^2 , G fiind greutatea sa, iar D diametrul de rotație. Momentul de rotație este dat de relația:

$$J = \frac{G \cdot D^2}{4g}, \quad (2.3)$$

unde g este accelerația gravitațională.

În figura 2.3 sunt indicate punctele de funcționare stabilă ale agregatului turbină hidraulică - generator sincron pentru diferiți curenți de sarcină ai generatorului

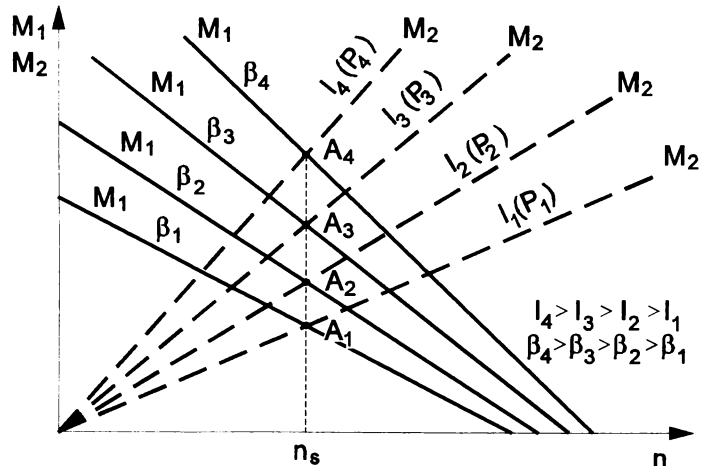


Fig. 2. 3 Stabilirea punctului de funcționare al agregatului turbină - generator sincron la viteza de rotație sincronă.

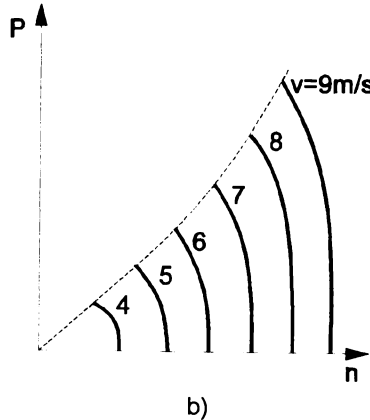
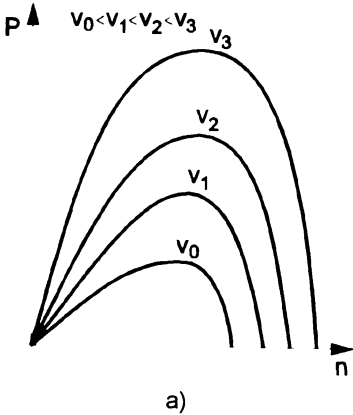
(puterii) sub o anumită valoare maximă. Evident că în intervalul $A_1 - A_4$ sunt o infinitate de puncte de funcționare stabilă posibile.

Punctul A_4 este determinat de curentul de sarcină maxim (corespunzător unui unghi interior maxim de cca. 40°) și de debitul maxim ce poate fi asigurat în turbină, iar A_1 corespunde unui curent de sarcină nul.

În concluzie, caracteristica mecanică a turbinei hidraulice asigură funcționarea stabilă a grupului turbină hidraulică - generator sincron pentru orice sarcină între zero și sarcina maximă precalculată, la viteză de rotație constantă sau puțin variabilă în jurul vitezei de rotație sincrone.

2.3. Caracteristica mecanică a unei turbine eoliene și influența ei asupra funcționării grupului turbină eoliană - generator sincron

Există o mare varietate de turbine eoliene, aceasta deoarece viteza vântului este dependentă, printre altele, de zona geografică și de altitudinea la care ar putea



fi amplasată turbină eoliană [25]. S-au stabilit însă două mari clase de turbine eoliene, și anume turbine eoliene lente și turbine eoliene rapide. Din punct de vedere al caracteristicilor putere - turație, diferența constă în aceea că pentru turbinele

Fig. 2.4 Caracteristicile putere - turație pentru: a) turbine eoliene lente; b) turbine eoliene rapide (v este viteza vântului).

eoliene rapide, la viteze de rotație mici, nu există puncte de funcționare stabile, sau acestea nu prezintă interes (figura 2.4).

Caracteristicile mecanice (cuplu - viteză de rotație) pentru o turbină eoliană lentă sunt reprezentate în figura 2.5.

Având în vedere cele expuse în § 2.1, și cunoscând că variația cuplului generatorului sincron cu viteza de rotație este liniar crescătoare (sau apropiată de o parabolă [88]), rezultă că punctele de funcționare A_1, A_2, A_3, A_4 sunt stabile.

Trebuie precizat că literatura recomandă pentru produce-

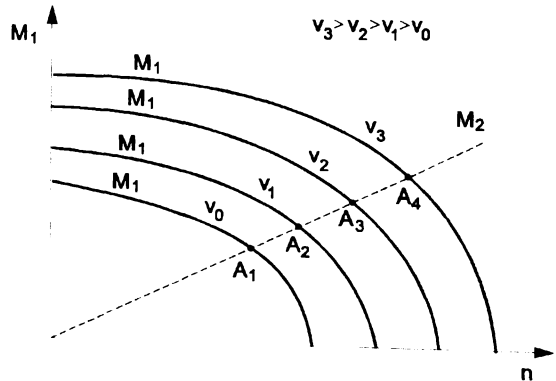


Fig. 2.5 Caracteristicile mecanice ale turbinelor eoliene lente ($M=f(n)$).

rea energiei electrice utilizarea turbinelor eoliene rapide [25].

Dacă generatorul electric ar fi de curent continuu, caracteristica sa $P=f(n)$ ar depinde de tipul excitației acestuia, având alura din figura 2.6 ($P_2=f(n)$).

În conformitate cu cele stabilite în § 2.1, punctele $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ sunt puncte de funcționare stabilă.

Dacă generatorul electric ar fi de tip asincron, caracteristica sa putere - viteză de rotație este asemănătoare cu cea a generatorului de curent continuu, deci și în acest caz funcționarea agregatului turbină eoliană - generator electric este stabilă, dar la viteze de rotație peste o anumită valoare limită [98].

Dacă generatorul electric este de tip sincron, punctele $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ sunt puncte de funcționare stabilă, după cum rezultă din figura 2.7.

Se observă că dacă generatorul sincron trebuie să funcționeze la sincronism, acest lucru este posibil numai de la o anumită viteză a vântului. Din figura 2.7 se mai constată că, pentru o anumită viteză a vântului, puterea debitată de către generatorul sincron - ce funcționează la sincronism - este limitată superior. O eventuală creștere (nu prea mare) a acestei puteri s-ar putea face în detrimentul păstrării constante a frecvenței.

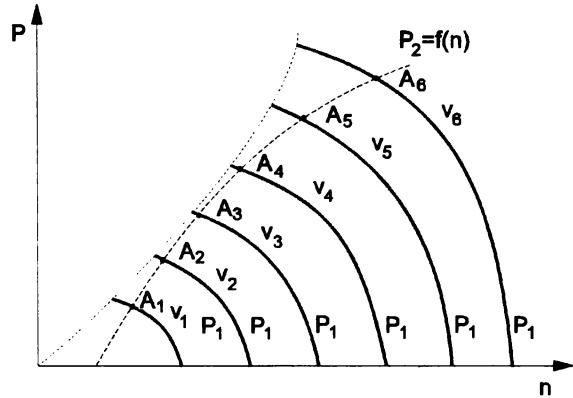


Fig. 2.6 Caracteristicile putere - viteză de rotație pentru o turbină eoliană rapidă și un generator de curent continuu, și punctele de funcționare stabilă.

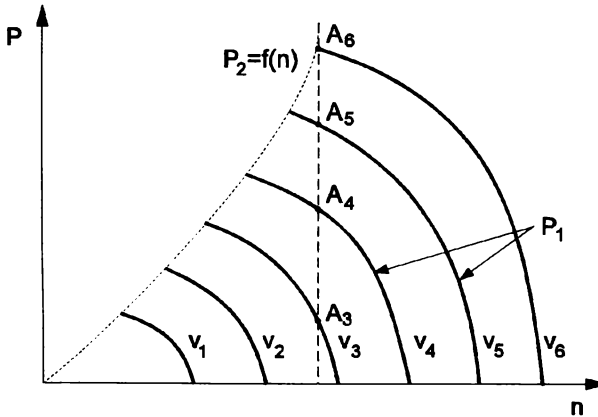


Fig. 2.7 Caracteristicile putere - viteză de rotație pentru o turbină eoliană rapidă și un generator sincron, și punctele de funcționare stabilă.

Față de grupul turbină hidraulică - generator sincron, grupul turbină eoliană - generator de orice tip are acest mare dezavantaj, și anume că puterea electrică furnizată depinde de viteza vântului, deci de capriciile naturii. Nu se poate construi un „rezervor” de energie eoliană, ca în cazul energiei hidraulice.

În concluzie, caracteristicile de ieșire ale unei turbine eoliene asigură o funcționare stabilă a grupului turbină eoliană - generator electric (de orice tip), probleme mai dificile prezentând varianta cu generator asincron. Realizarea practică a unei microcentrale eoliene ridică probleme deosebite în ceea ce privește păstrarea frecvenței între limitele cerute de consumator.

2.4. Caracteristica mecanică a unui motor cu ardere internă și influența ei asupra funcționării grupului motor cu ardere internă - generator sincron

La motoarele cu ardere internă, analiza stabilității funcționării grupului motor - generator trebuie făcută luând în considerare caracteristica mecanică $M_1=f(n)$, cât și caracteristica putere - viteză de rotație.

Astfel, din figura 2.8 se constată că există un domeniu de utilizare a motorului, între două viteze de rotație caracteristice fiecărui motor cu ardere internă.

Punctul de funcționare N al unui motor cu ardere internă trebuie să fie între vitezele de rotație n_{MM} - corespunzătoare cuplului motor maxim, și n_{PM} - corespunzătoare puterii efective maxime furnizată de motor. Între aceste limite de viteze de rotație, funcționarea grupului motor cu ardere internă - generator electric (de orice tip) este stabilă (figura 2.9).

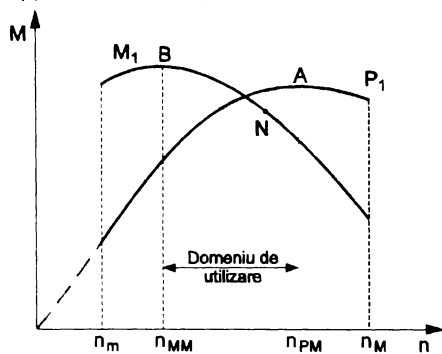


Fig. 2. 8 Caracteristicile $M_1=f(n)$ și $P=f(n)$, pentru un motor cu ardere internă.

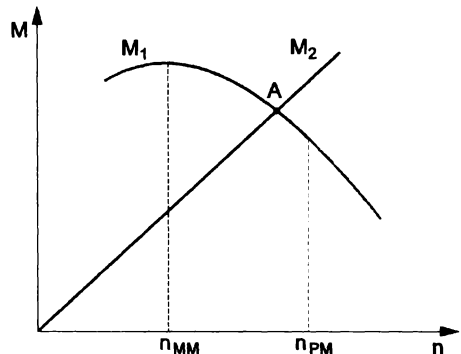


Fig. 2. 9 Caracteristicile mecanice pentru un motor cu ardere internă și un generator sincron.

În conformitate cu cele afirmate în § 2.1, punctul A este un punct static de funcționare al grupului motor cu ardere internă - generator sincron.

}}

Capitolul 3.

PREZENTAREA VARIANTEI ADOPTATE PENTRU CIRCUITUL DE AUTOEXCITAȚIE AL GENERATORULUI SINCRON

În lucrarea de față, voi prezenta în continuare un grup turbină hidrolică - generator sincron autoexcitat, insistând asupra schemei de autoexcitație pe care o propun, cu regulatorul de tensiune aferent, asupra caracteristicilor turbinei hidrolice și ale generatorului sincron și asupra regulatorului de debit (turație și deci frecvență).

3.1. Scheme de autoexcitație propuse și analizate pentru generatorul sincron ce echipează o microhidrocentrală

În § 1.3 au fost prezentate o serie de scheme de autoexcitație, atât cu mașini rotative auxiliare, cât și cu elemente semiconductoare. La fiecare schemă au fost re-

date succint avantajele și dezavantajele sale. Nu s-a făcut însă o comparație între diferitele variante prezentate și nici nu s-a luat în considerare efortul economic necesar pentru realizarea fiecărei scheme.

Dacă facem acum o comparație între diferitele variante prezentate, am putea afirma că cea mai simplă și eficientă este schema din figura 1.14, care prezintă generatorul sincron și elementele anexe ce intră în componența echipamentului electric al autovehiculelor. Schema respectivă nu asigură însă o totală autonomie în funcționare, fiind necesară o baterie de acumuloare. În varianta prezentată, acesta nu este un dezavantaj major. Pentru a asigura însă o tensiune de 220 V (pentru consumul casnic) sunt necesare modificări, ce aduc o serie de dezavantaje - dintre care unele au fost menționate - și care, evident, conduc la costuri mai mari.

O schemă complexă, eficientă și performantă este cea din figura 1.20. Avantajele ei au condus la aplicarea sa pentru realizarea noii serii de generatoare IMEB. Dezavantajele prezentate în § 1.3 se pot acum exprima sintetic prin aceea că schema în discuție este una costisitoare.

Pornind de la aceste concluzii, am căutat să realizez un generator sincron cu o schemă de excitație cât mai simplă, care să dea rezultate bune în alimentarea consumatorilor izolați, utilizând energia hidraulică.

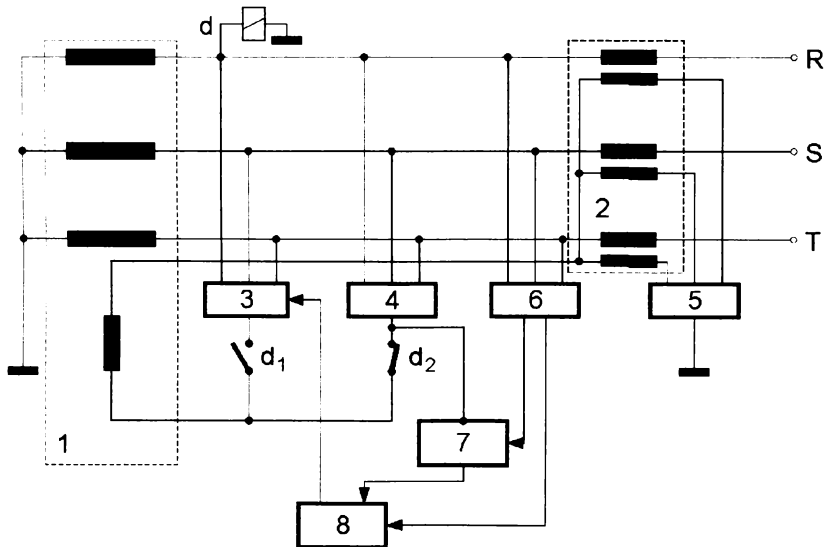


Fig. 3.1 Schema de autoexcitație a generatorului sincron cu regulator automat de tensiune, cu trei redresoare: 1 - generator sincron autoexcitat; 2 - transformator de forțare a excitației; 3 - redresor comandat de tensiune; 4, 5 - redresoare necomandate de tensiune; 6 - sursă stabilizată de tensiune; 7 - element de prescriere și comparație; 8 - dispozitiv de comandă pe grilă; d - releu de minimă tensiune.

De la început am impus următoarele condiții tehnico-economice:

- să nu se folosească mașini rotative auxiliare, care complică realizarea și cresc costul microhidrocentralei;
- să asigure variații ale tensiunii la bornele generatorului de maximum $\pm 5\%$ din tensiunea nominală;

- să asigure autoexcitarea și funcționarea pentru sarcini cuprinse între zero și sarcina nominală;

- să fie cât mai simplă, cu cât mai puține elemente, deci fiabilă;

- să nu necesite personal de exploatare cu o calificare deosebită.

În realizarea acestor cerințe am pornit de la ceea ce se cunoaște, și în lucrarea [73] am propus schema reprezentată (cu unele modificări) în figura 3.1.

Punerea în funcțiune a generatorului sincron, antrenat de turbina hidraulică, folosește remanența circuitului magnetic.

Contactul d_2 al releului de minimă tensiune fiind normal închis, tensiunea indusă de fluxul remanent inițiază autoexcitația prin intermediul redresorului necomandat 4, până când releul d sesizează tensiunea reglată (220 V). În acest moment se închide contactul d_1 , intrând în funcțiune redresorul comandat 3. Dispozitivul de comandă pe grilă 8 asigură impulsurile necesare redresorului comandat în funcție de diferența dintre tensiunea reală la bornele generatorului sincron și tensiunea prescrisă.

Transformatorul de forțare a excitației își aduce aportul în cazul unor variații considerabile de sarcină sau în cazul unor avarii de scurtă durată ale rețelei de alimentare a consumatorilor. În lucrarea [42] este prezentată și analizată o altă variantă a acestei scheme, care însă are mai multe elemente în componență, devenind deci mai scumpă. Schema realizată a dat rezultate, dar avea dezavantajul de a utiliza multe rele și contactoare. În această situație am adoptat o altă schemă, redată în figura 3.2.

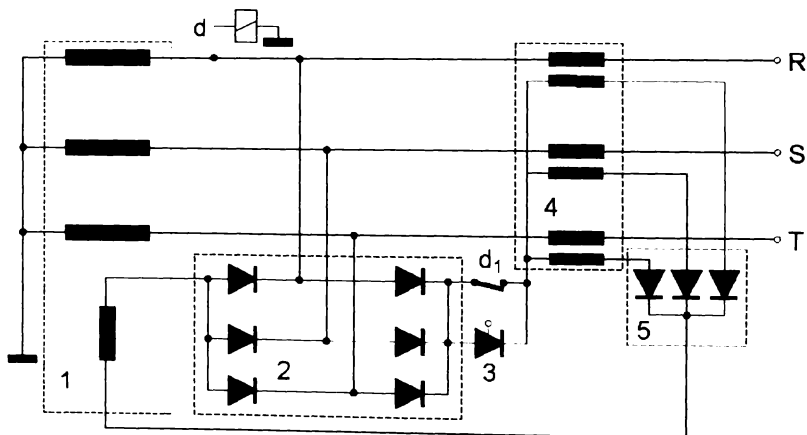


Fig. 3. 2 Schema de autoexcitație a generatorului sincron cu reglare automată a tensiunii, cu două redresoare: 1 - generator sincron; 2 - redresor trifazat în punte necomandat; 3 - tiristor de reglare a tensiunii (elementul de execuție); 4 - transformator de forțare a excitației; 5 - redresor trifazat monoalternanță necomandat; d - releu de minimă tensiune.

În această figură nu am mai prezentat - pentru a nu complica schema - blocul de prescriere și blocul de formare a impulsurilor de comandă ale tiristorului și sursa de tensiune continuă stabilizată.

Transformatorul de forțare a excitației poate lipsi, dacă nu se urmărește conectarea la rețeaua autonomă a unor consumatori inductivi.

Punerea în funcțiune a generatorului sincron cu excitația realizată conform schemei din figura 3.2 are în vedere folosirea remanenței circuitului magnetic. Prin

intermediul redresoarelor 2 și 5 și al contactului normal închis d_1 al releului de minimă tensiune, circuitul de excitație este închis. Tensiunea indusă de fluxul remanent asigură autoexcitarea generatorului.

De la o anumită valoare a tensiunii de fază (170 V), sursa de tensiune stabilizată asigură tensiunile de alimentare, și blocurile de prescriere, respectiv de comandă pe grilă a tiristorului funcționează normal, asigurând condițiile de trecere în conducție a tiristorului 3. Aceasta face ca la atingerea tensiunii de 220 V - când releul d_1 își deschide contactul normal închis d_1 - tiristorul 3 să intre instantaneu în conducție, fără a mai exista întreruperi ale curentului în circuitul de excitație.

În ipoteza că din schema din figura 3.2 lipsește transformatorul de forțare a excitației, și deci și redresorul 5, tensiunea continuă pe care o asigură redresorul 2 este:

$$U_{d_0} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_2 \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} \quad (3.1)$$

Dacă tensiunea U_2 este 220 V, tensiunea continuă maximă ce poate fi furnizată de redresorul 2 este 514 V. Avându-se în vedere că un unghi de comandă al tiristoarelor în jurul valorii de 90° permite reglarea în ambele sensuri ale curentului de excitație, tensiunea nominală de excitație a generatorului sincron ar trebui să fie în jurul valorii de 257 V. Autoexcitarea generatorului sincron se produce astfel foarte rapid.

Tensiunea continuă furnizată de redresorul 2 și tiristorul 3 este dată de relația:

$$U_{d_c} = U_{d_0} \cdot \cos \alpha = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} \cdot \cos \alpha, \quad (3.2)$$

unde α este unghiul de comandă, ce variază în jurul valorii de 90° în situația prezentată.

Astfel, tensiunea furnizată excitației poate fi modificată, teoretic, între 257 și 514 V. Cum tensiunea de excitație de 257 V asigură, la mersul în gol, o tensiune la bornele generatorului de 220 V, iar consumatorii racordați la rețeaua autonomă au caracter rezistiv, schema de mai sus asigură menținerea constantă a tensiunii la bornele generatorului, pentru curenți de sarcină de la zero la valoarea nominală.

Această schemă are următoarele avantaje:

- este simplă;
- asigură timpi de răspuns mici;
- nu are în componență mașini rotative auxiliare;
- asigură stabilitate mare;
- permite forțarea excitației;
- este ieftină.

Dar totodată, are și dezavantaje:

- nu asigură, în regim dinamic, variații mici de tensiune la bornele generatorului, ca și schemele din figurile 1.17 și 1.20;
- necesită un tiristor cu comandă de stingere pe grilă;
- necesită un bloc de furnizare a impulsurilor de comandă complicat.

Pentru a elimina tiristorul cu comandă de stingere pe grilă, am realizat sche-

ma prezentată în figura 3.3.

Această schemă, pe lângă faptul că elimină două din dezavantajele schemei din figura 3.2, aduce avantajul de a păstra constantă tensiunea la bornele generatorului sincron și pentru eventuale sarcini cu caracter capacitiv, deoarece tensiunea furnizată de redresorul 3 poate varia între 0 și 514 V, prin modificarea unghiului de comandă al fiecărui tiristor din componența redresorului 2 - între 180° și 0° .

Tristoarele, având în antiparalel diode, constituie de fapt elementul de execuție propriu-zis. În perioada de pomire a grupului turbină hidraulică - generator sincron, pentru a permite autoexcitarea generatorului, tristoarele sunt scurtcircuitate prin intermediul contactelor normal închise ale releului de minimă tensiune d. După ce tensiunea la bornele generatorului depășește pragul minim (198 V), contactele releului d se deschid și tristoarele amintite - comandate de dispozitivul de comandă pe grilă - stabilesc valoarea necesară pentru tensiunea de alimentare a excitației.

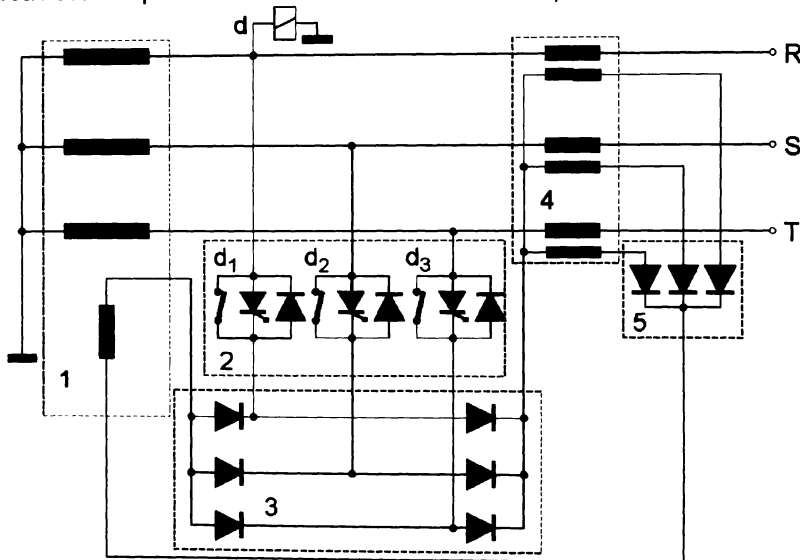


Fig. 3. 3 Schema de autoexcitație a generatorului sincron cu reglare automată a tensiunii: 1 - generator sincron; 2 - redresor cu tiristor (element de execuție); 3, 5 - redresoare necomandate; 4 - transformator de forțare a excitației; d - releu de minimă tensiune.

Modul de montare și de utilizare a celor trei tristoare constituie un element de noutate, fiind considerat de autor ca fiind cel mai eficient montaj de redresor comandat pentru reglarea tensiunii de excitație, deci a tensiunii la bornele generatorului sincron autoexcitat.

Schema prezentată în figura 3.3 are următoarele avantaje față de alte scheme prezentate în capitolul 1:

- funcționează și la tensiuni scăzute, prin proiectarea în acest sens a blocurilor auxiliare, deci asigură revenirea tensiunii la borne la valoarea nominală la finele unui proces tranzitoriu determinat de o perturbație externă;
- autoexcitarea generatorului se face cu un singur etaj de autoexcitație, ceea ce - pe lângă eliminarea unor mașini auxiliare - aduce avantajul unui timp de răspuns mai mic;

- utilizarea tiristoarelor ca în montajul din figura 3.3 conduce la reducerea numărului de componente ce intră în alcătuirea organului de execuție și simplifică schema.

Utilizarea schemei din figura 3.3 conduce însă la un regim tranzitoriu nedorit în momentul deschiderii contactelor releului d. Anterior momentului deschiderii acestui releu, la o tensiune de fază de 220 V, tensiunea aplicată excitației ar fi 514 V, iar posterior momentului amintit, tensiunea aplicată excitației ar fi de 257 V. Pentru a elimina acest efect tranzitoriu nedorit, am adoptat o altă schemă, prezentată în figura 3.4.

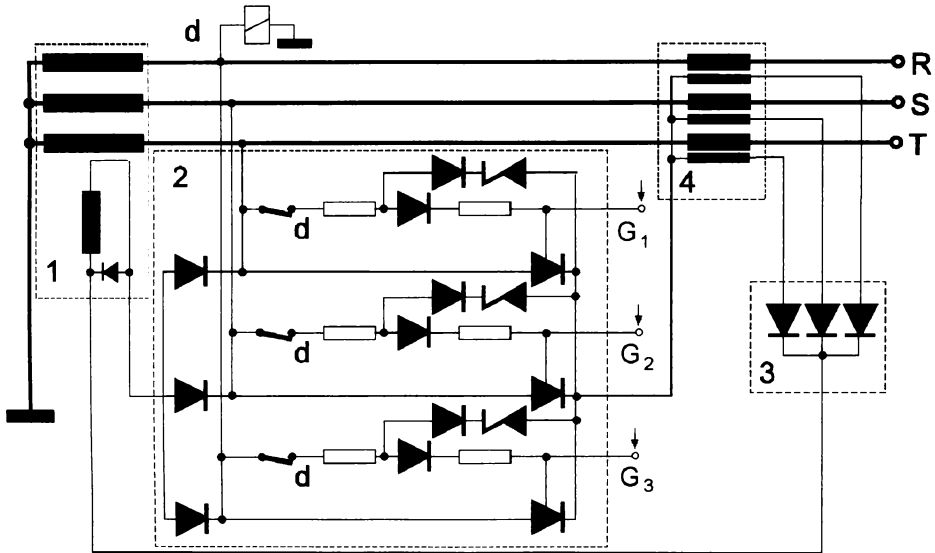


Fig. 3. 4 Schema de autoexcitație a generatorului sincron, cu reglare automată a tensiunii, utilizând un redresor trifazat în punte cu comportare mixtă: 1 - generator sincron; 2 - redresor trifazat în punte cu comportare mixtă; 3 - redresor necomandat; 4 - transformator de forță a excitației; d - releu de minimă tensiune.

Această schemă, ce poate fi considerată deasemenea o noutate, îmbină caracteristicile redresorului trifazat în punte necomandat cu cele ale redresorului trifazat în punte semicomandat. Astfel, la pornirea grupului, contactele releului de minimă tensiune d fiind închise, tiristoarele au impuls de comandă pe grilă prin intermediul circuitului electronic de comandă încorporat redresorului la fiecare alternanță pozitivă a tensiunii, și se comportă ca diode, redresorul trifazat în punte prezentând un comportament de redresor necomandat. Pe măsură ce tensiunea la bornele generatorului sincron crește - ca urmare a autoexcitării, blocul de comandă pe grilă al tiristoarelor - exterior redresorului - furnizează impulsuri de comandă pe grilă, care găsesc însă tiristoarele în conducție, neavând deci efect.

Unghiul de comandă al tiristoarelor este însă în concordanță cu valoarea tensiunii de fază și - în momentul atingerii tensiunii minime sesizată de releul d, ce determină deschiderea contactelor sale normal închise - tiristoarele lucrează în regimul lor normal, asigurând o tensiune de excitație egală cu cea din momentul anterior deschiderii contactelor.

Această schemă aduce și avantajul reducerii numărului de elemente din circuitul de excitație la minimum posibil.

Aceasta este schema pe care am adoptat-o la realizarea finală a prototipului microhidrocentralei electrice.

3.2. Schema bloc a microhidrocentralei echipată cu generator sincron autoexcitat

Pentru a putea analiza funcționarea în regim static și dinamic a microhidrocentralei în regim autonom, este necesar să fie cunoscută configurația acesteia. În figura 3.5 este redată schema bloc a microhidrocentralei.

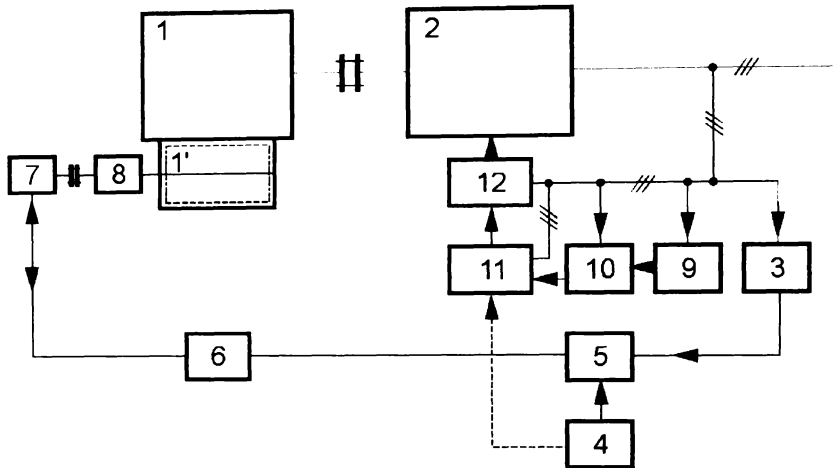


Fig. 3. 5 Schema bloc a microhidrocentralei echipate cu generator sincron autoexcitat: 1 - turbină hidraulică tip Banky, cu vana de reglare 1'; 2 - generator sincron autoexcitat; 3 - convertor frecvență tensiune; 4 - element de prescriere a frecvenței; 5 - element de comparație și amplificare în bucla de reglare a frecvenței; 6 - bloc de releu; 7 - motor electric de curent continuu cu două viteze de rotație; 8 - reductor de turație (angrenaj melcat); 9 - element de prescriere a tensiunii; 10 - element de comparație, regulator și amplificator în bucla de reglare a tensiunii; 11 - dispozitiv de comandă pe grilă; 12 - element de execuție în bucla de reglare a tensiunii (2 și 3 din figura 3.4).

Schema bloc din această figură constituie baza de pornire în scrierea funcțiilor de transfer ale fiecărui element component al ansamblului.

Aceasta permite atât reglarea tensiunii la borne cât și menținerea frecvenței între limitele impuse, prin culegerea informației referitoare la turație prin intermediul frecvenței, devenind inutilă prezența tahogeneratorului; deci, încă un element prezent în multe scheme bloc este eliminat.

În prezentul capitol voi prezenta și analiza comportarea fiecărui element al schemei bloc, în scopul scrierii funcțiilor de transfer corespunzătoare, funcției de transfer a ansamblului, și de a stabili - pe această bază - *varianta optimă* de funcționare a microhidrocentralei.

4.1. Prezentarea elementelor componente ale schemei bloc propuse

4.1.1. Turbina hidraulică cu vană de reglare a debitului de apă

Se cunoaște că puterea mecanică a unei turbine hidraulice P_T , cedată prin intermediul arborelui, este [101]:

$$P_T = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T, \quad (4.1)$$

în care ρ este densitatea apei, g - accelerația gravitațională, iar η_T - randamentul turbinei.

Puterea electrică obținută de un grup turbină hidraulică - generator electric este dată de relația următoare:

$$P_e = P_T \cdot \eta_g = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \cdot \eta_T \cdot \eta_g, \quad (4.2)$$

unde η_g este randamentul generatorului electric.

În cazul existenței unui lac de acumulare cu volum mare, pentru lungă perioadă de timp, se poate considera constantă căderea de apă H . În acest caz, puterea mecanică furnizată de turbină se poate exprima astfel:

$$P_T = k_1 \cdot Q, \quad (4.3)$$

unde $k_1 = \rho g H \eta_T$. Am considerat variații nu prea mari ale debitului, astfel încât randamentul η_T să poată fi considerat constant.

Debitul de apă turbinată este însă dependent de poziția vanei (β) și - într-o primă aproximație - se poate considera [72]:

$$Q = k_2(1 - \cos \beta). \quad (4.4)$$

Deci, în ipotezele precizate, puterea mecanică cedată de turbină este:

$$P_T = k_1 \cdot k_2(1 - \cos \beta) = k(1 - \cos \beta). \quad (4.5)$$

Turația turbinei este dependentă atât de debitul de apă (deci și de unghiul β), cât și de sarcina generatorului electric. Pentru generatorul de tip sincron, între sarcina acestuia și unghiul intern θ_0 este o legătură cunoscută, și în final - pentru o anumită turație, prestabilită - se poate stabili o relație între unghiul de deschidere al vanei β și unghiul intern al generatorului sincron θ_0 [72]:

$$\beta = 2 \arcsin \sqrt{\frac{(k_3 + k_4 \cos \theta_0) \sin \theta_0}{2k}}, \quad (4.6)$$

unde k_3 și k_4 sunt constante dependente de parametrii generatorului sincron (vezi [72] și § 4.1.2).

4.1.2. Generatorul sincron autoexcitat

Cea mai simplă variantă de generator sincron autoexcitat este prezentată în figura 4.1.

Generatorul funcționează pe baza câmpului magnetic remanent. Acesta induce în înfășurarea statorică un sistem trifazat de tensiuni, care după redresare alimentează înfășurarea de excitație. Procesul are loc în avalanșă până la un regim staționar, determinat fie de saturație, fie de intervenția aparatului de reglare. În ambele situații, punctul de funcționare stabilă se situează deasupra cotului caracteristicii de mers în gol a generatorului.

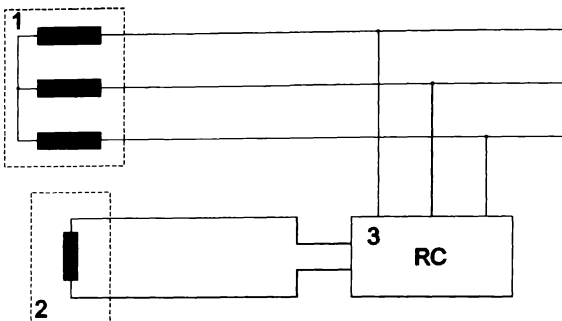


Fig. 4. 1 Generator sincron autoexcitat: 1 - înfășurările indusului; 2 - înfășurare de excitație; 3 - redresor comandat.

La un generator sincron cu poli aparenti, în ipoteza neglijării rezistențelor din expresiile impedanțelor, puterea electromagnetică activă P este dată de relația:

$$P = m \cdot U \left[\frac{U_{eE}}{X_d} \sin\theta + \frac{U(X_d - X_q)}{2X_d \cdot X_q} \sin 2\theta \right] = (k_3 + k_4 \cos\theta_0) \sin\theta_0, \quad (4.7)$$

unde m este numărul de faze (aici, $m=3$); U este tensiunea de fază la borne; $X_d = X + X_{md}$ este reactanța sincronă longitudinală; $X_q = X + X_{mq}$ este reactanța sincronă transversală; X este reactanța de dispersie a fazei statorice, iar X_{md} , X_{mq} sunt reactanțele de reacție longitudinală, respectiv transversală, și $k_3 = mUU_{eE}/X_d$, respectiv $k_4 = mU^2(X_d - X_q)/X_d X_q$, sunt considerate constante, la variații nu prea mari ale sarcinii.

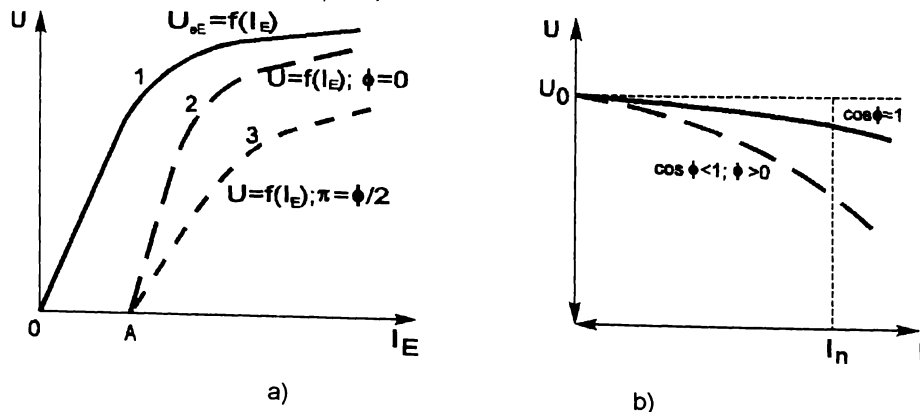


Fig. 4. 2 Caracteristicile de funcționare în gol și în sarcină (a) și caracteristicile externe ale generatorului sincron autonom (b).

Microhidrocentrala în discuție este destinată a funcționa în regim autonom, locul de amplasare fiind, de regulă, departe de o rețea electrică. De aceea, se va considera regimul autonom al generatorului sincron. Analiza comportării generatorului în acest regim se face cu ajutorul caracteristicilor sale de funcționare, dintre care sunt utilizate, în cazul de față, caracteristica de mers în gol ($U_0=U_{eE}=f(I_E)$ - figura 4.2 - a), curba 1); caracteristica de sarcină ($U=f(I_E)$ - când sarcina este rezistivă sau rezistiv inductivă - figura 4.2 - a), curbele 2 și 3); caracteristica externă ($U=f(I)$ - pentru aceeași sarcină rezistivă sau rezistiv - inductivă - figura 4.2 - b) și caracteristicile de reglare ($I=f(I_E)$ - figura 4.3).

În figura 4.3 - b) sunt reprezentate două curbe de sarcină $P=f(\theta_0)$, în condițiile că U_{eE} și U sunt constante, pentru un generator cu poli plini (curba 1) și pentru un generator cu poli aparenti (curba 2).

În funcționarea microhidrocentralei, pentru a se asigura calitatea energiei electrice furnizate, este necesar a fi păstrate, în anumite limite prestabilite, tensiunea la bornele generatorului și frecvența tensiunii induse.

Păstrarea tensiunii la borne între limitele prescrise, în ipoteza că turația este constantă, se realizează prin modificarea curentului de excitație I_E , la apariția unei perturbații (modificarea puterii debitate ΔP).

Modificându-se curentul de excitație, se modifică tensiunea electromotoare polară U_{eE} și punctul de funcționare se mută pe curbe de forma 2 (figura 4.3, b)), ca în figura 4.4 (vezi și [6]). Punctele A, B, C, D și E aparțin caracteristicii exterioare [64].

Dacă aproximăm

$$U_{eE} = I_E \cdot X_{md} \cdot k_E, \quad (4.8)$$

unde $k_E=2 L_{E1h}/3 L_{11hd}$ este o constantă determinată de raportul dintre inductivitatea

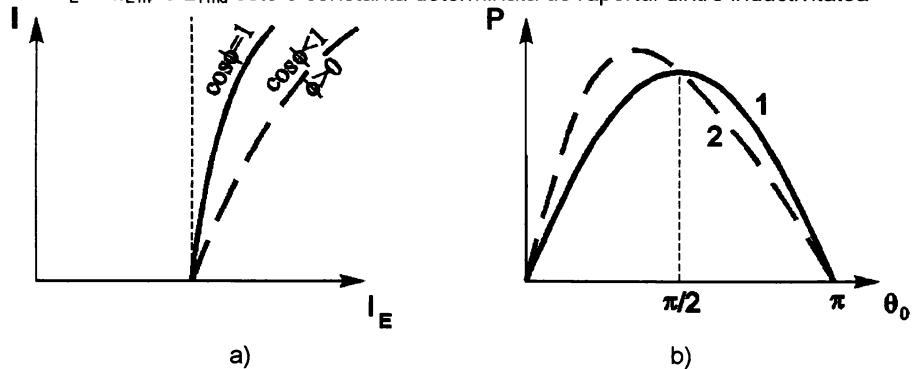


Fig. 4. 3 Caracteristicile de reglare - a) și curba de sarcină - b) pentru generator cu poli plini (1) și cu poli aparenti (2).

principală a înfășurării de excitație L_{E1h} și cea principală după axa longitudinală a unei faze a indusului L_{11hd} , din relația (4.7) rezultă:

$$P = mU \left[\frac{X_{md} k_E}{X_d} \cdot I_E \cdot \sin \theta_0 + \frac{U(X_d - X_q)}{2X_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\theta_0 \right], \quad (4.9)$$

de unde rezultă:

$$I_E = \frac{P}{mU} \frac{U(X_d - X_q)}{2X_d \cdot X_q} \sin 2\theta_0 \quad (4.10)$$

$$I_E = \frac{X_{md} \cdot k_E \sin \theta_0}{X_d}$$

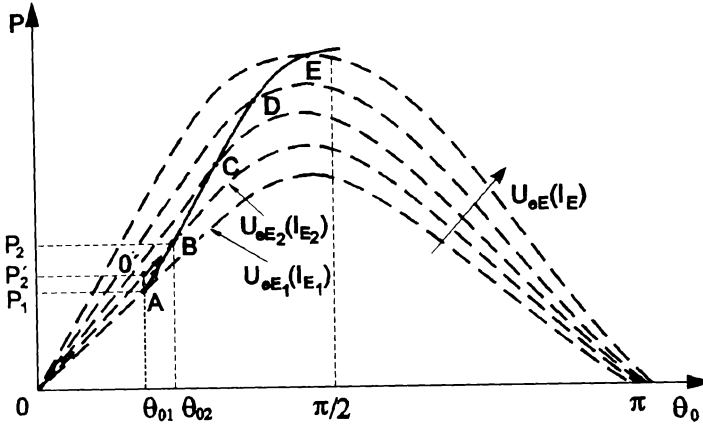


Fig. 4. 4 Caracteristicile $P=f(\theta_0)$, pentru diferite valori ale tensiunii U_{oe} , când $U=ct$.

Relația (4.10) are în membrul drept două mărimi variabile: puterea P și unghiul intern θ_0 . Aceste variabile nu sunt însă independente. Între ele există o legătură, dată de relația (4.7), când U_{oe} (deci și I_E) este constantă.

Presupunem că generatorul sincron funcționează stabil, având puterea e-

lectromagnetică P_1 corespunzătoare curentului de excitație I_{E1} și unghiul intern θ_{01} (punctul A din figura 4.5).

Apărând consumatori suplimentari, crește puterea internă a generatorului (pe baza aportului de putere furnizat de turbină) până la valoarea P_2 (punctul B din figura 4.5), căreia - în ipoteza menținerii constante a tensiunii la borne - îi corespunde curentul de excitație I_{E2} și unghiul intern θ_{02} (la funcționare stabilă). Din punctul A până în punctul B se poate ajunge însă într-o infinitate de moduri. Analizăm, pentru început, două modalități de deplasare a punctului de funcționare din A în B, adică două trasee ipotetice limită:

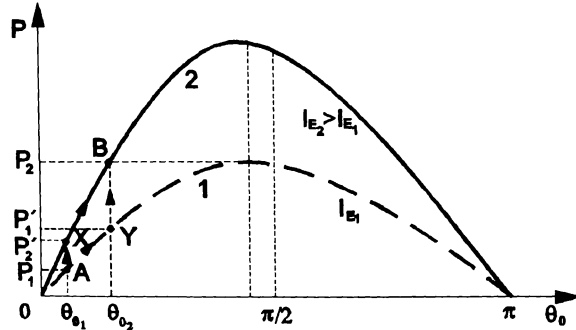


Fig. 4. 5 Deplasarea punctului de funcționare al generatorului sincron între două caracteristici $P=f(\theta_0)$, corespunzătoare curenților de excitație I_{E1} , respectiv I_{E2} .

a) A-X-B, adică la apariția cererii de putere corespunzătoare variației puterii electromagnetice $\Delta P=P_2-P_1$, modificarea curentului de excitație de la valoarea I_{E1} la valoarea I_{E2} are loc practic instantaneu, unghiul intern rămânând neschimbat la valoarea θ_{01} , puterea electromagnetică modificându-se de la valoarea P_1 la valoarea P'_2 (A-X). Acest caz ipotetic este apropiat de un caz real, având în vedere că cele două constante

de timp (constanta electromagnetică de timp a curentului de excitație și constanta electromecanică de timp) sunt de ordine de mărime diferite. Urmează apoi deplasarea punctului de funcționare pe caracteristica 2, unghiul intern crescând de la valoarea θ_{01} la valoarea θ_{02} , iar puterea electromagnetică a generatorului crescând de la valoarea P'_2 la valoarea P_2 (X-B).

Corespunzător celor trei puncte A, X, B, se pot scrie relațiile:

$$\begin{aligned} P_1 &= mU \left[\frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E1} \sin\theta_{01} + \frac{U(X_d - X_q)}{2X_d \cdot X_q} \sin 2\theta_{01} \right] \\ P'_2 &= mU \left[\frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E2} \sin\theta_{01} + \frac{U(X_d - X_q)}{2X_d \cdot X_q} \sin 2\theta_{01} \right] \\ P_2 &= mU \left[\frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E1} \sin\theta_{02} + \frac{U(X_d - X_q)}{2X_d \cdot X_q} \sin 2\theta_{02} \right] \end{aligned} \quad (4.11)$$

Relațiile (4.11) sunt valabile pentru un generator sincron cu poli aparenti. Dacă generatorul sincron este realizat cu poli plini, aceste relații devin:

$$\begin{aligned} P_1 &= mU \frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E1} \sin\theta_{01}, \\ P'_2 &= mU \frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E2} \sin\theta_{01}, \\ P_2 &= mU \frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E2} \sin\theta_{02}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

În ipoteza precizată ($U=ct.$), din relațiile (4.12) rezultă:

$$\frac{P_1}{P'_2} = \frac{I_{E1}}{I_{E2}}; \quad \frac{P'_2}{P_2} = \frac{\sin\theta_{01}}{\sin\theta_{02}}. \quad (4.13)$$

b) A-Z-B; adică, la apariția cererii de putere corespunzătoare variației puterii electromagnetice $\Delta P = P_2 - P_1$, se modifică, la curentul de excitație $I_{E1}=ct.$ unghiul θ_0 , de la valoarea θ_{01} la valoarea θ_{02} , punctul de funcționare deplasându-se din A în Y pe caracteristica 1, timp în care puterea electromagnetică se modifică de la P_1 la P'_1 - urmând modificarea bruscă a curentului de excitație de la valoarea I_{E1} la valoarea I_{E2} (unghiul intern θ_0 rămânând constant la valoarea θ_{02}) - puterea electromagnetică modificându-se de la P'_1 la P_2 (X-B). Corespunzător punctelor A, Y, B se pot scrie - pentru un generator cu poli aparenti - relațiile:

$$\begin{aligned} P_1 &= mU \left[\frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E1} \sin\theta_{01} + \frac{U(X_d - X_q)}{2X_d \cdot X_q} \sin 2\theta_{01} \right] \\ P'_1 &= mU \left[\frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E1} \sin\theta_{02} + \frac{U(X_d - X_q)}{2X_d \cdot X_q} \sin 2\theta_{02} \right] \\ P_2 &= mU \left[\frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E2} \sin\theta_{02} + \frac{U(X_d - X_q)}{2X_d \cdot X_q} \sin 2\theta_{02} \right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

Pentru un generator cu poli plini, aceste relații devin:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= mU \frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E1} \sin \theta_{01}, \\
 P'_1 &= mU \frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E1} \sin \theta_{02}, \\
 P_2 &= mU \frac{X_{md} \cdot k_E}{X_d} I_{E2} \sin \theta_{02}.
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

Din aceste relații, dacă considerăm de asemenea $U=ct.$, rezultă:

$$\frac{P'_1}{P_2} = \frac{I_{E1}}{I_{E2}}, \quad \frac{P_1}{P'_1} = \frac{\sin \theta_{01}}{\sin \theta_{02}}.
 \tag{4.16}$$

Din relațiile (4.13) și (4.16) rezultă:

$$\frac{I_{E2}}{I_{E1}} = \frac{P_2}{P'_1} = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{și} \quad \frac{\sin \theta_{02}}{\sin \theta_{01}} = \frac{P'_1}{P_1} = \frac{P_2}{P_1}.
 \tag{4.17}$$

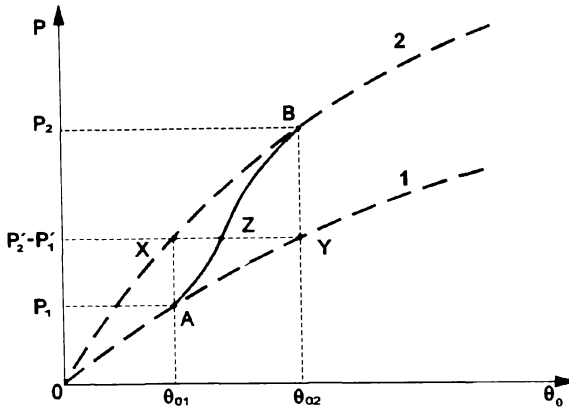


Fig. 4. 6 Deplasarea punctului de funcționare al generatorului sincron, după „metoda radicalului”.

Aceste relații sugerează o altă cale de deplasare a punctului de funcționare din poziția inițială A, într-o poziție finală B, și anume:

c) A-Z-B, modalitate ce se obține dacă impunem condiția suplimentară

$$P'_1 = P'_2,
 \tag{4.18}$$

ceea ce implică:

$$P'_1 = P'_2 = \sqrt{P_1 \cdot P_2},
 \tag{4.19}$$

Această modalitate de deplasare este justificată de următorul raționament: fiind cunoscută puterea electromagnetică P_1 și variația ΔP , rezultă univoc puterea electromagnetică P_2 . Pe orizontala construită corespunzător puterii P_2 se pot afla o infinitate de puncte B, ce rezultă prin intersectarea acestei orizontale cu o posibilă caracteristică $P=f(\theta_0)$, pentru I_E constant. Dintre aceste curbe posibile selectăm pe aceea care asigură $P'_1=P'_2$ - figura 4.6, corespunzătoare curentului de excitație I_{E2} . Evident, punctul de funcționare stabilă al generatorului sincron va fi B, corespunzător puterii P_2 și unghiului intern θ_{02} .

Refăcând raționamentele din § 4.1.2. a) și 4.1.2. b), pentru $I_E=I_{E2}$ și $\theta_0=\theta_{02}$, rezultă:

$$\frac{I_{E2}}{I_{E1}} = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} = \sqrt{\frac{I_2 \cos \varphi_2}{I_1 \cos \varphi_1}}.
 \tag{4.20}$$

Altfel spus, pentru a asigura păstrarea constantă a tensiunii la bornele generatorului sincron la apariția unei variații a puterii interne de la P_1 la P_2 , este necesară modificarea curentului de excitație de la I_{E1} la I_{E2} , conform relației (4.20). Numesc această metodă de modificare a curentului de excitație „metoda rădăcinii

pătrate" sau „metoda radicalului”. Aplicarea acestei metode de modificare a curentului de excitație - în vederea păstrării constante a tensiunii la bornele generatorului - presupune măsurarea continuă a puterii furnizate de către acesta, a variației puterii, și a curentului de excitație și introducerea unor semnale proporționale cu aceste trei mărimi într-un bloc de calcul, care să furnizeze la ieșire un semnal în concordanță cu relația (4.20).

Din relația (4.17) rezultă deasemenea că unghiul intern se va modifica de la valoarea θ_{01} la valoarea θ_{02} , conform relației:

$$\frac{\sin\theta_{02}}{\sin\theta_{01}} = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} \quad (4.21)$$

Pentru generatorul sincron cu poli aparenti, relația (4.20) constituie un punct de plecare. Considerarea valabilității acesteia și în acest caz are în vedere că mărimea celui de-al doilea termen din relațiile (4.11), (4.14) nu depășește 20-25% din mărimea primului termen al celei de-a doua relații [27]. Blocul de calcul amintit mai sus poate furniza la ieșire o mărime care să țină seama și de termenii din partea a doua a relațiilor precizate.

4.1.3. Convertorul frecvență - tensiune

Convertorul frecvență - tensiune (elementul 3 din figura 3.5) face parte din bucla de reglare a frecvenței (turației) generatorului sincron. La intrarea convertorului de frecvență se aplică tensiunea fazei statorice $U \approx 220$ V, având frecvența în jurul valorii de 50 Hz, iar la ieșire se obține o tensiune continuă a cărei valoare depinde liniar de frecvența de intrare.

Pentru păstrarea frecvenței f a tensiunii furnizate de generatorul sincron între anumite limite impuse ($f=50 \text{ Hz} \pm \Delta f/2$), rezultă o variație a tensiunii de ieșire a amplificatorului de valoare ΔU , determinabilă.

Plaja de frecvențe a convertorului f-U - eventual cu un amplificator atașat - este într-adevăr mult mai mare decât plaja de lucru necesară.

Notând cu f_0 frecvența de 50 Hz ($f_0=50$ Hz), pentru a asigura o relație liniară între frecvența de intrare în convertor și tensiunea furnizată de acesta (U_e) între aceste două mărimi trebuie să existe următoarea relație:

$$U_e = k_e(f - f_0), \quad (4.22)$$

k_e fiind o constantă a convertorului frecvență - tensiune cu amplificator inversor atașat, determinabilă, pentru fiecare tip de convertor.

Din relația (4.22) se constată că, pentru o frecvență $f=f_0=50$ Hz, tensiunea de ieșire U_e este nulă; pentru frecvențe $f < f_0$, tensiunea U_e devine negativă, iar pentru frecvențe $f > f_0$, tensiunea U_e devine pozitivă. De această observație trebuie să se țină seama în realizarea blocului de comparație și amplificare în bucla de reglare a frecvenței.

4.1.4. Elementul de prescriere a frecvenței. Elementul comparator, amplificator și regulator.

Convertorul frecvență -

tensiune propriu-zis, având ca elemente de bază circuite integrate, furnizează la ieșire o tensiune U_1 proporțională cu frecvența semnalului aplicat la intrare.

Deci:

$$U_1 = k \cdot f, \quad (4.23)$$

k fiind o constantă determinabilă prin calcul sau experimental - $[k]=V/Hz$.

Această tensiune trebuie comparată cu o altă tensiune - U_0 - dependentă de frecvența care se dorește a fi păstrată constantă ($f_0=50$ Hz). Această tensiune este furnizată de un element de prescriere care poate fi un potențiomtru. Acesta este un element liniar, tensiunea U_0 depinzând de poziția cursorului. Deci U_0 poate fi scris astfel:

$$U_0 = p_1 \cdot U_{ca} \quad (4.24)$$

p_1 fiind o constantă dependentă de poziția cursorului potențiomtrului.

Elementul de comparație a celor două tensiuni poate fi un amplificator diferențial, care poate realiza și o anumită amplificare, având o comportare de tip P sau PI.

Tensiunea la ieșirea sa U_{10} este determinată de tensiunile la intrare U_1 și U_0 , conform relației:

$$U_{10} = A(U_1 - U_0), \quad (4.25)$$

A fiind amplificarea comparatorului amplificator, ce are comportare P sau PI.

4.1.5. Blocul de relee

Amplificatorul operațional realizat cu circuite integrate prezintă la ieșire o tensiune proporțională cu abaterea de frecvență față de 50 Hz. Deci, când $f=50$ Hz, tensiunea respectivă este nulă.

Această tensiune comandă un element logic, numit „bloc de relee”. Acesta, în funcție de mărimea tensiunii, permite alimentarea motorului de curent continuu (7), pentru un sens de rotație sau altul, corespunzător uneia din cele două viteze de rotație.

La proiectarea și realizarea blocului de relee se pleacă de la următoarele cerințe:

- la depășirea abaterii de frecvență prestabilite ($\pm \Delta f/2$) cu o valoare mică, motorul de c.c. trebuie să se rotească cu viteza de rotație mică în sensul închiderii sau deschiderii vanei turbinei, până când frecvența tensiunii generatorului sincron reintră în intervalul prestabilit;

- la depășirea abaterii de frecvență prestabilite ($\pm \Delta f/2$) cu o valoare mare (mai mare decât dublul abaterii prestabilite), motorul de c.c. trebuie să se rotească cu viteza de rotație mare în sensul închiderii sau deschiderii vanei turbinei, până când frecvența tensiunii generatorului sincron este în domeniul $f_0 \pm \Delta f$, continuându-se rotirea - cu viteza de rotație mică - până când frecvența tensiunii generatorului sincron este în domeniul $f_0 \pm \Delta f/2$.

Luând în considerare definiția elementului de comutație - ca fiind elementul care întrerupe sau restabilește transmiterea unor mărimi fizice - blocul de relee poate fi considerat ca un element de comutație.

Am ales varianta utilizării releelor electromagnetice ca elemente de comutație deoarece acestea realizează separarea electrică între partea de comandă și cea comandată a schemei, asigură puterea necesară părții comandate, fără să complice suplimentar bucla de reglare a frecvenței.

4.1.6. Motorul electric de curent continuu cu două viteze de rotație

Pentru a asigura o reglare rapidă a frecvenței tensiunii la bornele generatorului sincron, modificarea mărimii debitului de apă trebuie să se facă cu o viteză mai mare sau mai mică, în funcție de mărimea abaterii frecvenței de la valoarea prestabilită. Am considerat că se poate realiza acest deziderat utilizând un motor de curent continuu având două turații nominale.

Acesta acționează prin intermediul unui angrenaj melcat vana turbinei hidraulice, fiind deci un motor cu excitație mixtă (având două înfășurări de excitație - una serie, cealaltă paralel - conectate adițional). Conectând simultan ambele înfășurări de excitație,

se obține viteza de rotație mică a motorului. Viteza de rotație mare se obține dacă se conectează înfășurarea derivație. Motorul electric mai are o înfășurare de frânare, ce intervine numai în momentul deconectării motorului, contribuind la oprirea rapidă a acestuia [31] și la reducerea suprareglării.

Dacă R este rezistența indusului, I este curentul de sarcină corespunzător cuplului rezistent M_R și U este tensiunea de alimentare, pentru cele două viteze de rotație n_1 , respectiv n_2 , sunt valabile relațiile:

$$n_1 = \frac{U - R \cdot I}{k_e (\Phi_s + \Phi_d)}, \quad (4.26)$$

$$n_2 = \frac{U - R \cdot I}{k_e \cdot \Phi_d}, \quad (4.27)$$

k_e fiind constanta mașinii de curent continuu, iar F_s , respectiv F_d , sunt fluxurile produse de înfășurările E_s , respectiv E_d .

4.1.7. Reductorul de turație cu angrenaj melcat

Datorită timpilor de pomire și de oprire ai motorului de curent continuu, antrenarea vanei turbinei direct de către acesta ar duce la un regim de funcționare al sistemului de reglare al excitației cu o suprareglare prea mare sau chiar la un proces oscilant.

Din acest motiv, se consideră necesară introducerea unui reductor de turație. Se alege un angrenaj melcat, ce realizează un raport mare de transmisie:

$$i_T = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}, \quad (4.28)$$

n_1 și n_2 fiind turațiile motorului de curent continuu (deci și ale melcului cu z_1 dinți), respectiv a coroanei dințate (cu z_2 dinți).

Concomitent cu reducerea turației, cuplul transmis vanei turbinei crește tot de i_T ori, ceea ce asigură mișcarea sigură a vanei din orice poziție a ei în jetul de apă.

Dacă se ia în considerare și randamentul angrenajului (de cca. 0,75 la cele cu $i_T \approx 100$), expresia cuplului M_v , transmis vanei turbinei, este:

$$M_v = \eta \cdot M_m \cdot i_T. \quad (4.29)$$

Momentul de inerție echivalent J_m , care la viteza arborelui motorului de c.c. produce aceeași energie cinetică ca și sistemul motor - vană, este:

$$J_m = J_v \frac{1}{i_T^2}, \quad (4.30)$$

unde J_v este momentul vanei turbinei, față de axa de rotație.

4.2. Prezentarea elementelor componente ale buclei de reglare a tensiunii din schema bloc propusă

4.2.1. Elementul de prescriere a tensiunii

Acest element face parte din bucla de reglare a tensiunii la bornele generatorului sincron. Având în vedere că elementele buclei de reglare a tensiunii lucrează cu semnale mici (± 15 V), și pentru a ține seama de tensiunile tuturor fazelor, am considerat necesară redresarea necomandată a celor trei tensiuni.

Generatorul sincron furnizează, în regim staționar, un sistem de tensiuni trifazat simetric, având valoarea efectivă a tensiunii de fază 220 V.

La ieșirea redresorului necomandat se obține tensiunea continuă

$$U_d = 1,17 \cdot U = 257 \text{ V.} \quad (4.31)$$

Pentru corelarea tensiunilor de alimentare ale circuitelor integrate cu tensiunile de intare, am fixat pentru tensiunea de referință valoarea de 7,5 V, căreia îi corespunde valoarea tensiunii de fază de 220 V. Această tensiune de referință scăzută asigură - teoretic - funcționarea buclei de reglare a tensiunii și la abateri mari ale tensiunii de fază la bornele generatorului. Acest lucru constituie un avantaj major față de schemele de excitație propuse de U.M.E.B. [20].

Tensiunea de referință se obține prin stabilizare, chiar de la sursa căreia se dorește a i se regla tensiunea de fază, și acesta este un alt avantaj major al schemei propuse, fiind o contribuție personală a autorului la realizarea unei scheme cât mai simple și mai fiabile.

Variațiile admise ale tensiunii la bornele generatorului sincron sunt determinate de cerințele impuse unor consumatori, referitor la tensiunea de alimentare. De exemplu, pentru un aparat TV se impune ca tensiunea de alimentare să fie de 220 V (+10%, -20%). Consider, de aceea, că tensiunea la borne trebuie să se încadreze în limitele 220 V \pm 10%, adică $U \in [198, 242]$ V.

Elementul de prescriere are o comportare proporțională.

4.2.2. Elementul comparator, amplificator și regulator

Deși compararea și amplificarea sunt funcții distincte ale buclei de reglare a tensiunii, ele s-au realizat cu același circuit integrat. Acest circuit, lucrând ca amplificator diferențial, realizează compararea tensiunii prescrise ($U_p=7,5\text{V}$) cu o fracțiune U_r din tensiunea curentă, prin aplicarea celor două tensiuni la intrările neinversoare, respectiv inversoare ale sale [90]. Tensiunea U_r este proporțională cu tensiunea curentă la bornele generatorului sincron.

Divizorul potențiomtric este calculat astfel încât, dacă tensiunea furnizată de redresorul necomandat este 257 V, atunci $U_r=7,5 \text{ V}$, și eroarea între tensiunea prescrisă U_p și tensiunea U_r este nulă.

Tensiunea U_e la ieșirea amplificatorului este dependentă de cele două tensiuni U_p și U_r , conform relației următoare [90]:

$$U_e = A(U_r - U_p), \quad (4.32)$$

unde A constituie amplificarea circuitului, care este un element de tip proporțional.

4.2.3. Dispozitivul de comandă pe grilă

Tensiunea de ieșire U_e din amplificatorul și regulatorul prezentat în paragraful anterior se aplică unui dispozitiv formator de impulsuri - devenit deja clasic - realizat cu circuite integrate specializate β AA 145.

Schemele sunt identice pentru cele trei faze. Prezentarea acestora, precum și calculul de adaptare a lor la bucla de reglare a tensiunii propusă se va face în capitolul 5.

4.2.4. Elementul de execuție în bucla de reglare a tensiunii

Păstrarea constantă a tensiunii la bornele generatorului sincron se face prin mo-

dificarea tensiunii aplicate înfășurării sale de excitație, conform uneia dintre caracteristicile prezentate în figura 4.3. Acest lucru este posibil cel mai eficient prin utilizarea schemei concrete prezentată în figura 3.4.

Tiristoarele din redresorul trifazat în punte cu comportare mixtă funcționează ca diode în timpul procesului de autoexcitare al generatorului sincron. Acest lucru este realizat cu ajutorul circuitelor plasate între anozii și grilele tiristoarelor, dimensionate corespunzător, astfel încât la fiecare alternanță pozitivă să intre în conducție imediat după trecerea prin zero - în sensul pozitiv - a tensiunii fazei corespunzătoare (figura 4.7).

În perioada de pomire a grupului turbină hidraulică - generator sincron, pentru a permite autoexcitarea generatorului, contactele normal închise ale releului de minimă tensiune d conectează circuitele de grilă amintite mai sus. După ce tensiunea la bornele generatorului depășește pragul minim (198 V), contactele releului d se deschid, circuitele mai sus amintite sunt deconectate și tiristoarele Th_1 , Th_2 , Th_3 primesc impulsuri de comandă pe grilă de la blocul prezentat în § 4.2.3 - stabilindu-se valoarea necesară pentru tensiunea de alimentare a excitației.

Modul de conectare și de utilizare a celor trei tiristoare constituie un element de noutate, fiind considerat de autor ca fiind cel mai eficient montaj de redresor comandat pentru reglarea tensiunii de excitație, deci a tensiunii la bornele generatorului sincron autoexcitat.

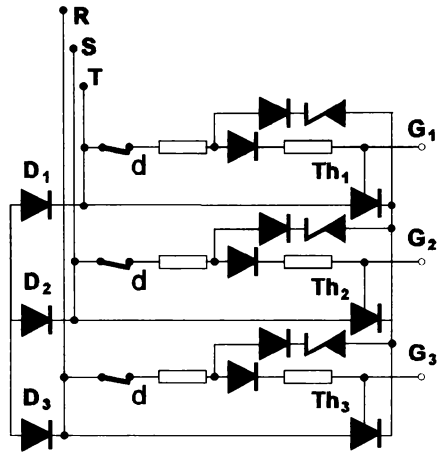


Fig. 4. 7 Redresor trifazat în punte, cu comportare mixtă.

Capitolul 5.

ALEGEREA ȘI CALCULUL ELEMENTELOR PREZENTATE ÎN SCHEMA BLOC PROPUȘĂ

În figura 3.5 am prezentat schema bloc a microhidrocentralei echipate cu generator sincron autoexcitat, având două bucle de reglare automată: una de reglare a turației (frecvența tensiunii furnizate) și a doua de reglare a valorii tensiunii la borne. Elementele componente, indiferent de tipul lor constructiv, sunt luate în considerare prin funcțiile lor în sistemul automat și prin relațiile care leagă mărimile de ieșire de cele de intrare. Pentru a putea scrie funcțiile de transfer ale elementelor componente din schema propusă, trebuie cunoscute concret aceste elemente.

5.1. Alegerea și calculul elementelor componente ale buclei de reglare a frecvenței

În lucrările [77] și [78] - referitoare la amplasamentul instalației pilot a microhidrocentralei la Lacul Mare din Dognecea - este precizat faptul că, pentru o cădere de apă H cuprinsă între 7,1 și 12,8 m, un debit Q cuprins între 0,1534 și 0,206 m^3s^{-1} și pentru un randament global al microhidrocentralei cuprins între 50-75%, puterea

electrică furnizată de generatorul sincron este cuprinsă între 5,64 și 13,65 kW. Aceste date constituie premisele de la care am pornit în alegerea sau calculul elementelor componente ale microhidrocentralei.

5.1.1. Alegerea turbinei hidraulice

În alegerea turbinei hidraulice care să echipeze microhidrocentralea trebuie ținut seama de datele prezentate mai sus. Căderea nominală H_n și debitul nominal Q_n determină diametrul rotorului turbinei. Căderea de calcul H_c și debitul de calcul Q_c determină viteza de rotație a turbinei. Atât viteza de rotație cât și diametrul rotorului trebuie să corespundă unei viteze de rotație sincronă a generatorului sincron, astfel stabilit încât să se realizeze randamentul maxim al turbinei [2]. S-a mai ținut seama de următoarele criterii suplimentare: simplitatea construcției, alegerea să se oprească asupra unei turbine tipizate și - pe cât posibil - aflată în fabricație, să existe posibilitatea automatizării microhidrocentralei.

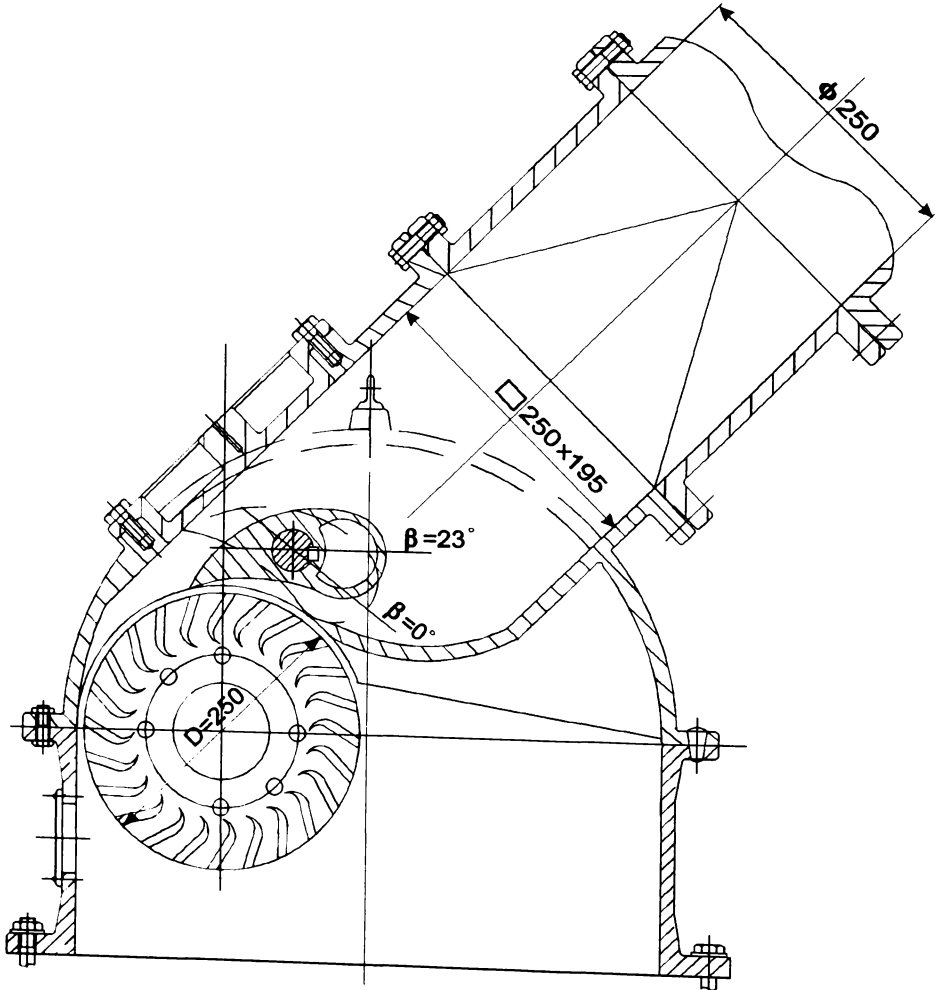


Fig. 5. 1 Secțiune prin turbina de tip Banky - 0,25.

Dintre tipurile de turbine hidraulice care întruneau aceste condiții, analizând tipodimensiunile recomandate de fosta Centrală Industrială pentru Utilaj Hidroenergetic și Metalurgic [73], autorul a ales microturbina de tip Banky - 0,25, cu următoarele caracteristici: cădere de apă între 5 și 35 metri; debit între 0,09 și 0,24 m³s⁻¹; putere mecanică între 3,22 și 60,10 kW; arbore orizontal; cu acțiune cu jet înclinat; cu vană (supapă) rabatabilă, β (unghiul de deschidere al aparatului director) având valori între 0 și 23°.

În figura 5.1 este redată o secțiune prin turbina Banky - 0,25.

Valorile puterii mecanice ale turbinei P_T , pentru diferite căderi H și debite Q , determinate pentru turbina sus amintită, sunt date în tabelul 5.1.

Tabelul 5.1

Valorile nominale ale puterii mecanice a turbinei

H	m	5	10	15	20	25	30	35
n	rot/min	380	537	658	760	850	931	1005
Q	m ³ /s	0,090	0,128	0,157	0,181	0,203	0,222	0,24
P_T	kW	3,22	9,16	16,86	25,92	36,34	47,69	60,1

Furnizorul turbinei (fostul C.C.S.I.T.E.H., actualul Hiderom Reșița) - testând această turbină cuplată cu un generator asincron - a obținut puterile electrice prezentate în figura 5.2.

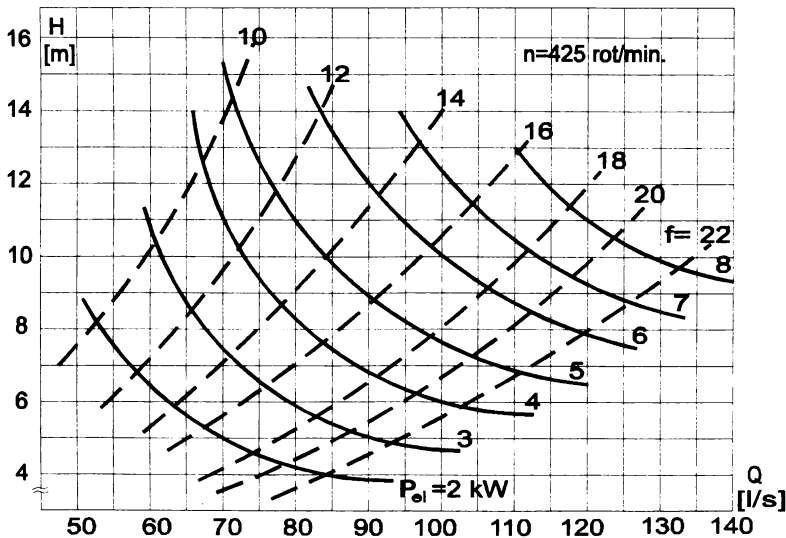


Fig. 5.2 Puterea electrică obținută cu un grup turbină Banky 0,25 - generator asincron.

5.1.2. Calculul generatorului sincron

Pomind de la datele cuprinse în lucrarea [79], s-au stabilit datele nominale ale generatorului sincron din componența microhidrocentralei: puterea aparentă $S_n=12$ kVA; tensiunea de fază nominală $V_N=220$ V; viteza de rotație sincronă $n=500$ rot./min.;

factorul de putere $\cos \varphi_n=0,8$ inductiv; randamentul $\eta=80\%$; tensiunea de excitație $U_E=257$ V. Având în vedere viteza de rotație sincronă de valoare mică, generatorul sincron este deci cu poli aparenti.

Calculul de proiectare al generatorului sincron s-a efectuat cu ajutorul calculatorului, în limbaj Pascal. Realizarea generatorului proiectat s-a făcut pomindu-se de la o tolă statorică existentă, fiind deci adoptate dimensiunile principale ale indusului. Urmărindu-se obținerea unei tensiuni de formă cât mai apropiată de sinusoidă, talpa polului inductor s-a realizat după un profil invers cosinusoidal, adică:

$$\delta_x = \frac{\delta_0}{\cos \frac{x}{\tau} \pi}, \quad (5.1)$$

unde δ_0 este întrefierul în axa polului, δ_x este întrefierul la distanța x de axa polului, iar τ este pasul polar.

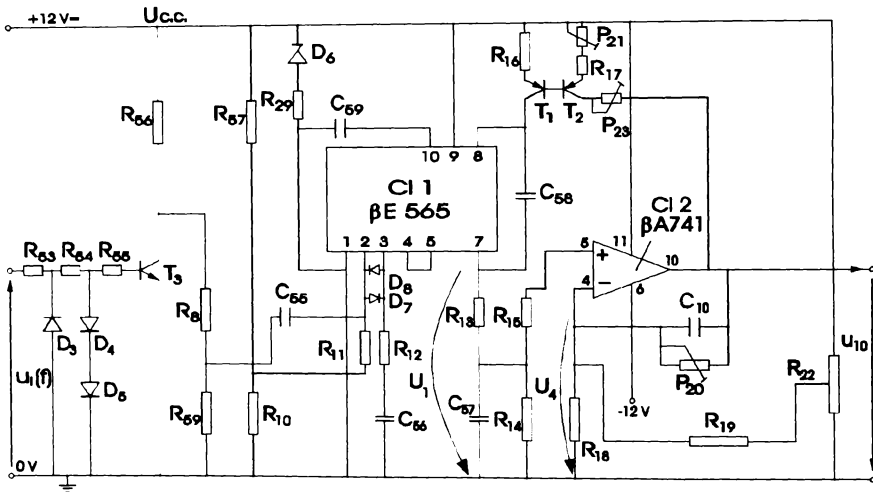


Fig. 5. 3 Converter frecvență - tensiune cu frecvența de oscilație liberă de 50 Hz.

În urma calculelor, rezultă următorii parametri ai generatorului sincron trifazat: căderea de tensiune $\Delta u=20\%$; curentul de excitație $I_E=4,45$ A; curentul de fază $I=19,73$ A; rezistența înfășurării de excitație $R_E=59,3 \Omega$; randamentul $\eta=0,821$; re-actanța sincronă longitudinală $X_d=11,87 \Omega$ ($x_d=1,064$ u.r.); reactanța sincronă transversală $X_q=6,28 \Omega$ ($x_q=0,563$ u.r.); reactanța de reacție longitudinală $X_{ad}=10,035 \Omega$ ($x_{ad}=0,9$ u.r.); reactanța de reacție transversală $X_{aq}=4,445 \Omega$ ($x_{aq}=0,399$ u.r.); reactanța sincronă longitudinală tranzitorie $X'_d=11,774 \Omega$ ($x'_d=1,056$ u.r.); reactanța homopolară $X_0=2,06 \Omega$ ($x_0=0,185$ u.r.); reactanța de dispersie a fazei statorice $X_\sigma=1,835 \Omega$ ($x_\sigma=0,165$); rezistența fazei statorice $R=0,7 \Omega$. Generatorul nu are înfășurare de amortizare.

5.1.3. Calculul convertorului frecvență - tensiune

Din multitudinea de scheme posibile de conversie frecvență - tensiune, am realizat practic convertorul din figura 5.3, pomind de la o schemă propusă în lucrarea [96].

Față de schema amintită, în urma calculului de proiectare și a verificărilor practi-

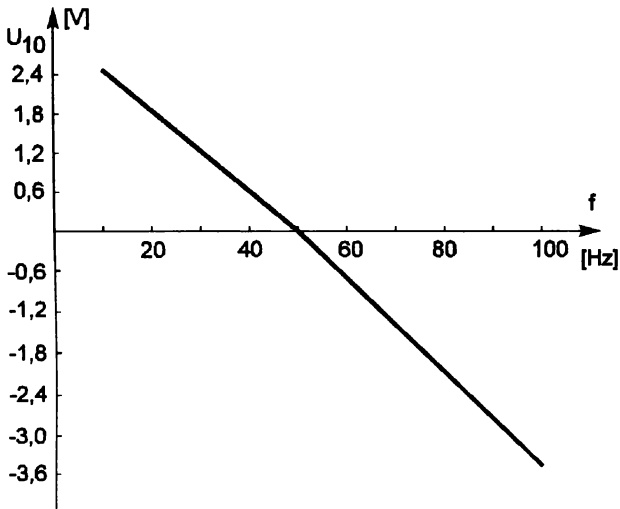


Fig. 5.4 Caracteristica f-U a convertorului frecvență - tensiune din figura 5.3.

având frecvența în jurul valorii de 50 Hz, iar la ieșire se obține o tensiune continuă a cărei valoare depinde liniar de frecvența de intrare - figura 5.4.

Dacă semnalul de la ieșirea convertorului frecvență - tensiune se aplică unui amplificator inversor (figura 5.5), rezultă o caracteristică frecvență - tensiune a ansamblului ca în figura 5.6.

Pentru păstrarea frecvenței f a tensiunii de fază a generatorului sincron între anumite limite impuse ($f=50 \text{ Hz} \pm \Delta f/2$), rezultă o variație a tensiunii de ieșire a amplificatorului cu C_{I3} de valoare ΔU , determinabilă din figura 5.6.

Din figura 5.6 se constată că plaja de frecvențe a convertorului f-U cu amplificator atașat este într-adevăr mult mai mare decât plaja de lucru necesară. Valoarea tensiunii de ieșire (U_o din figura 5.5) poate fi modificată prin schimbarea valorii potențiometrului R_{26} .

Contribuția personală la realizarea convertorului f-U constă în aceea că l-am proiectat pentru o frecvență de oscilație liberă de 50 Hz, deși circuitul $\beta E 565$ este

ce, am făcut modificările necesare pentru a aduce frecvența de oscilație liberă în jurul valorii de 50 Hz și a asigura o bandă de frecvență de lucru mult mai mare decât cea necesară (15-90 Hz). În stabilirea frecvenței de oscilație liberă esențiale sunt valoarea capacității condensatorului C_{59} (1,5 μF) și valoarea rezistenței rezistorului R_{16} (1,8 $\text{k}\Omega$), valori ce asigură un curent pe ramura tranzistorului T_1 - pinul 8 al C_{I1} cuprins între limitele 1,18 și 1,425 mA.

La intrarea convertorului de frecvență din figura 5.3 se aplică tensiunea fazei statorice ($U_{\approx 220 \text{ V}}$),

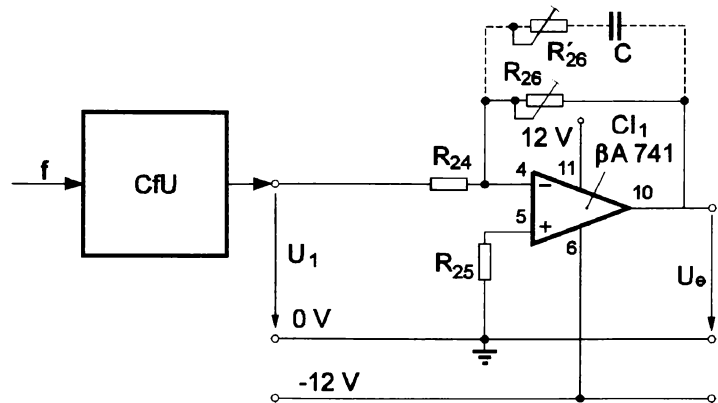


Fig. 5.5 Amplificator inversor atașat convertorului frecvență - tensiune.

recomandat pentru o frecvență de oscilație liberă de peste 10 kHz. În acționările electrice există convertoare frecvență - tensiune cu frecvența de oscilație liberă în jurul valorii de 50 Hz, dar proiectate și realizate după alte principii.

5.1.4. *Calculul elementului de prescriere al frecvenței și al elementului de comparație*

Convertoorul frecvență - tensiune propriu-zis, având ca element de bază Cl₃ - βE 565 - furnizează la pinul 7 o tensiune U₁ proporțională cu frecvența semnalului aplicat la pinul 2.

Deci:

$$U_1 = k \cdot f, \quad (5.2)$$

k fiind o constantă determinabilă prin calcul sau experimental - [k]= =V/Hz.

Această tensiune trebuie comparată cu o altă tensiune - U₀ - dependentă de frecvența ce se dorește a fi păstrată constantă (f₀=50 Hz). Această tensiune este furnizată de un element de prescriere care poate fi un potențiometru (R₂₂ din figura 5.3):

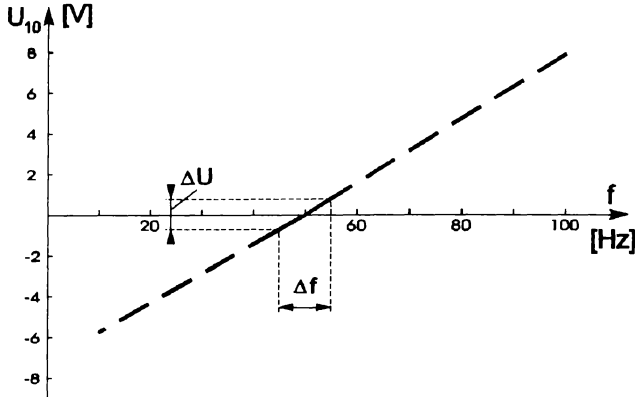


Fig. 5. 6 Caracteristica f-U a convertourii frecvență - tensiune cu amplificator atașat.

$$U_0 = \frac{U_{ce}}{R_{22}} p_1 \cdot R_{22} = p_1 U_{ce}, \quad (5.3)$$

p₁ fiind dependent de poziția cursorului potențiometrului (p₁ este 0 când cursorul este la limita inferioară în figura 5.3).

Elementul de comparație a celor două tensiuni este un amplificator diferențial, care în figura 5.3 este Cl₁, de tipul βA 741.

Tensiunea la ieșirea sa (pinul 10) U₁₀ este determinată de tensiunile la intrare (pinii 4 și 5), conform relației:

$$U_{10} = A(U_5 - U_4), \quad (5.4)$$

A fiind amplificarea circuitului Cl₂, care are reacție negativă prin elementele R₂₀ și C₂₀ (circuit PI).

Dar

$$U_5 \cong \frac{R_{14}}{R_{13} + R_{14}} U_1, \quad (5.5)$$

iar

$$U_4 \cong \frac{p_1 R_{18}}{(1 - p_1) R_{22} + R_{18}} U_{cc}, \quad (5.6)$$

U_{cc} fiind tensiunea de alimentare (U_{cc}=12 V).

Deci tensiunea la ieșirea circuitului integrat βA 741 (Cl₃) este:

$$U_{10} = A \left[\frac{R_{14}}{R_{13} + R_{14}} U_1 - \frac{p_1 \cdot R_{18}}{(1 - p_1) R_{22} + R_{18}} U_{cc} \right] \quad (5.7)$$

Pentru o anumită valoare a tensiunii U_1 (dependentă de frecvența tensiunii generatorului sincron) valoarea tensiunii U_{10} este nulă. Punând condiția ca acest lucru să se întâmple la $f=50$ Hz, rezultă valoarea lui p_1 , deci poziția cursorului potențiometrului R_{22} :

$$p_1 = \frac{R_{18}(R_{22} + R_{14})U_1}{R_{22} \cdot R_{14} \cdot U_1 + (R_{13} + R_{14})R_{18} \cdot U_{cc}} \quad (5.8)$$

Această relație permite deci fixarea cursorului elementului de prescriere al frecvenței astfel încât - frecvența tensiunii generatorului sincron fiind de 50 Hz - tensiunea la ieșirea comparatorului realizat cu circuitul integrat Cl_3 (de tipul $\beta A 741$) să fie nulă.

5.1.5. Dimensionarea blocului de rele

Amplificatorul operațional realizat cu Cl_3 de tip $\beta A 741$ (figura 5.5) prezintă la ieșire tensiunea U_o proporțională cu abaterea de frecvență față de 50 Hz. Deci, când

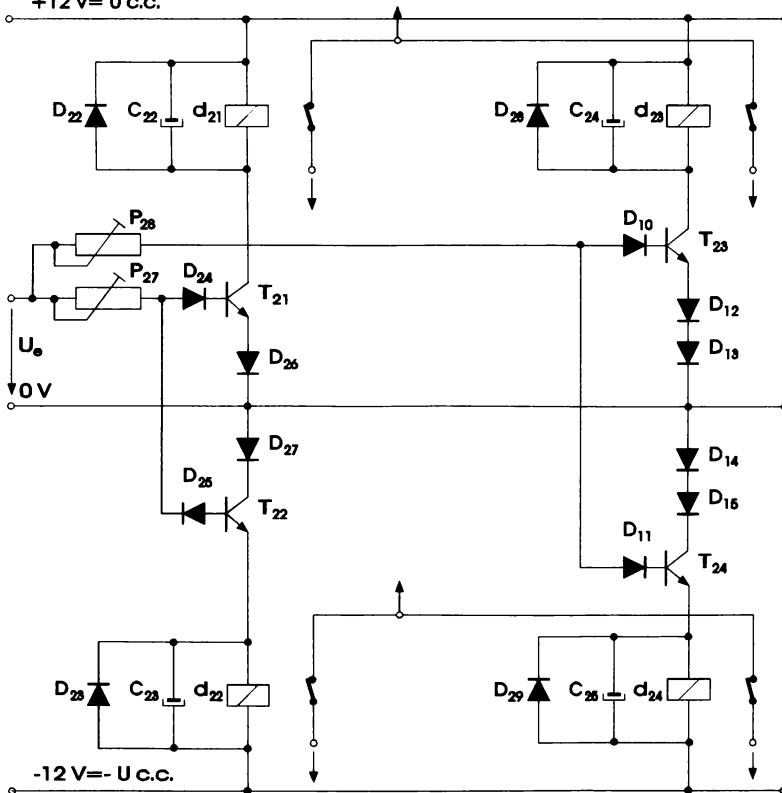


Fig. 5. 7 Blocul de rele pentru alimentarea motorului de curent continuu cu două viteze de rotație.

$f=50$ Hz, tensiunea U_o este nulă.

Prin intermediul potențometrului R_{26} se modifică amplificarea circuitului, și deci și coeficientul k_c din relația (4.22).

Semnalul de la ieșirea amplificatorului operațional CI_3 se aplică unui element logic, numit „bloc de rele”. Acesta, în funcție de mărimea tensiunii U_o , permite alimentarea motorului de curent continuu - care acționează vana turbinei - pentru un sens de rotație sau altul, corespunzător uneia din cele două viteze de rotație (amintite în § 4.1.5).

La proiectarea și realizarea blocului de rele s-a plecat de la cerințele prezentate deasemenea în § 4.1.5.

Blocul de rele este prezentat în figura 5.7.

Releele electromagnetice [104] $d_{21}÷d_{24}$ au fost alese ținând cont de tensiunea de alimentare (12 V c.c.) și curentul nominal al motorului de curent continuu cu două viteze de rotație, care este de 4 A [93]. S-au selecționat rele de tip RM-1, varianta DB, cu următorii parametri: tensiunea de funcționare $u=7,4÷20$ V, curent de acționare $i_a=30,5$ mA, curent de menținere $i_m=14,6$ mA, curent de eliberare $i_r=4,1$ mA.

Alegerea tranzistoarelor $T_{21}÷T_{24}$ s-a făcut avându-se în vedere curenții prin bobinele releelor electromagnetice mai sus prezentate. Din lucrarea [32] s-au ales tranzistoare BD 139 (de tip PNP) și BD 140 (de tip NPN), cu următorii parametri: $V_{CE0}=80$ V, $V_{EB0}=5$ V, $I_c=1$ A, $V_{CEsat}=0,6$ V.

5.1.6. Alegerea motorului de curent continuu cu două viteze de rotație având reductor cu angrenaj melcat incorporat

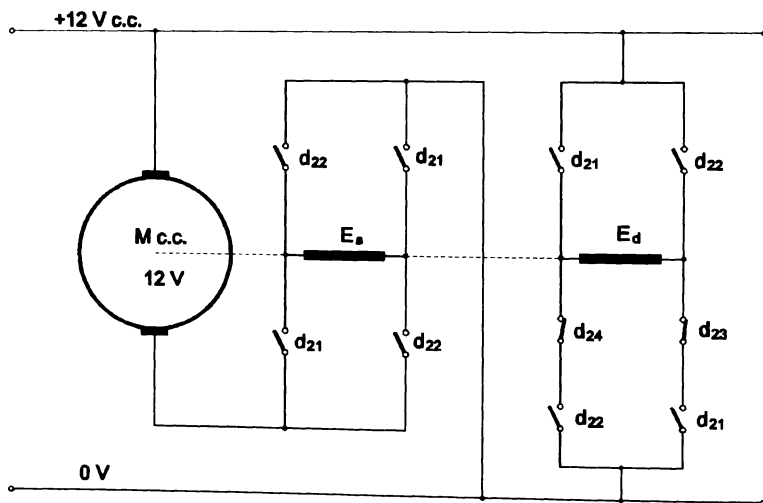


Fig. 5. 8 Motor de curent continuu cu excitație mixtă, cu două viteze de rotație.

Schema motorului de curent continuu ce acționează prin intermediul unui angrenaj melcat vana turbinei hidraulice este prezentat în figura 5.8. Acesta are două înfășurări de excitație: E_s este înfășurarea serie, iar E_d înfășurarea paralel.

Conectând simultan ambele înfășurări de excitație E_s și E_d , se obține viteza de rotație mică a motorului. Viteza de rotație mare se obține dacă se conectează înfășurarea derivație E_d . Motorul electric mai are o înfășurare de frânare, ce intervine numai în momentul deconectării motorului, contribuind la oprirea rapidă a acestuia [93].

Electromotorul ales este de tip ME-241 A, cu următoarele date nominale: tensiunea nominală $U=12$ V; curentul absorbit la viteză de rotație mică $I_1=2,5$ A; curentul absorbit la viteză de rotație mare $I_2=4$ A; vitezele nominale de rotație sunt: $n_1=680$ rot./min., respectiv $n_2=2.040$ rot./min. Caracteristicile mecanice corespunzătoare celor două situații au alura din figura 5.9, după cum rezultă din relațiile (4.26) și (4.27).

Electromotorul ales este prevăzut cu un reductor melcat ce realizează un raport de transmisie $i_T=34$ [93].

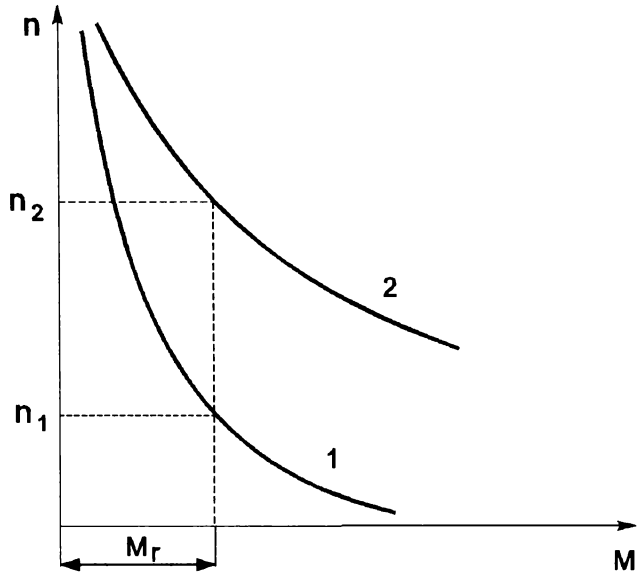


Fig. 5. 9 Caracteristicile motorului de c.c., corespunzătoare excitației mixte (1) și excitației serie (2).

5.2. Alegerea și calculul elementelor componente ale buclei de reglare a tensiunii

5.2.1. Dimensionarea elementului de prescriere a tensiunii, a elementului comparator, amplificator și regulator

În § 4.2.1 au fost prezentate criteriile de dimensionare a elementului de prescriere a tensiunii. În figura 5.10 este reprezentată schema ce realizează funcțiile amintite: de prescriere, de comparație, de amplificare de eroare.

Schema elementului de prescriere - care este de fapt un stabilizator de tensiune - este dată în figura 5.11. În această figură U este tensiunea continuă ce se obține cu ajutorul

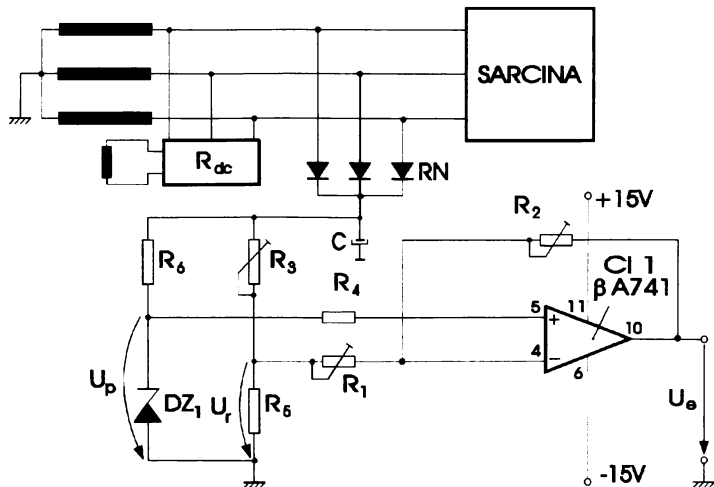


Fig. 5. 10 Elemente de prescriere, de comparare și amplificatorul de eroare.

redresorului RN (conform relației 4.31); U_p este tensiunea de prescriere (pe care am considerat-o 7,5 V); R_6 este rezistența de balast; R_s este rezistența de sarcină (rezistența de intrare a CI_1 , înseriată cu R_4 - figura 5.10), care se poate considera infinită în calculele următoare ($R_s=2 \text{ M}\Omega$, [96]).

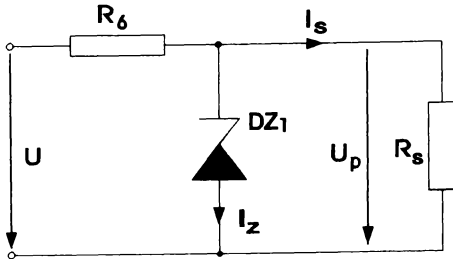


Fig. 5. 11 Schema elementului de prescriere cu stabilizator.

Variațiile admise ale tensiunii la bornele generatorului sunt determinate de cerințele impuse unor consumatori, referitor la tensiunea de alimentare. De exemplu, pentru un aparat TV se impune ca tensiunea de alimentare să fie de 220 V (+10%, -20%).

Se consideră, de aceea, că tensiunea la borne trebuie să se încadreze în

limitele $220 \text{ V} \pm 10\%$, adică $U \in [198, 242] \text{ V}$.

Se alege dioda semiconductoră stabilizatoare DZ 7V5, cu datele: $V_{zT} = 7,5 \text{ V}$, $I_{z\text{min}} = 1 \text{ mA}$, $I_{zT} = 5 \text{ mA}$, $r_z = 7 \Omega$, $I_{zM} = 53 \text{ mA}$.

Cu acestea se calculează:

$$R_6 = \frac{U_{1\text{min}} - V_z}{I_{z\text{min}} + I_{s\text{max}}} = \frac{198 - 7,5}{1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3}} = 191,5 \text{ k}\Omega \quad (5.9)$$

Se alege $R_6 = 180 \text{ k}\Omega$.

$$I_{z\text{max}} = \frac{U_{1\text{max}} - V_z}{R_6} = \frac{242 - 7,5}{180 \cdot 10^3} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ A} \quad (5.10)$$

Se constată că $I_{z\text{max}} < I_{zM}$. Având însă în vedere că valoarea $V_{zT} = 7,5 \text{ V}$ se realizează pentru un curent $I_{zT} = 5 \text{ mA}$, revin asupra valorii rezistenței R_6 , considerând în continuare $R_6 = 47 \text{ k}\Omega$, ceea ce asigură o variație a curentului prin dioda Zener între limitele 3,83 și 5 mA.

Coeficientul de stabilizare este:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta U_p} = 1 + \frac{R_6}{R_z} = 1 + \frac{47.000}{7} \cong 6.714 \quad (5.11)$$

Aceasta înseamnă că variației $\Delta U = U_{\text{max}} - U_{\text{min}} = 44 \text{ V}$ îi corespunde o variație a tensiunii de prescriere

$$\Delta U_p = \frac{\Delta U}{S} = \frac{44}{6.714} \cong 6,55 \cdot 10^{-3} \text{ V} \quad (5.12)$$

Variația tensiunii U_p este deci neglijabilă, și stabilizatorul prezentat poate fi considerat un element de prescriere corespunzător.

Observație: am efectuat și prezentat acest calcul pentru a demonstra că - deși tensiunea furnizată de redresorul necomandat RN (din figura 5.10) este variabilă - tensiunea la bornele diodei Zener în schema prezentată este constantă.

Deși compararea și amplificarea sunt funcții distincte ale buclei de reglare a tensiunii, ele s-au realizat cu același circuit integrat CI_1 , de tipul $\beta A 741$ (figura 5.10). Acest circuit, lucrând ca amplificator diferențial, realizează compararea tensiunii prescrise ($U_p = 7,5 \text{ V}$) cu o fracțiune din tensiunea curentă U_r , prin aplicarea celor două tensiuni la intrările neinversoare, respectiv inversoare ale sale [84]. Tensiunea U , este proporțională cu tensiunea curentă la bornele generatorului sincron.

Divizorul potențiomtric format din potențiometrul R_3 și rezistorul R_5 este calculat astfel încât, dacă tensiunea furnizată de redresorul necomandat R_N (figura 5.10) este 257 V, atunci $U_r=7,5$ V, și eroarea între tensiunea prescrisă U_p și tensiunea U , este nulă.

Tensiunea U_e la ieșirea amplificatorului este dependentă de cele două tensiuni U_p și U_r , conform relației următoare [90]:

$$U_e = U_r \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{r_z}{r_z + R_4} \right) - U_p \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (5.13)$$

Prin calculul rezistențelor R_1 , R_2 și R_4 s-a impus condiția

$$\frac{R_1 - r_z}{R_2} = R_4 \quad (5.14)$$

situație în care

$$U_e = (U_r - U_p) \frac{R_2}{R_1} \quad (5.15)$$

raportul R_2/R_1 constituind amplificarea circuitului.

Regulatorul realizat cu CI_1 este - după cum se constată și din figura 5.10 - de tipul proporțional.

5.2.2. Adaptarea dispozitivului de comandă pe grilă

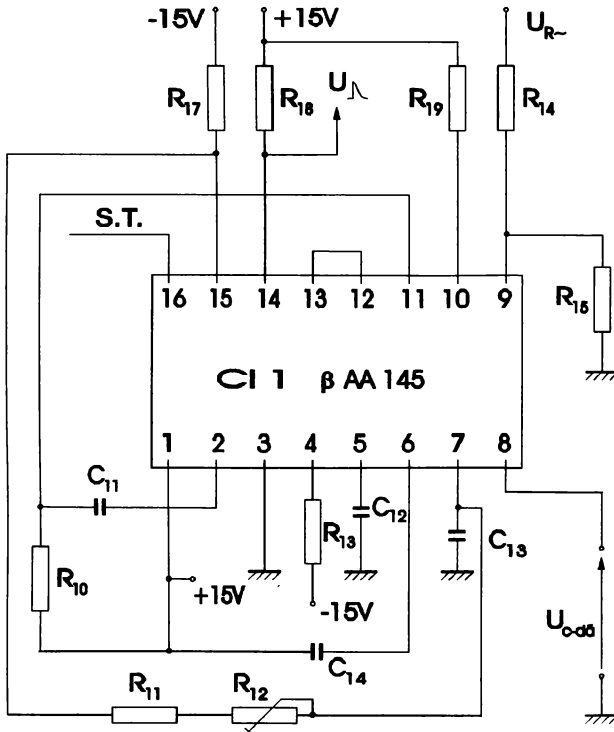


Fig. 5. 12 Formatorul de impulsuri pentru comanda unui tiristor.

Tensiunea de ieșire U_e din amplificator și regulatorul prezentat în figura 5.10 se aplică unui dispozitiv formator de impulsuri, realizat cu circuite integrate specializate $\beta AA 145$ [55]. Schemele fiind identice pentru cele trei faze, se prezintă în continuare schema corespunzătoare unei singure faze (R), în figura 5.12.

La pinul 8 al circuitului integrat CI_1 se aplică tensiunea de comandă U_{cda} , care este aceeași cu tensiunea de ieșire a amplificatorului prezentat în figura 5.10.

La pinul 9 se aduce o fracțiune din tensiunea fazei pe care este montat tiristorul ce trebuie comandat (R în figura 5.12).

La pinul 14 apare impulsul de comandă al tiristorului.

Dependența unghiurilor de comandă α (respectiv a unghiului de conducție φ) de tensiunea de comandă este prezentată în tabelul 5.2 [96]. Datele cuprinse în acest tabel sunt folosite la stabilirea tensiunii de comandă (3,25 V) pentru care, la funcționarea stabilă a generatorului sincron, tensiunea de fază este 220 V.

Tabelul 5.2

Valorile unghiurilor de comandă și de conducție

U_{c-com}	[V]	8,50	6,25	4,50	3,25	2,00	0,80
α	[°]	0	30	60	90	120	150
φ	[°]	180	150	120	90	60	30

Impulsul furnizat de formatorul de impulsuri prezentat în figura 5.12 este amplificat de circuitul amplificator prezentat în figura 5.13, circuit utilizat pe scară largă în realizarea convertoarelor de tensiune [55].

5.2.3. Dimensionarea elementului de execuție din bucla de reglare a tensiunii

Schema elementului de execuție din bucla de reglare a tensiunii este prezentată în figurile 3.4 și 4.7. Elementul de execuție este în esență un redresor trifazat în punte semicomandat, a cărui dimensionare nu ridică probleme. Alegerea diodelor și

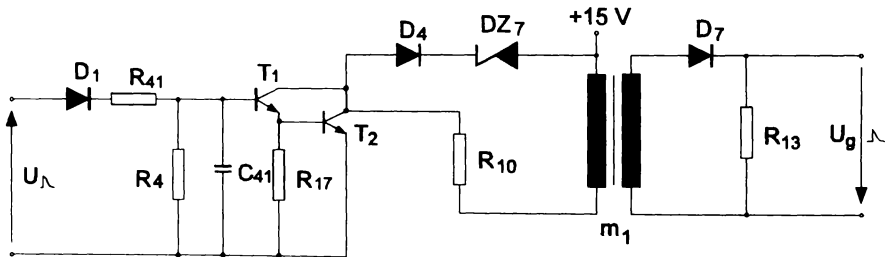


Fig. 5. 13 Circuitul amplificator al impulsului de comandă al tiristorului.

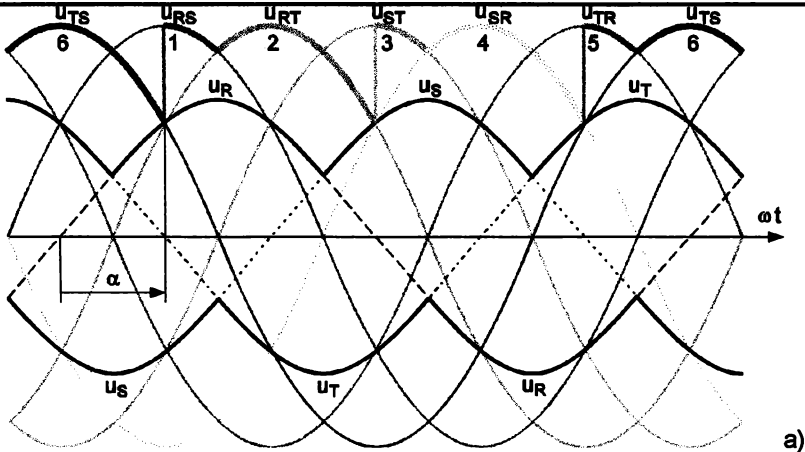
tiristoarelor s-a făcut pomindu-se de la valoarea curentului de excitație al generatorului sincron utilizat la realizarea prototipului de microhidrocentrală, și anume I_E . Valoarea curentului efectiv ce încarcă o fază a generatorului sincron pentru a fi asigurat curentul de excitație este [35]:

$$I = I_E \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 3,63A. \tag{5.16}$$

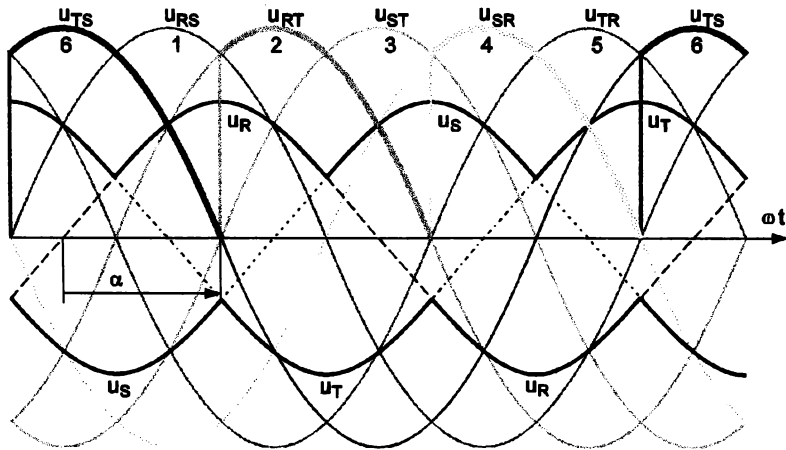
Aceasta este și valoarea curentului efectiv prin elementele redresorului trifazat în punte.

Având în vedere și supratensiunile de comutație ce pot apărea pe elementul redresor (de 2-5 ori tensiunea nominală [27]), s-au ales următoarele componente:

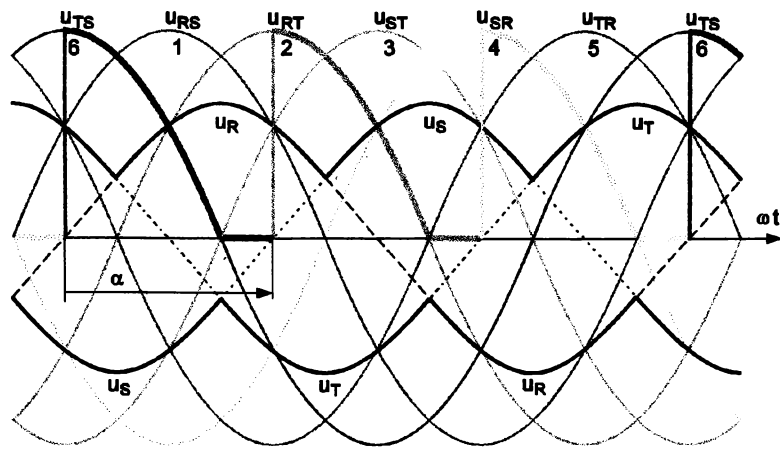
- diode redresoare de tipul D 10 N 16, cu următorii parametri caracteristici: curent direct de sarcină maxim $I_{FRMSM}=16$ A; curent continuu direct $I_{FAVM}=10$ A; tensiunea inversă de vârf repetitivă $V_{RRM}=1.600$ V; curent direct de vârf repetitiv $I_{FRM}=90$ A; curent direct de vârf de suprasarcină accidentală $I_{FSM}=210$ A (10 ms); tensiunea continuă directă $V_f=1,4$ V; curentul invers mediu $I_R=3$ mA;



a)



b)



c)

Fig. 5. 14 Explicativă la redresorul semicomandat: a) unghiul de comandă $\alpha=60^\circ$; b) $\alpha=90^\circ$; c) $\alpha=120^\circ$.

- tiristoare de tipul T 22 N 16, cu următorii parametrii caracteristici: curent continuu direct în stare de conducție $I_{TAVM}=22$ A; curent direct de vârf repetitiv în stare de conducție $I_{TRM}=190$ A; curent direct de vârf de suprasarcină accidentală în stare de conducție $I_{TSM}=250$ A (10 ms); tensiune de comandă pe grilă $V_{GT}=3$ V; curent de comandă pe grilă $I_{GT}=100$ mA; viteză critică de creștere a tensiunii în stare de blocare $dV/dt=50$ V/ μ s; viteza critică de creștere a curentului în stare de conducție $di/dt=20$ A/ μ s.

Protecția tiristoarelor și diodelor la supratensiuni este realizată cu circuite RC serie, conectate în paralel cu elementele protejate (circuitele RC nu au fost reprezentate în schemă, pentru a nu o complica). Valorile rezistențelor și condensatoarelor s-au determinat în concordanță cu datele din literatură [60].

Având în vedere că sarcina redresorului este puternic inductivă, s-a utilizat suplimentar dioda de nul. Dimensionarea acesteia s-a făcut în concordanță cu relația următoare [80]:

$$I_D = m \frac{\alpha - \alpha_{lim}}{2 \cdot \pi} I_E = 6 \frac{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{6}}{2 \cdot \pi} 4,45 = 8,9 \text{ A.} \quad (5.17)$$

Deși valoarea rezultată este acoperitoare (în literatură [79] se precizează că solicitarea maximă a diodei de nul, în cazul cel mai defavorabil, este 26% din solicitarea maximă a tiristoarelor redresorului), pentru mai multă siguranță s-a ales o diodă de nul de tipul D 16 N 16, cu următorii parametrii caracteristici: curent direct de sarcină maxim $I_{FRSM}=26$ A; curent continuu direct $I_{FAVM}=16$ A; tensiunea inversă de vârf repetitivă $V_{RRM}=1.600$ V; curent direct de vârf repetitiv $I_{FRM}=155$ A; curent direct de vârf de suprasarcină accidentală $I_{FSM}=250$ A (10 ms); tensiunea continuă directă $V_F=1,4$ V; curentul invers mediu $I_R=3$ mA.

În figura 4.7 am prezentat schema unui redresor în punte cu comportare mixtă, adică comportare de redresor necomandat - în lipsa impulsurilor de comandă pe grilele tiristoarelor - și comportare de redresor comandat - în prezența acestora. Pentru a realiza această comportare, am dimensionat circuitele de asigurare a unui curent de grilă, circuite aflate în funcțiune atât timp cât contactele releului d sunt închise.

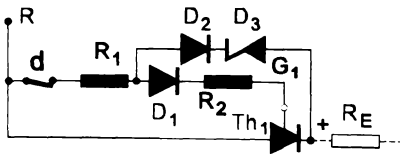


Fig. 5. 15 Circuit de comandă pe grilă al tiristorului cu comportament de diodă.

Pentru calculul elementelor circuitului de comandă pe grilă al tiristoarelor, când redresorul trifazat în punte are comportament de redresor necomandat (figura 5. 15), vom avea la constatarea (vezi figura 5. 14) că tensiunea minimă (valoare momentană) ce poate apărea între anodul și catodul tiristorului - când acesta ar trebui să treacă în conducție, ca diodă - este:

$$U_{ab} = U_{ab} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \frac{\pi}{3} = 463,5V. \quad (5.18)$$

Cunoscând curentul minim de poartă al tiristorului ($I_{GT}=0,1$ A), se poate scrie relația:

$$R_{1max} + R_2 + R_E = \frac{U_{ab}}{I_{GT}} = 4.635 \Omega \quad (5.19)$$

Deci:

$$R_{1max} + R_2 = 4.635 \Omega - R_E \cong 4.575 \Omega \quad (5.20)$$

Cunoscând că tensiunea de amorsare a tiristorului $U_{GT}=3$ V și având în vedere căderea de tensiune pe dioda D_2 , în conducție (figura 5.15), se alege dioda Zenner D_3 , de tipul PL 3V9 Z, cu următoarele date: $V_{ZTm}=3,7$ V, $V_{ZTnom}=3,9$ V, $V_{ZTmax}=4,1$ V, $I_{ZT}=100$ mA, $I_{ZTmin}=1$ mA, $I_{ZTmax}=240$ mA.

Din condiția ca ramura stabilizatoare de tensiune să funcționeze la curentul minim al diodei Zenner rezultă relația:

$$R_{1max} = \frac{U_{GT}}{I_{ZTmin.}} = \frac{3}{0,001} = 3.000\Omega \quad (5.21)$$

Valoarea minimă a rezistenței R_1 este:

$$R_{1min.} = \frac{U_{ab}}{I_{ZTmax.}} = \frac{463,5}{0,24} \cong 1901\Omega \quad (5.22)$$

Comparând rezultatele din relațiile (5.20), (5.21) și (5.22), se alege pentru rezistorul R_1 valoarea:

$$R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega \quad (5.23)$$

Curentul maxim prin această rezistor este:

$$I_{R_1, max.} = \frac{U_{ab}}{R_1} = \frac{463,5}{2.200} \cong 0,21\text{A}. \quad (5.24)$$

Puterea disipată pe rezistor este:

$$P_{R_1} = R_1 \cdot I_{R_1, max.}^2 \quad (5.25)$$

Cunoscând că durata maximă a impulsului de comandă este de 100 μ s [56], se alege [32] un rezistor BGF 6.100 de valoare 2,2 k Ω și 1 W.

Rezistorul R_2 se calculează cu relația:

$$R_{1min.} \leq \frac{U_{ZTmin.}}{I_{GT}} = 37\Omega \quad (5.26)$$

Se alege valoarea:

$$R_2 = 33 \Omega \quad (5.27)$$

Calculând curentul și puterea disipată, rezultă

$$P_{R2} = R_2 \cdot I^2 \cdot R_{2max} \cong 0,5 \text{ W}. \quad (5.28)$$

Se alege rezistorul RCG 1.100, cu valoarea de 33 Ω .

Diodele D_1 și D_2 se aleg în funcție de curentul maxim direct (0,124 A, respectiv 0,240 A) și tensiunea inversă maximă. Dioda de tip 1N4.001 are parametri acoperitori.

□

Capitolul 6

FUNCȚIILE DE TRANSFER ALE ELEMENTELOR COMPONENTE ȘI ALE BUCLELOR DE REGLARE A FRECVENȚEI ȘI A TENSIUNII

În figura 3.5 am prezentat schema bloc a microhidrocentralei echipate cu generator sincron autoexcitat, având două bucle de reglare automată: bucla de reglare a turației (a frecvenței tensiunii la borne) și bucla de reglare a valorii tensiunii la borne. Elementele componente, indiferent de tipul lor constructiv, sunt luate în considerare prin funcțiile lor în sistemul automat și prin relațiile ce leagă mărimile de ieșire de mărimile de

intrare. Deoarece mărimea de ieșire (tensiunea) este caracterizată prin doi parametri reglați (frecvența, respectiv valoarea efectivă), iar cele două bucle de reglare acționează asupra a două elemente distincte ale ansamblului (debitul de apă turbinat, respectiv excitația generatorului sincron), cele două bucle de reglare acționează independent.

6.1. Funcțiile de transfer ale elementelor componente din bucla de reglare a frecvenței

În figura 6.1 este redată schema bloc a buclei de reglare a frecvenței.

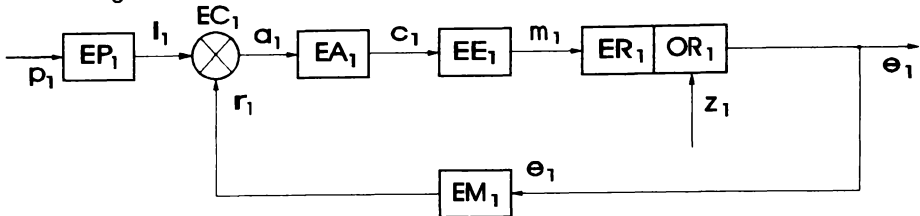


Fig. 6. 1 Schema bloc a buclei de reglare a frecvenței: p_1 - mărime prescrisă (mărime de intrare); EP_1 - elementul de prescriere a frecvenței (potențiometrul R_{22} din figura 5.3); I_1 - mărime de intrare în sistemul automat (tensiunea U_4 din relația 5.6); r_1 - mărimea de reacție (tensiunea U_1 din relația 5.2); EC_1 - elementul de comparare (CI_2 din figura 5.3); a_1 - abaterea obținută la ieșirea elementului comparator (U_{10} din figura 5.3); EA_1 - elementul de amplificare de tip P sau PI (figura 5.5); c_1 - mărime de comandă (U_6 din figura 5.5); EE_1 - elementul de execuție (motorul de curent continuu (7) din figura 3.5); m_1 - mărimea de execuție aplicată obiectului reglat (unghiul de rotație); ER_1 - elementul de reglare (vană turbinei hidraulice); OR_1 - organ reglat (turbina hidraulică); EM_1 - element de măsurare (convertorul frecvență - tensiune); z_1 - perturbația OR_1 ; e_1 - mărimea de ieșire (turația, sau la altă scară, frecvența).

Comportarea dinamică a unui sistem de automatizare poate fi cunoscută dacă se cunosc proprietățile dinamice ale acestuia, exprimate prin una din următoarele forme: - ecuația diferențială; - ecuația operațională; - funcția de transfer; - caracteristicile de frecvență. În cadrul acestui subcapitol se scriu funcțiile de transfer ale elementelor componente din bucla de reglare a frecvenței, în scopul stabilirii funcției de transfer a buclei închise.

6.1.1. Funcția de transfer a elementului de prescriere

Elementul de prescriere stabilește o legătură liniară între mărimea p_1 (considerată mărime de intrare) și mărimea i_1 (considerată mărime de ieșire pentru acest element).

În procesul reglării și acordării elementelor buclei de reglare a frecvenței tensiunii furnizate de generatorul sincron, cursorul potențiometrului R_{22} se fixează într-o poziție corespunzătoare frecvenței de 50 Hz, rămânând apoi nemodificat. Comportarea elementului de prescriere poate fi urmărită pornind de la relația 5.6 și aplicând un semnal treaptă prin intermediul tensiunii U_{cc} . Pentru tensiunea U_4 va rezulta o variație treaptă, având în vedere că factorul

$$k_{p_1} = \frac{p_1 \cdot R_{18}}{(1 - p_1)R_{22} + R_{18}} \quad (6.1)$$

este constant.

Deci funcția de transfer a elementelor de prescriere este [41]:

$$Y_p(s) = k_{p1} = \frac{p_1 \cdot R_{18}}{(1-p_1)R_{22} + R_{18}} \quad (6.2)$$

Elementul de prescriere fiind de tipul proporțional, este considerat fără inerție.

Prin adăugarea a două rezistoare de valoare individuală $0,1 \cdot R_{22}$ (pentru protecție), p_1 (mărime adimensională) va lua valori între 0,1 și 0,9. Utilizând relația (6.1), rezultă că factorul k_{p1} va lua valori între 0,05 și 0,81.

6.1.2. Funcția de transfer a elementului comparator

Deoarece compararea mărimilor i_1 și r_1 se face prin aplicarea lor pe intrările circuitului integrat Cl_2 din figura 5.3, are loc și o amplificare a erorii. Circuitul este prevăzut cu o reacție negativă formată din potențiometrul R_{20} și condensatorul C_{10} - un element PI cu filtrare [17]. La o analiză mai riguroasă, elementul EC_1 poate fi considerat un element proporțional cu întârziere de ordinul 1 (PT_1), având în vedere relația (6.3) [41]. În sistem deschis, funcția de transfer a acestui element este

$$Y_{c1}(s) = \frac{R_{20}}{T_{ic} \cdot s + 1} = \frac{k_{c1}}{T_{ic} \cdot s + 1} \quad (6.3)$$

unde

$$R_{e1} = \frac{R_{18}[R_{19} + R_{22} \cdot p_1(1-p_1)]}{R_{18} + R_{19} + R_{22} \cdot p_1(1-p_1)} \quad (6.4)$$

și

$$T_{ic} = R_{20} \cdot C_{10}, \quad (6.5)$$

relație în care T_{ic} este constanta de timp introdusă de reacția amplificatorului realizat cu circuitul Cl_2 . Cu valorile adoptate pentru rezistoarele din relația (6.4) și pentru valori ale lui p_1 între 0,1 și 0,9, rezultă valori ale rezistorului R_{e1} între 1.510 și 1.820 Ω . Cum valoarea rezistorului R_{20} este reglabilă între 1 și 50 k Ω , iar $C_{10} = 10$ nF, rezultă pentru constantele din relațiile (6.3) și (6.5) valorile $T_{icmax} = 0,52$ ms și $k_{c1} \in (1,27)$.

6.1.3. Funcția de transfer a elementului amplificator

Elementul amplificator (regulatorul) este de tip P, având schema indicată în figura 5.5.

Funcția sa de transfer este [17]:

$$Y_{A1}(s) = \frac{R_{26}}{R_{24}} = k_{A1} \quad (6.6)$$

Cu valorile adoptate pentru rezistoarele din relația (6.6), rezultă că factorul $k_{A1} \in (1,5)$.

În cazul în care s-ar folosi un condensator C_{30} , în serie cu rezistența R_{26} , pentru a micșora eroarea staționară, funcția de transfer a regulatorului - ce ar fi de tipul PI - ar fi următoarea:

$$Y_{A1}(s) = \frac{R_{26}}{R_{24}} \left(1 + \frac{1}{T_{ir} \cdot s} \right) = k_{A1} \left(1 + \frac{1}{s \cdot T_{ir}} \right), \quad (6.7)$$

unde $T_{ir} = C_{30} \cdot R_{26}$ ar fi constanta de timp corespunzătoare. Dacă $C_{30} = 10$ nF, $T_{ir} = 0,5$ ms. Utilizarea unui regulator de tip P sau de tip PI va rezulta în urma analizării stabilității buclei de reglare în ambele variante.

6.1.4. Funcția de transfer a elementului de execuție

Elementul de execuție este un motor de curent continuu cu două viteze de rotație, fiecare dintre ele realizându-se cu o altă configurație a excitației motorului. Viteza de rotație mare se obține când motorul are conectată doar excitația serie. Viteza de rotație mică se obține când motorul are conectată atât excitația serie cât și excitația paralel.

Corespunzător celor două situații, există deci și două funcții de transfer.

Activarea motorului de c.c. se face numai când frecvența tensiunii furnizate de generatorul sincron iese din anumite benzi prescrise. Pentru generatorul sincron, lucrând conectat la sistemul energetic, frecvența trebuie menținută între limitele 49,8÷50,2 Hz, adică este permisă o abatere relativă de 4% [6]. În situația când generatorul lucrează autonom, limitele de variație ale frecvenței se stabilesc în funcție de cerințele consumatorilor. Notez cu B_1 banda de frecvențe cu limitele 47,5÷52,5 Hz și cu B_2 banda de frecvențe cu limitele 45÷55 Hz.

Dacă frecvența se află în afara limitelor benzii B_2 , motorul de c.c. este conectat pentru a lucra cu viteza de rotație mare, având deci conectată numai excitația serie.

Dacă frecvența se află în interiorul limitelor benzii B_2 , dar în afara benzii B_1 , motorul de c.c. lucrează cu viteza de rotație mică, deci având excitația mixtă. Dacă frecvența se află în interiorul benzii B_1 , motorul este deconectat, acțiunea buclei de reglare a frecvenței fiind întreruptă.

a) Ecuațiile motorului de curent continuu cu excitație serie sunt:

$$J \frac{d\Omega_1}{dt} = M_m - M_r, \quad (6.8)$$

$$u = u_e + R_1 \cdot i + L \frac{di}{dt}, \quad (6.9)$$

unde u este tensiunea ce se aplică la bornele motorului; u_e - tensiunea indusă (contraelectromotoare); R - rezistența înfășurării indusului, a înfășurării excitație serie și a contactelor perii - colector; L - inductivitatea înfășurărilor mai sus amintite; i - curentul prin indus și înfășurarea de excitație serie; J - momentul de inerție al pieselor în mișcare de rotație, raportat la arborele motorului de c.c.; M_m și M_r sunt cuplul dezvoltat de motor, respectiv cuplul rezistent creat de vana acționată prin intermediul reduc-torului melcat; $\Omega_1 = 2\pi \cdot n_1$, este viteza de rotație a motorului de curent continuu [rad/s] (n_1 este aceeași mărime, în [rot./s]).

Tensiunea indusă depinde de flux (curentul de excitație) și de viteza de rotație n_1 , ambele variabile conform relației [27]:

$$u_e = k_e \cdot n_1 \cdot \Phi(i) = k_m \cdot \Omega_1 \cdot \Phi(i), \quad (6.10)$$

unde k_e este o constantă a mașinii; $\Phi(i)$ este fluxul de excitație, dependent neliniar de curentul de excitație. În scrierea ecuației (2.13) s-a neglijat reacția indusului.

Cuplul motor este [27]:

$$M_m = k_m \cdot \Phi(i) \cdot i, \quad (6.11)$$

unde k_m este de asemenea o constantă a mașinii de curent continuu ($k_m = k_e / 2\pi$) și i este curentul prin indus.

Constanta k_m este cunoscută, fiind dată de relația:

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p_m}{a} \cdot 2 \cdot N, \quad (6.12)$$

unde p_m este numărul de poli; a este numărul perechilor de căi de înfășurări; $2N$ este numărul total de conductoare ale indusului.

Ecuțiile (6.7) și (6.8) sunt neliniare, chiar în lipsa saturației și histerezei magnetice, datorită termenilor $\Omega \Phi(i)$, respectiv $\Phi(i)$ (vezi și relațiile (6.7) și (6.12)).

Pentru deducerea funcției de transfer se realizează o liniarizare în jurul unui punct de funcționare staționară, caracterizat prin mărimile $U_0, I_0, \Phi_0, \Omega_0, M_{r0}$ [6].

Funcția de transfer a motorului cu excitație serie este dată de relația:

$$Y_{E1}(s) = \frac{\Omega_1(s)}{u(s)} = \frac{k' \cdot F}{1 + s \cdot T_m + s^2 \cdot T \cdot T_m}, \quad (6.13)$$

unde:

$$k' = \frac{2k_m \cdot \Phi_0 \cdot I_0}{R \cdot I_0 + k_m \cdot \Phi_0 \cdot \Omega_0}; \quad F = \frac{2k_m^2 \cdot \Phi_0^2 \cdot I_0}{R \cdot I_0 + k_m \cdot \Phi_0 \cdot \Omega_0}; \quad (6.14)$$

$$T = \frac{L \cdot I_0}{R \cdot I_0 + k_m \cdot \Phi_0 \cdot \Omega_0}; \quad T_m = \frac{J \cdot (R \cdot I_0 + k_m \cdot \Phi_0 \cdot \Omega_0)}{2k_m^2 \cdot \Phi_0^2 \cdot I_0}; \quad (6.15)$$

Funcția de transfer evidențiază faptul că motorul de c.c. cu excitație serie introduce frecări vâscoase, influențând pozitiv stabilitatea buclei în care lucrează [35].

b) Ecuțiile motorului cu excitație mixtă (compund) sunt [51]:

- pentru circuitul de excitație separată:

$$u_E = i_E \cdot R_E + L_E \frac{di_E}{dt} + 2p \cdot N_E \frac{d\Phi_1}{dt}, \quad (6.16)$$

unde $\Phi_1 = \Phi_S + \Phi_D$ este fluxul total produs atât de excitația serie cât și de cea separată (derivație);

- pentru circuitul indusului:

$$u = i \cdot R + L \frac{di}{dt} + u_e + 2p \cdot N_s \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (6.17)$$

Ecuția mișcării este aceeași cu cea redată de relația (6.9), iar tensiunea u_e și cuplul motor M_m sunt indicate de relațiile (6.10) și (6.11), în care intervine însă fluxul total Φ_1 .

Procedându-se și în acest caz la liniarizare în jurul unui punct de funcționare staționară, caracterizat prin mărimile $U_{E0}, I_{E0}, \Phi_{S0}, U_0, I_0, \Phi_{D0}, \Omega_0, M_{r0}, \Phi_{T0}$, se poate scrie - pentru funcția de transfer a motorului de c.c. cu excitație mixtă - următoarea relație:

$$Y_{E1}(s) = \frac{\Omega_1(s)}{U(s)} = \frac{1}{k_m \cdot \Phi_{T0}} \frac{(1 + s \cdot T_f)}{(1 + s \cdot T_f) + T_m \cdot s(1 + s \cdot T_i)(1 + s \cdot T_E)}, \quad (6.18)$$

unde:

$$T_E = \frac{L_E}{R_E}; \quad T_i = \frac{L_i}{R_i}; \quad T_{m1} = \frac{R \cdot J}{k_m^2 \cdot \Phi_{T0}^2}; \quad T_f = \frac{L_E}{R_E} \cdot \frac{\Phi_{D0} + \sigma \cdot \Phi_{S0}}{\Phi_{D0} + \Phi_{S0}}; \quad (6.19)$$

T_E fiind constanta electromagnetică de timp a circuitului de excitație derivație; T_i este constanta electromagnetică de timp a indusului și excitației serie; T_{m1} - constanta de timp electromecanică, iar σ coeficientul de dispersie al înfășurării de excitație.

Funcția de transfer dată de relația (6.18) ar putea fi utilizată ca atare dacă viteza de rotație a motorului ar fi cea care ne-ar interesa în continuare. În realitate, organul de reglare, care este vana turbinei hidraulice, modifică debitul de apă prin poziția (unghiul) ei. Deci vom considera și pentru elementul de execuție (motorul de c.c.) ca mărime de

ieșire unghiul $\theta(t)$, care este:

$$\theta_1(t) = p_m \cdot t \cdot \Omega_1(t), \quad (6.20)$$

Conform regulii de înmulțire [101],

$$\theta_1(s) = -p_m \cdot \Omega'(s). \quad (6.21)$$

Din relațiile (6.13) și (6.18) rezultă însă:

$$\Omega_1(s) = Y_E(s) \cdot u(s). \quad (6.22)$$

Deci

$$\theta_1(s) = -p_m [Y_E(s) \cdot u(s)]'. \quad (6.23)$$

Având în vedere că în schema adoptată $u(t)$ este un semnal treaptă, rezultă:

$$u(s) = \frac{U}{s}; \quad (6.24)$$

$$u'(s) = -\frac{U}{s^2} = -\frac{1}{s}u(s). \quad (6.25)$$

Cu acestea, utilizând relațiile (6.13), (6.14), (6.23), (6.24) și (6.25), pentru cele două cazuri de funcționare ale motorului de curent continuu, rezultă următoarele două funcții de transfer:

a) pentru motorul de c.c. funcționând cu excitație serie:

$$Y_{0E1}(s) = \frac{\theta_1(s)}{u(s)} = p_m F \cdot \frac{k' \cdot (1 + 2s \cdot T_{m1} + 3s^2 T \cdot T_{m1})}{s(1 + s \cdot T_{m1} + s^2 T \cdot T_{m1})^2}, \quad (6.26)$$

b) pentru motorul de c.c. funcționând cu excitație compund:

$$Y_{0E1}(s) = \frac{p_m}{k_{m-f_0}} \cdot \frac{1 + s \cdot c_1 + s^2 \cdot c_2 + s^3 \cdot c_3 + s^4 \cdot c_4}{s[(1 + s \cdot T_f) + s T_{m1}(1 + s \cdot T_i)(1 + s \cdot T_E)]^2}. \quad (6.27)$$

unde:

$$\begin{aligned} c_1 &= 2(T_f + T_{m1}), \\ c_2 &= 3 T_{m1} T_i + 3 T_{m1} T_E + T_f^2 + T_f T_{m1}, \\ c_3 &= 4 T_i T_E T_{m1} + T_f T_i T_{m1} + T_f T_E T_{m1}, \\ c_4 &= 3 T_i T_E T_f T_{m1}. \end{aligned} \quad (6.28)$$

Observații: 1) expresiile constantelor de mai sus și relația (6.27) ar deveni mai simple dacă am utiliza un motor de curent continuu la care viteza de rotație mare ar fi de circa două ori mai mare decât viteza de rotație mică. Aceasta ar însemna ca $\Phi_{D0} \approx \Phi_{S0}$, ceea ce conduce la relația:

$$T_f = T_E \frac{1 + \sigma}{2} \approx \frac{1}{2} T_E. \quad (6.29)$$

2) Pentru motorul de curent continuu ales, $n_s = n_2 \approx 3n_1 = n_G$, rezultă valoarea:

$$T_f = T_E \frac{2 + \sigma}{3} \approx \frac{2}{3} T_E. \quad (6.30)$$

6.1.5. Funcția de transfer a organului de reglare

Organul de reglare este vana turbinei hidraulice, care modifică mărimea debitului de apă admis în turbină. Între axul motorului și axul vanei este însă și angrenajul melcat prezentat în § 4.1.7. Angrenajul melcat și vana turbinei hidraulice constituie un element proporțional. Poziția vanei este caracterizată prin unghiul β (vezi § 4.1.1).

Între unghiul θ_1 de rotație al rotorului motorului de curent continuu și unghiul β , există relația:

$$\beta(t) = \frac{1}{i_T} \cdot \theta_1(t), \quad (6.31)$$

i_T fiind raportul de transmitere al angrenajului melcat (relația 4.28).

Deci funcția de transfer a organului de reglare este:

$$Y_{ER_1}(s) = \frac{\beta(s)}{\theta_1(s)} = \frac{1}{i_T} = \text{const.} \quad (6.32)$$

Cum valoarea raportului de transmitere este $i_T=34$ [93], rezultă valoarea funcției de transfer a organului de reglare:

$$Y_{ER_1}(s) = \frac{1}{34}. \quad (6.33)$$

6.1.6. Funcția de transfer a organului reglat

Organul reglat este turbina hidraulică ce antrenează generatorul sincron.

Turbina hidraulică trebuie să funcționeze la viteză unghiulară constantă. Ecuația de mișcare a grupului turbină hidraulică - generator sincron este:

$$M_1 - M_2 = J \frac{d\Omega}{dt}. \quad (6.34)$$

În această relație, M_1 este cuplul motor al turbinei hidraulice, M_2 este cuplul dezvoltat de generatorul sincron, iar J este momentul de inerție al pieselor aflate în mișcare de rotație, raportat la rotorul turbinei hidraulice, iar $d\Omega/dt$ reprezintă variația vitezei de rotație în timp.

Cuplul motor M_1 al turbinei hidraulice este (vezi și relația (4.1)):

$$M_1 = \rho \cdot g \frac{Q \cdot H}{\Omega} \eta_T. \quad (6.35)$$

Debitul Q depinde de poziția β a organului de reglare, căderea de apă H putând fi considerată constantă.

Având în vedere relația (4.5), relația (6.35) devine:

$$M_1 = \frac{k}{\Omega} (1 - \cos \beta), \quad (6.36)$$

constanta k fiind determinabilă.

Cuplul M_2 dezvoltat de generatorul sincron (cuplu rezistent) pentru o anumită putere electrică constantă P_2 furnizată consumatorilor, în ipoteza neglijării pierderilor în generator, coincide cu cuplul util M_u :

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega} = M_u. \quad (6.37)$$

În afara acestui cuplu, în funcționarea grupului turbină - generator sincron, mai a-

par variații de cuplu - $\Delta M(t)$, care nu depind de sistemul de reglare și nici de tipul consumatorului, ci de variațiile de putere activă [6]. Ele au o variație aleatoare și în regim staționar sunt nule.

Deci:

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega} + \Delta M(t). \quad (6.38)$$

Ecuția (6.34) devine

$$\frac{k}{\Omega}(1 - \cos \beta) - \frac{P_2}{\Omega} - \Delta M(t) = J \frac{d\Omega}{dt}. \quad (6.39)$$

Dezvoltând în serie Taylor și grupând, se obține [6]:

$$T_p \frac{d\Delta\Omega}{dt} + \Delta\Omega = k_{OR_1} - k_{OR_2} \Delta M(t); \quad (6.40)$$

unde

$$T_p = \frac{J}{\left(\frac{\partial M_2}{\partial \Omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_1}{\partial \Omega}\right)_0} = \frac{J}{-\frac{P_2}{\Omega_0^2} + \frac{k(1 - \cos \beta_0)}{\Omega_0^2}} = \frac{J \cdot \Omega_0^2}{k(1 - \cos \beta_0) - P_2}, \quad (6.41)$$

și

$$k_{OR_1} = \frac{\frac{\partial M_1}{\partial \beta}}{\left(\frac{\partial M_2}{\partial \Omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_1}{\partial \Omega}\right)_0} = \frac{\frac{k}{\Omega_0} \sin \beta_0}{\frac{1}{\Omega_0^2} [k(1 - \cos \beta_0) - P_2]} = \frac{k \cdot \Omega_0 \cdot \sin \beta_0}{k(1 - \cos \beta_0) \cdot P_2}, \quad (6.42)$$

iar

$$k_{OR} = \frac{1}{\left(\frac{\partial M_2}{\partial \Omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_1}{\partial \Omega}\right)_0} = \frac{1}{F_s}. \quad (6.43)$$

Se constată că în relațiile (6.41)-(6.43) apare mărimea

$$F_s = \left(\frac{\partial M_2}{\partial \Omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_1}{\partial \Omega}\right)_0, \quad (6.44)$$

a cărei valoare precizează dacă punctul de funcționare al grupului motor - generator este stabil ($F_s > 0$) sau instabil ($F_s < 0$, vezi și § 2.2), motiv pentru care F_s se mai numește *coeficient de stabilitate*.

Din relațiile (6.41) și (6.44) rezultă:

$$F_s = \frac{1}{\Omega_0^2} [k(1 - \cos \beta_0) - P_2]. \quad (6.45)$$

Transformata Laplace a relației (6.40) ne conduce la relația

$$(1 + s \cdot T_p) \Omega(s) = k_{OR_1} \cdot \Omega(s) - k_{OR} \cdot M(s). \quad (6.46)$$

Din această relație rezultă funcția de transfer a turbinei (a organului reglat):

$$Y_{OR_1} = \frac{\Omega(s)}{\beta(s)} = \frac{k_{OR_1}}{1 + s \cdot T_p}, \quad (6.47)$$

iar perturbația $M(s)$ se transmite către ieșire cu funcția de transfer

$$Y_{Z_1} = \frac{\Omega(s)}{M(s)} = \frac{k_{OR}}{1+s \cdot T_p} \quad (6.48)$$

6.1.7. Funcția de transfer a elementului de măsurare (a convertorului frecvență - tensiune)

Pomind de la relația 4.22 și figura 5.6, rezultă funcția de transfer a elementului de măsură:

$$Y_{EM_1(s)} = \frac{U(s)}{\Omega(s)} = k_c \cdot \frac{p_G}{2\pi} = k_{EM_1}, \quad (6.49)$$

unde p_G este numărul perechilor de poli ai generatorului sincron, iar k_c este constanta convertorului frecvență - tensiune.

6.2. Funcția de transfer a buclei de reglare a turației (frecvenței tensiunii)

6.2.1. Funcția de transfer a buclei de reglare a turației, când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie.

Funcția de transfer a buclei deschise rezultă luând în considerare funcțiile de

$$Y_{D_1}(s) = k_{P_1} \frac{k_{c1}}{1+s \cdot T_{ic}} k_{A_1} \cdot p_m \cdot k \frac{k'}{F} \cdot \frac{1+2s \cdot T_m+3s^2 \cdot T \cdot T_m}{s(1+s \cdot T_m+s^2 \cdot T \cdot T_m)^2} \cdot \frac{1}{i_r} \cdot \frac{k_{OR_1}}{1+s \cdot T_p}, \quad (6.50)$$

transfer ale elementelor componente ale acesteia, adică relațiile (6.2), (6.3), (6.6), (6.26), (6.32), (6.47), dacă elementul amplificator este de tip P:

$$Y_{D_1}'(s) = k_{P_1} \frac{k_{c1}}{1+s \cdot T_{ic}} k_{A_1} \left(1 + \frac{1}{s \cdot T_{ir}}\right) p_m \cdot k \frac{k'}{F} \cdot \frac{1+2s \cdot T_m+3s^2 \cdot T \cdot T_m}{s(1+s \cdot T_m+s^2 \cdot T \cdot T_m)^2} \cdot \frac{1}{i_r} \cdot \frac{k_{OR_1}}{1+s \cdot T_p} \quad (6.51)$$

sau relațiile (6.2), (6.3), (6.7), (6.26), (6.32), (6.47), dacă elementul amplificator este de tip PI:

$$Y_1(s) = \frac{k_{P_1} \frac{k_{c1}}{1+s \cdot T_{ic}} k_{A_1} \cdot p_m \frac{k'}{F} \cdot \frac{1+2s \cdot T_m+3s^2 \cdot T \cdot T_m}{s(1+s \cdot T_m+s^2 \cdot T \cdot T_m)^2} \cdot \frac{1}{i_r} \cdot \frac{k_{OR_1}}{1+s \cdot T_p}}{1+k_{P_1} \frac{k_{c1}}{1+s \cdot T_{ic}} k_{A_1} \cdot p_m \frac{k'}{F} \cdot \frac{1+2s \cdot T_m+3s^2 \cdot T \cdot T_m}{s(1+s \cdot T_m+s^2 \cdot T \cdot T_m)^2} \cdot \frac{1}{i_r} \cdot \frac{k_{OR_1}}{1+s \cdot T_p}} k_{EM_1} \quad (6.52)$$

Utilizând relațiile (6.49), (6.50), rezultă funcția de transfer a buclei închise, în varianta când elementul amplificator (regulator) este de tip P, adică:

$$Y_1'(s) = \frac{k_{P_1} \frac{k_{c1}}{1+s \cdot T_{ic}} k_{A_1} \left(1 + \frac{1}{s \cdot T_{ir}}\right) p_m \frac{k'}{F} \cdot \frac{1+2s \cdot T_m+3s^2 \cdot T \cdot T_m}{s(1+s \cdot T_m+s^2 \cdot T \cdot T_m)^2} \cdot \frac{1}{i_r} \cdot \frac{k_{OR_1}}{1+s \cdot T_p}}{1+k_{P_1} \frac{k_{c1}}{1+s \cdot T_{ic}} k_{A_1} \left(1 + \frac{1}{s \cdot T_{ir}}\right) p_m \frac{k'}{F} \cdot \frac{1+2s \cdot T_m+3s^2 \cdot T \cdot T_m}{s(1+s \cdot T_m+s^2 \cdot T \cdot T_m)^2} \cdot \frac{1}{i_r} \cdot \frac{k_{OR_1}}{1+s \cdot T_p}} k_{EM_1} \quad (6.53)$$

Utilizând relațiile (6.49), (6.51), rezultă funcția de transfer a buclei închise în varianta când elementul amplificator (regulator) este de tip PI:

Dacă notăm:

$$k_{\Omega_1} = \frac{k_{P_1} \cdot k_{C_1} \cdot k_{A_1} \cdot p_m \cdot k' \cdot k_{OR_1}}{F_i \cdot i_T} \quad (6.54)$$

după transformări relația (6.52) devine:

$$Y_1(s) = \frac{k_{\Omega_1} (1 + 2s \cdot T_m + 3s^2 T \cdot T_m)}{s(1 + s \cdot T_{ic}) \cdot (1 + s \cdot T_p) \cdot (1 + s \cdot T_m + s^2 T \cdot T_m)^2 + k_{\Omega_1} \cdot k_{EM_1} (1 + 2s \cdot T_m + 3s^2 \cdot T \cdot T_m)}, \quad (6.55)$$

iar relația (6.53) devine:

$$Y_i(s) = \frac{k_{\Omega_1} (1 + s \cdot T_{ir}) (1 + 2s \cdot T_m + 3s^2 T \cdot T_m)}{s^2 T_{ir} (1 + s \cdot T_{ic}) \cdot (1 + s \cdot T_p) \cdot (1 + s \cdot T_m + s^2 T \cdot T_m)^2 + k_{\Omega_1} \cdot k_{EM_1} (1 + 2s \cdot T_m + 3s^2 \cdot T \cdot T_m)}, \quad (6.56)$$

Schema bloc a buclei de reglare a turației grupului turbină - generator sincron, cu precizarea funcțiilor de transfer a elementelor componente, este redată în figura 6.2.

6.2.2. Funcția de transfer a buclei de reglare a turației, când motorul de curent continuu funcționează cu excitație compund

Utilizând relațiile (6.2), (6.3), (6.6), (6.27), (6.32) și (6.47), rezultă funcția de transfer a buclei deschise, când elementul regulator este de tip P:

$$Y_{D1}(s) = k_{P_1} \frac{k_{C_1}}{1 + s \cdot T_{ic}} k_{A_1} \frac{p_m}{k_m \Phi_0} \frac{1 + s \cdot c_1 + s^2 \cdot c_2 + s^3 \cdot c_3 + s^4 \cdot c_4}{s[(1 + s \cdot T_f) + s \cdot T_m (1 + s \cdot T_i)(1 + s \cdot T_E)]^2} \cdot \frac{1}{i_T} \frac{k_{OR_1}}{1 + s \cdot T_p} \quad (6.57)$$

Din relațiile (6.2), (6.3), (6.7), (6.27), (6.32) și (6.47) rezultă funcția de transfer a buclei deschise, când elementul regulator este de tip PI:

$$Y_{D1}(s) = Y_{D1}(s) \cdot \left(1 + \frac{1}{s \cdot T_{ir}}\right) \quad (6.58)$$

unde unde $Y_{D1}(s)$ are expresia din relația (6.57).

Utilizând relațiile (6.49) și (6.57), rezultă funcția de transfer a buclei închise, când elementul amplificator este de tip P și motorul de c. c. are excitație compund:

$$Y_1(s) = \frac{k_{P_1} \frac{k_{C_1}}{1 + s \cdot T_{ic}} k_{A_1} \frac{p_m}{k_m \Phi_0} \frac{1 + s \cdot c_1 + s^2 \cdot c_2 + s^3 \cdot c_3 + s^4 \cdot c_4}{s[(1 + s \cdot T_f) + s \cdot T_m (1 + s \cdot T_i)(1 + s \cdot T_E)]^2} \cdot \frac{1}{i_T} \frac{k_{OR_1}}{1 + s \cdot T_p}}{1 + k_{P_1} \frac{k_{C_1}}{1 + s \cdot T_{ic}} k_{A_1} \frac{p_m}{k_m \Phi_0} \frac{1 + s \cdot c_1 + s^2 \cdot c_2 + s^3 \cdot c_3 + s^4 \cdot c_4}{s[(1 + s \cdot T_f) + s \cdot T_m (1 + s \cdot T_i)(1 + s \cdot T_E)]^2} \cdot \frac{1}{i_T} \frac{k_{OR_1}}{1 + s \cdot T_p}} \cdot k_{EM_1} \quad (6.59)$$

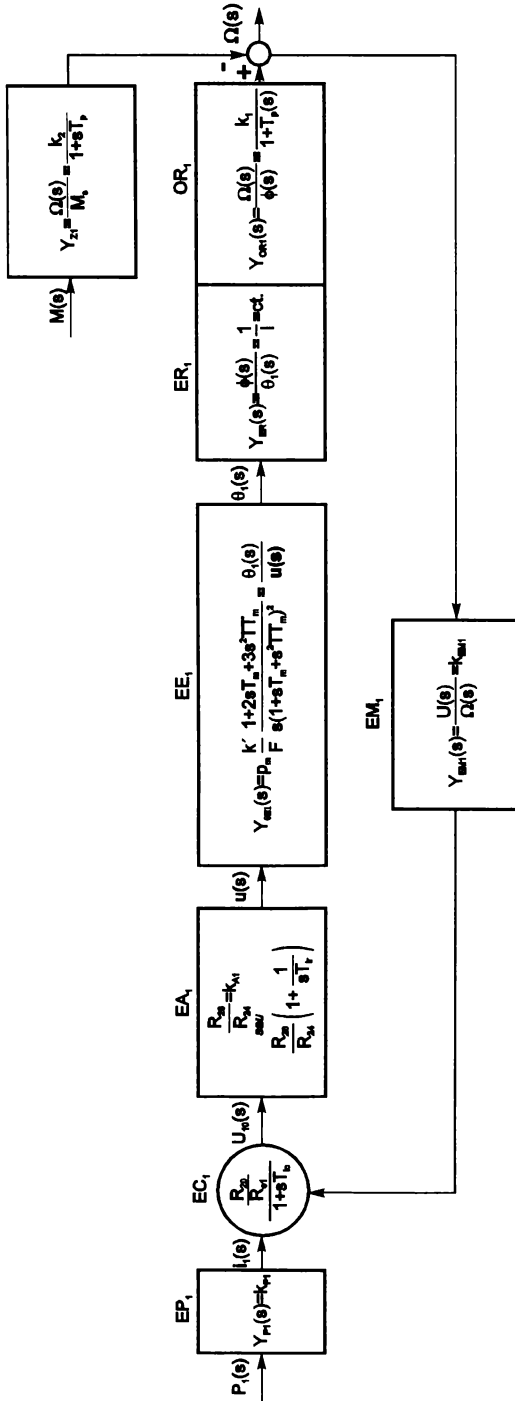


Figura 6. 2

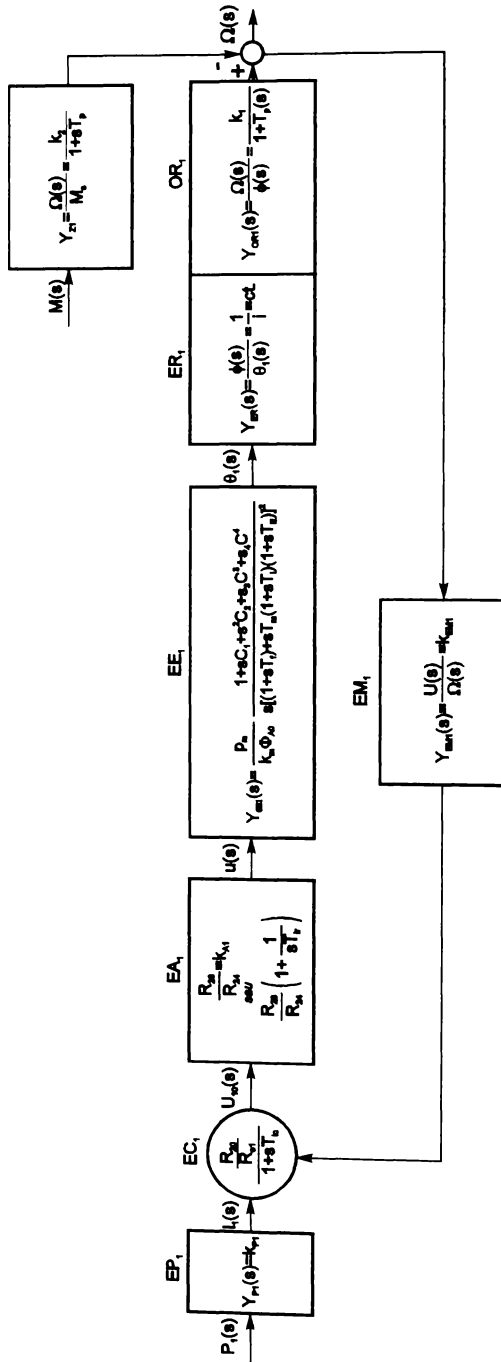


Figure 6.3

Utilizând relațiile (6.49) și (6.58), rezultă funcția de transfer a buclei închise, când elementul amplificator este de tip PI și motorul de curent continuu are excitație compund:

$$Y'_i(s) = \frac{Y_{D1}(s)}{1 + Y_{D1}(s) \cdot k_{EM1}}, \quad (6.60)$$

unde $Y'_{D1}(s)$ are expresia din relația (6.58).

6.3. Funcțiile de transfer ale elementelor componente ale buclei de reglare a tensiunii

Schema bloc a buclei de reglare a tensiunii furnizate de generatorul sincron este prezentată în figura 6.4.

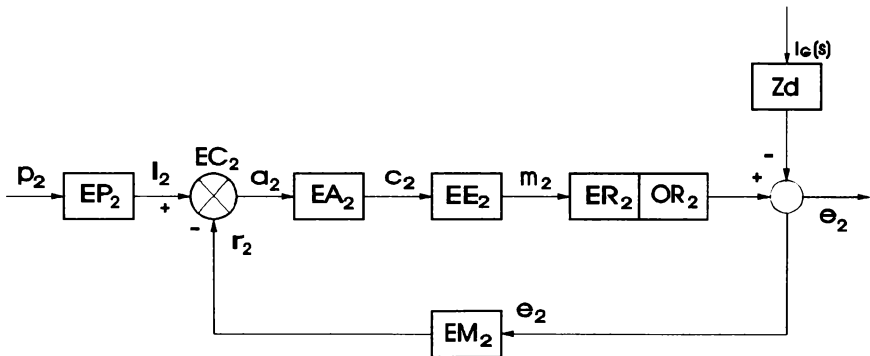


Fig. 6. 4 Schema bloc a buclei de reglare a tensiunii: p_2 - mărime de intrare prescrisă (tensiunea U_z a diodei Zenner DZ_1); EP_2 - element de prescriere a tensiunii ($R_6 - DZ_1$ din figura 5.10 și 5.11); I_2 - mărimea de intrare în sistemul automat (din figura 5.11); EC_2 - elementul de comparare (circuitul de intrare diferențială a CI_2 din figura 5.10); a_2 - abaterea obținută la ieșirea elementului comparator ($U_p - U_i$); EA_2 - elementul de amplificare (regulator) de tip P (CI_1 din figura 5.10); c_2 - mărimea de comandă (U_e din figura 5.10 și relația 5.15); EE_2 - elementul de execuție (figura 5.14); m_2 - mărimea de execuție aplicată obiectului reglat (U_{ω} din figura 3.4); ER_2 - elementul de reglare (excitația Ex a generatorului sincron din figura 3.4); OR_2 - organul reglat (generatorul sincron); e_2 - mărimea de ieșire (valoarea efectivă a tensiunii furnizate de G.S.); EM_2 - elementul de măsurare a mărimii de ieșire; r_2 - mărimea de reacție (U_r din figura 5.10); I_e - curentul generatorului sincron; Z_d - funcția de transfer a perturbației (impedanța sincronă longitudinală a generatorului sincron).

6.3.1. Funcția de transfer a elementului de prescriere

Elementul fizic de prescriere prin care se urmărește păstrarea constantă a valorii tensiunii furnizate de generatorul sincron este dioda Zenner DZ_1 , care prescrie tensiunea ei proprie U_z .

În figura 6.3 este reprezentată schema bloc a buclei de reglare a turației grupului turbină - generator sincron, cu precizarea funcțiilor de transfer a elementelor componente.

În § 4.2.1 am explicat motivele alegerii valorii tensiunii U_z . Mărimea U_z este o mărime intrinsecă a diodei Zenner.

Mărimea U_p este mărimea de ieșire a elementului de prescriere. În condițiile în

care variația tensiunii la bornele generatorului sincron rămâne în limitele precizate în § 4.2.1, relația (5.12) permite considerarea tensiunii U_p ca fiind constantă.

Deci:

$$U_p = U_z. \quad (6.61)$$

Această relație permite considerarea elementului de prescriere drept un element proporțional, cu constanta k_{P_2} unitară.

Deci:

$$Y_{P_2}(s) = \frac{U_p(s)}{U_z(s)} = k_{P_2} = 1. \quad (6.62)$$

6.3.2. Funcția de transfer a elementului de comparare

Compararea celor două mărimi, i_2 și r_2 , adică a mărimii de la ieșirea elementului de prescriere U_p , și a mărimii de la ieșirea elementului de măsură U_r , se face pe intrarea circuitului integrat CI₁ - βA 741, din figura 5.10. Diferența acestor mărimi $a_2 = i_2 - r_2$, adică

$$\Delta U = U_p - U_r, \quad (6.63)$$

este mărimea ce se amplifică de către amplificatorul operațional de tip P mai sus amintit. Deci și elementul comparator este un element proporțional, cu constanta de proporționalitate unitară, adică:

$$Y_{C_2}(s) = k_{C_2} = 1. \quad (6.64)$$

6.3.3. Funcția de transfer a elementului de amplificare

Cu notația din relația (6.63), relația (5.15) - transpusă în operațional - devine:

$$U_e(s) = \frac{R_2}{R_1} \Delta U(s) = k_{A_2} \cdot \Delta U(s), \quad (6.65)$$

de unde rezultă:

$$Y_{A_2}(s) = \frac{U_e(s)}{\Delta U(s)} = k_{A_2}. \quad (6.66)$$

6.3.4. Funcția de transfer a elementului de execuție

Elementul de execuție include și blocul de comandă pe grilă (figurile 5.12 și 5.13). Funcția de transfer a ansamblului de comandă și a redresorului este [17]:

$$Y_{E_2}(s) = \frac{U_{Ex}(s)}{U_{c-dă}(s)} = \frac{k_{E_2}}{1 + s \cdot T_{E_2}}, \quad (6.67)$$

unde T_{E_2} este un timp mort, de ordinul milisecundelor [35], iar k_{E_2} este o constantă calculabilă.

6.3.5. Funcția de transfer a elementului de reglare

Pomind de la ecuația valabilă în regim dinamic

$$U_{ex}(t) = i_{Ex}(t) \cdot R_{Ex} + L_{Ex} \frac{di_{Ex}(t)}{dt}, \quad (6.68)$$

în urma transformării Laplace rezultă funcția de transfer a excitației generatorului sincron:

$$Y_{ER_2}(s) = \frac{I_{Ex}(s)}{U_{Ex}(s)} = \frac{k_{ER_2}}{1 + s \cdot T_{ER_2}}, \quad (6.69)$$

unde $k_{ER2}=1/R_{Ex}$, $T_{ER2}=L_{Ex}/R_{Ex}$, L_{Ex} și R_{Ex} fiind inductivitatea, respectiv rezistența înfășurării de excitație.

Observație: Dacă în expresia funcției de transfer a generatorului sincron va fi - ca mărime de intrare -tensiunea U_{Ex} , iar mărimea de ieșire a elementului de execuție este chiar U_{Ex} , expresia (6.69) nu se va utiliza în scrierea funcției de transfer a buclei de reglare a tensiunii.

6.3.6. Funcția de transfer a organului reglat

Generatorul sincron urmând să lucreze în regim autonom, sistemul de reglare va urmări menținerea constantă a tensiunii, fără a se pune problema repartizării puterii reactive din situația că generatorul ar funcționa în paralel cu alte generatoare.

În această situație, funcția de transfer a generatorului sincron este [6]:

$$Y_{OR_2}(s) = \frac{U(s)}{U_{Ex}(s)} = \frac{k_{OR_2}}{1 + s \cdot T_{OR_2}}, \quad (6.70)$$

unde

$$k_{OR_2} = \frac{c_1}{R_{Ex}} \left[\frac{\partial \Phi_{Ex}}{\partial i_{Ex}} \right]_0 = \frac{c_1}{R_{Ex}} \left[\frac{\partial f(i_{Ex})}{\partial i_{Ex}} \right]_0 = \frac{1}{R_{Ex}} \left[\frac{\partial U_{eE}}{\partial i_{Ex}} \right]_0, \quad (6.71)$$

este constanta de transfer, iar

$$T_{OR_2} = \frac{N_{Ex}}{R_{Ex} L} \left[\frac{\partial f(i_{Ex})}{\partial i_{Ex}} \right]_0 = N_{Ex} \frac{L_{Ex}}{R_{Ex}} \quad (6.72)$$

este constanta de timp a organului reglat (generatorul sincron).

6.3.7. Funcția de transfer a elementului de măsurare

Măsurarea tensiunii de fază a generatorului sincron se face prin intermediul redresorului necomandat R_N și a rezistențelor R_2 și R_5 din figura 5.10.

Pomind de la relația (4.31), se obține:

$$U_r = \frac{1,17 \cdot U}{R_3 + R_5} R_5 = k_{EM_2} \cdot U. \quad (6.73)$$

Deci funcția de transfer a elementului de măsurare este

$$Y_{EM_2}(s) = \frac{U_r(s)}{U(s)} = k_{EM_2}. \quad (6.74)$$

6.4. Funcția de transfer a buclei de reglare a tensiunii

6.4.1. Funcția de transfer a buclei deschise

Pomind de la precizările din § 6.1 și utilizând relațiile (6.62), (6.64), (6.66), (6.67) și (6.70), funcția de transfer a buclei deschise este:

$$Y_{D_2}(s) = k_{P_2} \cdot k_{c_2} \cdot k_{A_2} \frac{k_{E_2}}{1 + s \cdot T_{E_2}} \cdot \frac{k_{OR_2}}{1 + s \cdot T_{OR_2}} = \frac{k_{P_2} \cdot k_{c_2} \cdot k_{A_2} \cdot k_{E_2} \cdot k_{OR_2}}{(1 + s \cdot T_{E_2})(1 + s \cdot T_{OR_2})}. \quad (6.75)$$

6.4.2. Funcția de transfer a buclei închise, de reglare a tensiunii generatorului sincron

Utilizând relațiile (6.74) și (6.75), rezultă bucla de transfer a buclei închise:

$$Y_2(s) = \frac{k_{p_2} \cdot k_{c_2} \cdot k_{A_2} \cdot k_{E_2} \cdot k_{OR_2}}{1 + \frac{k_{A_2} \cdot k_{E_2} \cdot k_{OR_2}}{(1 + s \cdot T_{E_2})(1 + s \cdot T_{OR_2})} k_{EM_2}} = \frac{k_{U_2}}{k_{U_2} \cdot k_{EM_2} + (1 + s \cdot T_{E_2})(1 + s \cdot T_{OR_2})}, \quad (6.76)$$

unde am notat

$$k_{U_2} = k_{p_2} \cdot k_{c_2} \cdot k_{A_2} \cdot k_{E_2} \cdot k_{OR_2}. \quad (6.77)$$

Schema bloc a buclei de reglare a tensiunii generatorului sincron, cu precizarea funcțiilor de transfer ale elementelor componente, este reprezentată în figura 6.5.

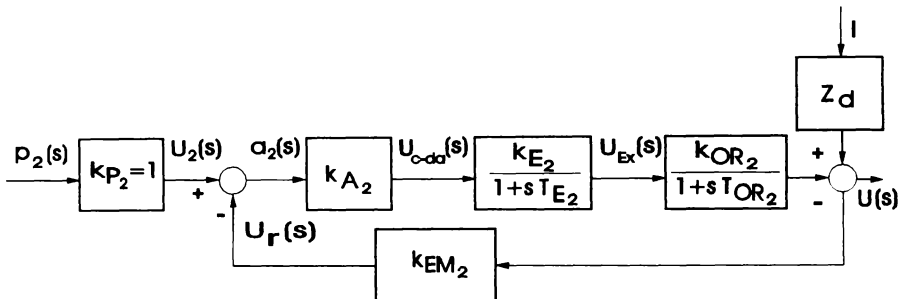


Fig. 6. 5 Schema bloc a buclei de reglare a tensiunii generatorului sincron, corespunzătoare relației (6.76).

6.4.3. Funcția de transfer a buclei închise de reglare a tensiunii generatorului sincron, când se consideră și constanta de timp a excitației

Având în vedere că relația dintre tensiunea de excitație și curentul de excitație nu este liniară, fiind afectată de constanta de timp a circuitului de excitație, care poate avea

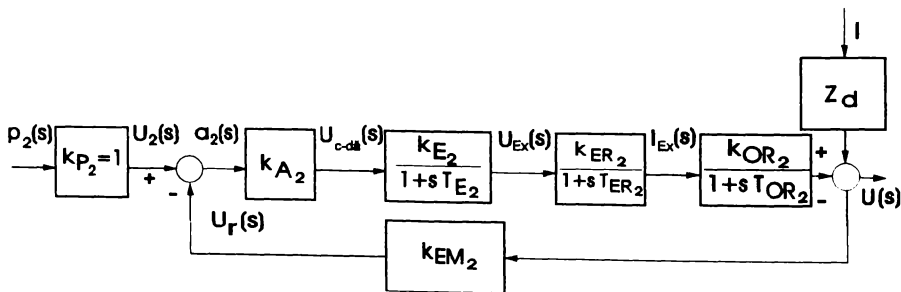


Fig. 6. 6 Schema bloc a buclei de reglare a tensiunii generatorului sincron, corespunzătoare relației (6.78).

o valoare comparabilă cu constantele de timp din relația (6.5), și pomind de la schema bloc din figura 6.5, se poate scrie funcția de transfer a buclei închise de reglare a tensiunii, astfel:

$$Y'_{2}(s) = k \frac{k'_{U_2}}{k'_{U_2} \cdot k_{EM_2} + (1+s \cdot T_{E_2})(1+s \cdot T_{OR_2})(1+s \cdot T_{ER_2})}, \quad (6.78)$$

unde am notat:

$$k'_{U_2} = k_{p_2} \cdot k_{c_2} \cdot k_{A_2} \cdot k_{E_2} \cdot k_{OR_2} \cdot k_{ER_2}, \quad (6.79)$$

Consider că funcția de transfer din relația (6.78) modelează mai exact bucla de reglare a tensiunii generatorului sincron, sperând ca rezultatele practice să confirme acest lucru.

Schema bloc a buclei de reglare a tensiunii generatorului sincron, cu precizarea funcțiilor de transfer a elementelor componente, în această ipoteză, este reprezentată în figura 6.6.



Capitolul 7. ANALIZA STABILITĂȚII TEORETICE A CELOR DOUĂ BUCLE DE REGLARE (A FRECVENȚEI ȘI A VALORII TENSIUNII)

7.1. Introducere

Pentru stabilirea comportării buclelor de reglare amintite, consider că cel mai indicat este să folosesc criteriul Nyquist (forma simplificată [41]), realizând în acest sens un program pe calculator, de calculare și reprezentare a hodografului pentru fiecare din cele șase funcții de transfer amintite. Pentru aceasta însă este necesară determinarea experimentală a constantelor de proporționalitate și de timp ale elementelor ce compun buclele de reglare a frecvenței și a tensiunii generatorului sincron. Asupra stabilității acestor bucle se poate interveni cel mai ușor prin modificarea constantelor de proporționalitate a elementelor din bucla respectivă.

7.2. Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței

7.2.1. Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței, când regulatorul este de tip P și motorul de curent continuu funcționează cu excitație serie (viteza mare de rotație)

Această situație corespunde cazului real când frecvența tensiunii generatorului sincron este mai mică decât $f_0 - \Delta f$, sau mai mare decât $f_0 + \Delta f$ (§ 4.1.5), iar regulatorul prezentat în § 5.1.4, figura 5.5, este de tip P. Modelul matematic al buclei de reglare în acest caz este descris de ecuația (6.52).

Conform criteriului lui Nyquist, bucla de reglare a frecvenței în această situație este stabilă dinamic dacă hodograful corespunzător celui de-al doilea termen al numitorului din relația amintită nu înconjoară în sens orar punctul de coordonate $-1+0j$, din planul complex în care acesta este reprezentat. Deci, funcția al cărei hodograf va fi analizat are expresia:

$$F_{652} = \frac{k_{p_1} \cdot k_{c_1} \cdot k_{A_1} \cdot p_m \cdot k' \cdot k_{OR_1} \cdot k_{EM_1}}{F \cdot i_T} \cdot \frac{1 + 2s \cdot T_m + 3s^2 \cdot T \cdot T_m}{s(1 + s \cdot T_{ic})(1 + s \cdot T_m + s^2 T \cdot T_m)^2(1 + s \cdot T_p)}. \quad (7.1)$$

Pentru reprezentarea hodografului este necesară cunoașterea constantelor de proporționalitate și de timp ce intervin în relația (7.1).

Pentru modelul experimental parțial calculat și prezentat în § 4.1.1÷4.1.7, respectiv 5.1.1÷5.1.6, constantele de proporționalitate și de timp au valorile prezentate în tabelul 7.1.

Tabelul 7.1

Prezentarea tabelară a constantelor

Nr. crt.	Simbol	Relația de definiție sau paragraful	Valoarea	U.M.
1.	k_{p1}	(6.1), § 6.1.1	0,05÷0,81	-
2.	k_{c1}	(6.3), § 6.1.2	1÷27	-
3.	k_{A1}	(6.6), § 6.1.3	1÷5	-
4.	p_m	§ 4.1.6, 5.1.6	1	-
5.	k'	(6.14), § 6.1.4	0,0324	A·s
6.	F	(6.14), § 6.1.4	0,0015	J·s
7.	k_{OR1}	(6.42), § 6.1.5	300÷593	s^{-1}
8.	k_{EM1}	(6.49), § 6.17 (fig. 5.6)	0,109	$V \cdot Hz^{-1}$
9.	i_T	(6.32), (6.33), § 6.1.5	34	-
10.	T_{ic}	(6.5), § 6.1.2	$5 \cdot 10^{-4}$	s
11.	T	(6.15), § 6.1.4	0,1008	s
12.	T_m	(6.15), § 6.1.4	0,133	s
13.	T_p	(6.41), § 6.1.6	0,5189÷1,0178	s

La determinarea constantelor prezentate în tabelul de mai sus s-au avut în vedere valorile rezistoarelor și condensatoarelor calculate, valorile constantelor motorului de curent continuu, determinate experimental ($k_e=pN/a=624$, $k_m=k_e/2\pi=98,36$), valorile fluxului ($\Phi_0=4,9 \cdot 10^{-4}$ Wb), curentului ($I_0=4$ A), vitezei de rotație ($\Omega_0=2.040$ rot./min.), corespunzătoare unui punct de funcționare staționar, valorile rezistenței indusului și excitației inseriate ($R=0,4 \Omega$), valoarea momentului de inerție al vanei și rotorului motorului de

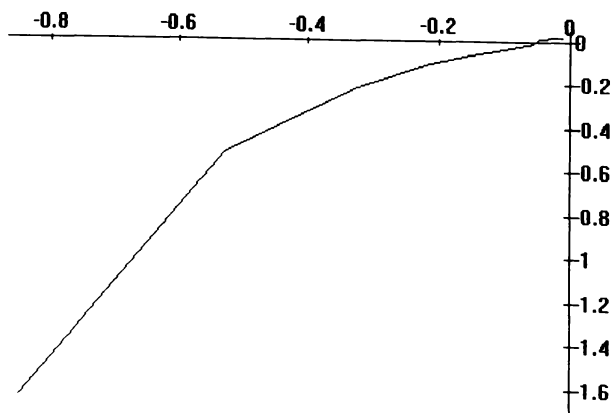


Fig. 7. 1 Hodograful corespunzător funcției F 652, când constantele de proporționalitate au valorile minime.

curent continuu - raportate la acesta din urmă - ($J=2,07 \cdot 10^{-4}$ kg·m²), valoarea momentului de inerție al rotoarelor turbinei și generatorului sincron - raportate la acesta din urmă - ($J=1,546$ kg·m²), valoarea constantei k din relația (4.5) - ($k=12,58 \cdot 10^{-4}$, pentru unghiul de deschidere al turbinei $\beta=22^\circ$).

Introducând datele din tabelul 7.1 în programe scrise în limbajul și mediul de programare Maple (prezentate în anexele nr. 1, 2, 3), pentru diferite valori ale constantelor de proporționalitate, au rezultat hodografele prezentate în figurile 7.1÷7.3.

În figura 7.1 este reprezentat hodograful funcției F 652, pentru cazul când constantele de proporționalitate au valorile minime din tabelul 7.1. Se constată că hodograful nu înconjoară punctul de coordonate $(-1+0j)$ în sens orar, când „s” variază de la 0 la la infinit, marginea de modul fiind chiar foarte mică (sub 0,1).

În concluzie, bucla de reglare a frecvenței - în condițiile arătate - este stabilă dinamic. În continuare, am determinat valoarea maximă a produsului constantelor de proporționalitate pentru care bucla de reglare a frecvenței este încă stabilă dinamic. În acest sens, am scris un nou program, în care am multiplicat cu 40 constanta de proporționalitate minimă și apoi am reprezentat hodografele a zece funcții cu valori ale produsului constantelor de proporționalitate de la 1 până la de 40 de ori valoarea minimă a acestuia.

Hodografele celor zece funcții sunt reprezentate în figura 7.2. Din figură se constată că în intervalul $(-1, 0)$ nu se distinge punctul de intersecție al fiecărui hodograf cu axa reală negativă.

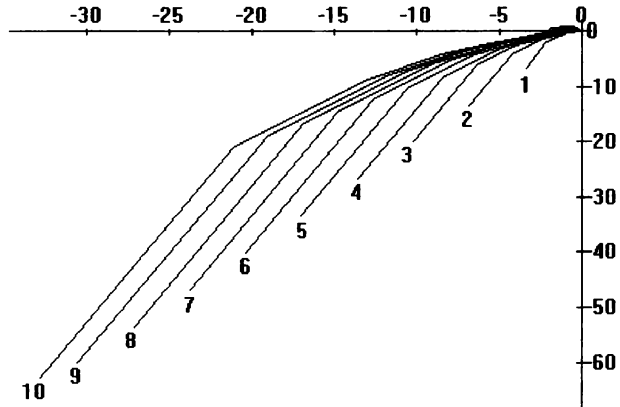


Fig. 7. 2 Hodografele corespunzătoare funcției F 652, când produsul constantelor de proporționalitate au valori între 1 și de 40 de ori valoarea sa minimă.

constantă de proporționalitate minimă și apoi am reprezentat ho-

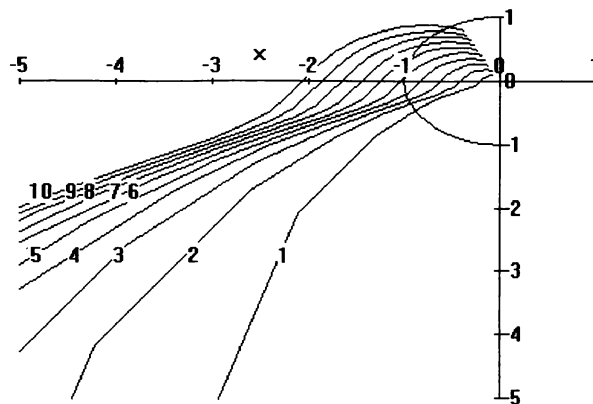


Fig. 7. 3 Hodografele corespunzătoare funcției F 652, când constantele de proporționalitate au valorile între 1 și de 40 ori valoarea minimă a constantei de proporționalitate, în intervalul $(-5, 1)$.

Pentru a determina valoarea maximă a produsului constantelor de proporționalitate pentru care bucla de reglare a frecvenței este încă stabilă dinamic, am reprezentat cele zece hodografe de mai sus la o scară astfel aleasă încât să se observe fără dubii punctele de intersecție ale acestora cu axa reală negativă (figura 7.3).

Din această figură se constată că primele cinci hodografe intersecționează axa reală în intervalul $(-1, 0)$, deci nu înconjoară în sens orar punctul critic $(-1+0j)$.

Hodograful 5 intersecționează axa reală negativă chiar în jurul punctului critic, stabilitatea buclei de reglare a frecvenței pentru valorile corespunzătoare funcției respective putând fi labilă. Din acest motiv, consider că bucla de reglare a frecvenței este stabilă pentru valori ale produsului constantelor de proporționalitate de 16 ori mai mari decât valoarea minimă a acestuia, situație în care marginea de modul este aproximativ egală cu 0,8, iar marginea de fază este de circa $+12^\circ$. Cum însă în produsul constanțelor de proporționalitate o plajă largă au primele trei constante (tabelul 7.1), am urmărit stabilirea lor concretă.

Constanta k_{p1} are influență și asupra funcționării convertorului frecvență - tensiune, motiv pentru care ea s-a stabilit experimental, rezultând valoarea 0,1.

Tot experimental s-a stabilit și constanta k_{c1} , la valoarea 2,55.

Rezultă deci că valoarea constantei amplificatorului din bucla de reglare a frecvenței - k_{A1} - poate fi de maximum 3,1.

Valorile concrete stabilite pentru constantele mai sus amintite permit realizarea buclei de reglare a frecvenței, astfel încât aceasta să poată funcționa stabil din punct de vedere dinamic.

Metoda de analiză și programele prezentate au un caracter general, putând fi aplicate în orice buclă de reglare, chiar și cu altă configurație, fiind utile în procesul de acordare optimă a elementelor buclei, și în special a regulatorului.

Aplicarea acestei metode, utilizând limbajul și mediul de programare Maple, constituie o contribuție a autorului în domeniul optimizării funcționării unei bucle de reglare.

Analizând relația (6.55), care reprezintă funcția de transfer corespunzătoare buclei închise de reglare a frecvenței când regulatorul este de tip P și motorul de curent continuu are excitație serie, constatăm că aceasta este de fapt raportul a două funcții: la numărător o funcție de gradul doi, iar la numitor o funcție de gradul șapte. Deci bucla închisă de reglare a frecvenței (turației) în componența propusă este fizic realizabilă.

7.2.2. Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței, când regulatorul este de tip PI și motorul de curent continuu funcționează cu excitația serie (viteza de rotație mare)

Această situație corespunde cazului real când frecvența tensiunii generatorului sincron este mai mică decât $f_0 - \Delta f$ sau mai mare decât $f_0 + \Delta f$ (§ 4.1.5), iar regulatorul prezentat în § 5.1.4, figura 5.5, este de tip PI. Modelul matematic al buclei de reglare în acest caz este descris de ecuația 6.53.

Aplicând criteriul lui Nyquist, forma simplificată, celui de-al doilea termen al numitorului din relația amintită, și reprezentând hodograful corespunzător funcției din relația (7.2), urmărim modul în care acesta intersecționează axa reală negativă față de punctul critic $(-1+0j)$.

$$F_{653} = \frac{k_{p1} \cdot k_{c1} \cdot k_{A1} \cdot p_m \cdot k' \cdot k_{OR1} \cdot k_{EM1}}{F \cdot i_T \cdot T_{ir}} \cdot \frac{(1 + s \cdot T_{ir})(1 + 2s \cdot T_m + 3s^2 \cdot T \cdot T_m)}{s^2(1 + s \cdot T_{ic})(1 + s \cdot T_m + s^2 T \cdot T_m)^2(1 + s \cdot T_p)} \quad (7.2)$$

Pentru modelul experimental, parțial calculat și prezentat în § 4.1.7, respectiv

5.1.1 și 5.1.6, ținând cont și de concluziile prezentate în § 7.1.1, constatele de proporționalitate și de timp au valorile stabilite în tabelul 7.2.

Tabelul 7.2

Prezentarea tabelară a constantelor

Nr. crt.	Simbol	Relația de definiție sau paragraful	Valoarea	U.M.
1.	k_{p1}	(6.1), § 6.1.1	0,1	-
2.	k_{c1}	(6.3), § 6.1.2	2,55	-
3.	k_{A1}	(6.6), § 6.1.3	3,13	-
4.	p_m	§ 4.1.6, 5.1.6	1	-
5.	k'	(6.14), § 6.1.4	0,0324	A·s
6.	F	(6.14), § 6.1.4	0,0015	J·s
7.	k_{OR1}	(6.42), § 6.1.5	300+593	s^{-1}
8.	k_{EM1}	(6.49), § 6.17 (fig. 5.6)	0,109	$V \cdot Hz^{-1}$
9.	i_T	(6.32), (6.33), § 6.1.5	34	-
10.	T_{ic}	(6.5), § 6.1.2	$5 \cdot 10^{-4}$	s
11.	T	(6.15), § 6.1.4	0,1008	s
12.	T_m	(6.15), § 6.1.4	0,133	s
13.	T_p	(6.41), § 6.1.6	0,5189+1,0178	s
14.	T_{ir}	(6.7), § 6.1.3	0,0005+1	s

Introducând datele din tabelul de mai sus în programele scrise în limbajul și mediul de programare Maple (anexele nr. 4, 5, 6), pomind de la relația (7.2), au rezultat hodografele prezentate în figurile 7.4+7.6.

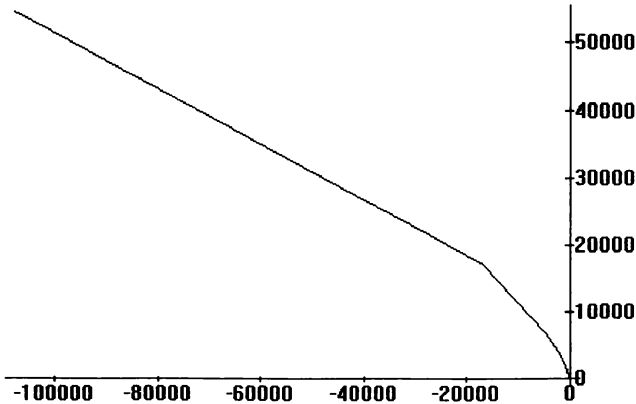


Fig. 7. 4 Hodograful funcției F 653, reprezentat pentru datele din tabelul 7. 2.

Din figura 7.4, reprezentată la o scară liber aleasă de programul Maple, din care rezultă sensul parcurgerii curbei când variabila imaginară se modifică de la zero la infinit, nu putem distinge punctul de intersecție al curbei cu axa reală negativă.

În continuare, am dorit să stabilesc influența valorii constante de timp T_{ir}

asupra stabilității buclei de reglare a frecvenței.

În acest sens, în cadrul unui program de felul celui mai sus amintit am introdus valori diferite pentru constanta de timp T_{ir} ($5 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^1$), rezultând hodografele prezentate în figura 7.5.

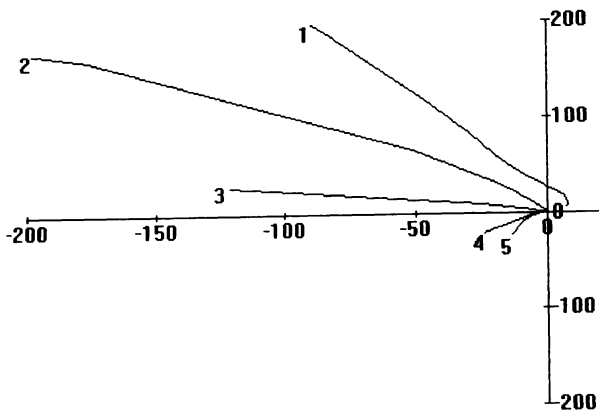


Fig. 7. 5 Hodografele funcției F 653, reprezentate pentru datele din tabelul 7.2, cu T_{ir} având valorile $10^1 \cdot 5 \cdot 10^{-4}$ s.

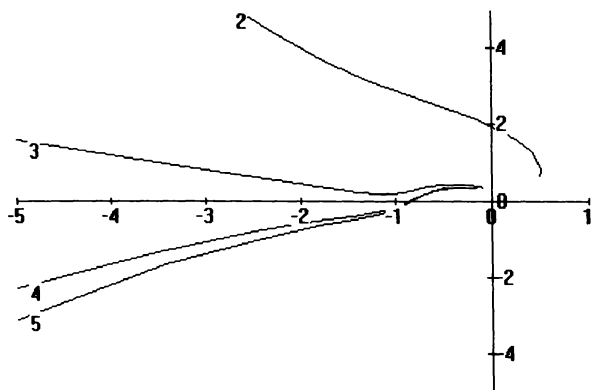


Fig. 7. 6 Hodografele funcției F 653, reprezentate pentru datele din tabelul 7.2, cu T_{ir} având valorile $10^1 \cdot 5 \cdot 10^{-4}$ s, în intervalul $(-5, 1)$.

Din această figură se constată că hodograful 1 nu înconjoară în sens orar punctul critic $(-1+0 \cdot j)$.

Pentru celelalte patru hodografe nu putem trage concluzii din această figură, motiv pentru care ele s-au reprezentat la altă scară în figura 7. 6.

Din această figură se constată că nici celelalte patru hodografe nu înconjoară punctul critic în sens orar, deci funcționarea buclei de reglare a frecvenței rămâne stabilă și pentru celelalte patru valori ale constantei de timp T_{ir} .

Ultimele două valori ale constantei de timp T_{ir} sunt însă cinci, respectiv cincizeci de secunde, deci neinteresante pentru

procesul de optimizare a funcționării buclei de reglare a frecvenței.

În concluzie, pentru valorile constantelor de proportionalitate stabilite în § 7.1.1, pentru orice valoare a constantei de timp T_{ir} , funcționarea buclei de reglare a frecvenței rămâne stabilă.

Utilizarea unui regulator de tip PI aduce cu sine avantajul că eroarea staționară este nulă, pentru semnale treaptă [41]; ori, în funcționarea generatorului sincron

autonom, conectarea sau deconectarea unui consumator constituie un semnal treaptă. Față de semnale rampă sau parabolă, eroarea staționară are o valoare finită diferită de zero, respectiv infinită, deci utilizarea unui regulator de tip PI cu puternic caracter integral nu este recomandată. Acesta este și motivul pentru care voi considera - pentru constanta de timp - o valoare de maximum 0,05 s (caracteristica 3, figurile 7.2 și 7.3).

Analizând relația (6.56), care reprezintă funcția de transfer corespunzătoare buclei închise de reglare a frecvenței când regulatorul este de tip PI și motorul de curent continuu are excitație serie, constatăm că aceasta este de fapt raportul a două funcții: la numărător o funcție de gradul trei, iar la numitor o funcție de gradul opt. Deci bucla închisă de reglare a frecvenței (turației) în componența propusă este fizic realizabilă.

Aplicarea programelor prezentate în anexele 4, 5, 6, utilizând limbajul și mediul de programare Maple, constituie deasemenea o contribuție a autorului în domeniul optimizării funcționării unei bucle de reglare. Aceste programe au caracter de generalitate, putând fi aplicate pentru orice alte valori ale constantelor de proporționalitate și de timp.

Este interesant de analizat comportarea

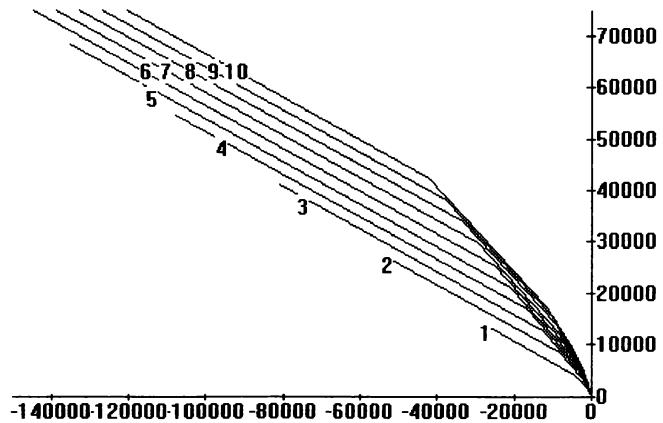


Fig. 7. 7 Hodografele corespunzătoare funcției F 653, pentru $T_{ir}=0,0005$ s și constanta de proporționalitate rezultantă între 1 și de 40 de ori valoarea minimă.

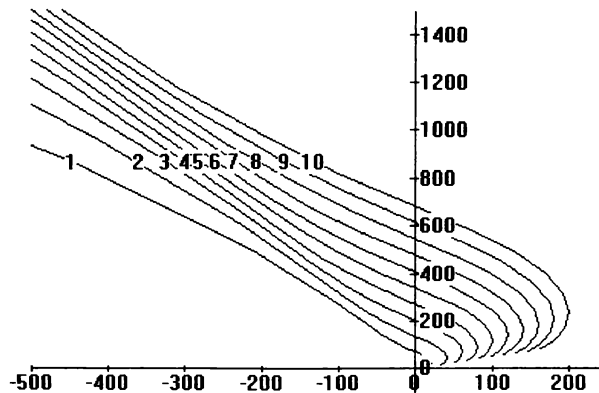


Fig. 7. 8 Hodografele corespunzătoare funcției F 653, pentru $T_{ir}=0,0005$ s și constanta de proporționalitate rezultantă între 1 și de 40 de ori valoarea minimă, în intervalul (-500, 200).

buclei de reglare când se păstrează nemodificată valoarea constantei T_{ir} , modificându-se însă valoarea produsului constantelor de proporționalitate.

Vor fi considerate în continuare cele trei valori pentru constanta de timp T_{ir} mai sus recomandate, adică 0,0005 s, 0,005 s și 0,05 s; vor fi apoi reprezentate hodografele funcțiilor F 653 (relația (7.2)) când produsul constantelor de proporționalitate are valori între 1 și de 40 de ori valorile minime din tabelul 7.1, urmărind stabilitatea buclei de reglare a frecvenței pentru cazurile rezultate.

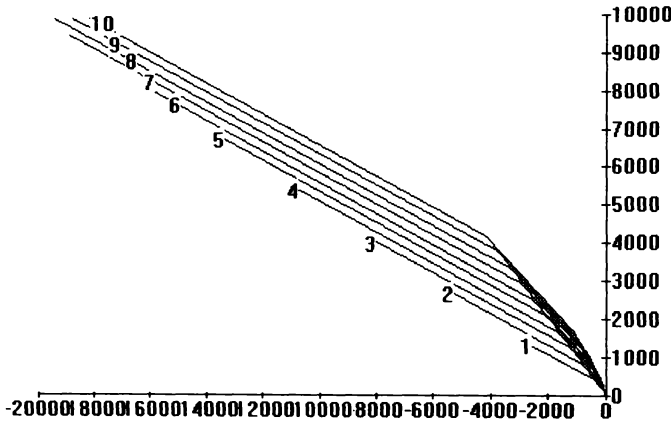


Fig. 7. 9 Hodografele corespunzătoare funcției F 653, pentru $T_{ir}=0,005$ s și constanta de proporționalitate rezultantă între 1 și de 40 de ori valoarea minimă.

Pentru prima valoare a constantei de timp T_{ir} (0,0005 s), hodografele funcției F 653 arată ca în figurile 7.7 și 7.8, fiind realizate cu programele prezentate în anexele 7 și 8.

Din figura 7.7 se constată alura curbelor și comportarea lor în jurul valorii zero a variabilei complexe, însă nu se poate distinge comportarea acestora în

apropierea originii axelor, adică pentru valori ale variabilei complexe tinzând către infinit.

Procedând la reprezentarea hodografelor la o altă scară, rezultă figura 7.8, din care se constată că acestea nici nu intersectează axa reală negativă, deci nu înconjoară în sens orar punctul critic.

În concluzie, când valoarea constantei de timp T_{ir} este 0,0005 s, pentru orice valoare a produsului con-

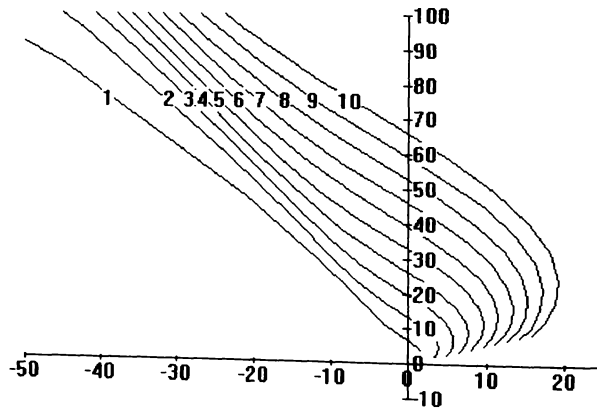


Fig. 7. 10 Hodografele corespunzătoare funcției F 653, pentru $T_{ir}=0,005$ s și constanta de proporționalitate rezultantă între 1 și 40 de ori valoarea minimă, în intervalul (-50, 20).

stantelor de proporționalitate, funcționarea buclei de reglare a frecvenței rămâne stabilă în regim dinamic.

Pentru $T_{ir}=0,005$ s, hodografele funcției F 653 sunt reprezentate în figurile 7.9 și 7.10, realizate utilizând programele prezentate în anexele 9 și 10.

Din figura 7.9 se constată alura curbelor când variabila complexă tinde către zero, dar nu se distinge comportamentul acestora în jurul originii axelor de coordonate când variabila complexă tinde către infinit.

Reprezentând aceleași hodografe la o scară convenabil aleasă (conform anexei 10), rezultă reprezentarea din figura 7.10.

Din această figură se constată că nici una dintre cele zece hodografe nu înconjoară în sens pozitiv punctul critic, deci funcționarea buclei de

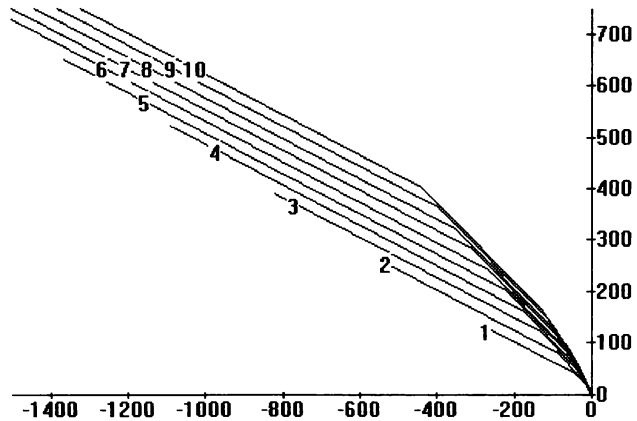


Fig. 7. 11 Hodografele corespunzătoare funcției F 653, pentru $T_{ir}=0,05$ s și constanta de proporționalitate rezultantă între 1 și de 40 de ori valoarea minimă.

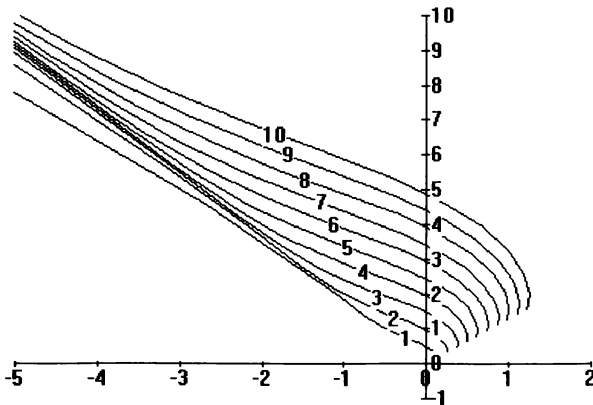


Fig. 7. 12 Hodografele corespunzătoare funcției F 653, pentru $T_{ir}=0,05$ s și constanta de proporționalitate rezultantă între 1 și de 40 de ori valoarea minimă, în intervalul $(-5, 2)$.

reglare a frecvenței este deci stabilă dinamic în toate cele zece situații.

Pentru $T_{ir}=0,05$ s-au în-tocmit programele prezentate în anexele 11 și 12, rezultând hodografele din figurile 7.11 și 7.12.

În figura 7.11 se distinge alura hodografelelor când variabila complexă are valori în jurul valorii zero, dar nu se poate constata

comportarea acestora în jurul axelor de coordonate, adică pentru valori ale va-

riabile complexe tinzând către infinit. Din acest motiv, în figura 7.12 am ales o asemenea scară încât intersecțiile curbelor cu axa imaginară să se distingă fără dubii.

Din această figură se observă că hodografele corespunzătoare celor zece valori ale produsului constantelor de timp nici nu intersectează axa reală negativă, deci nu înconjoară în sens orar punctul critic $(-1+0j)$, astfel încât bucla de reglare a frecvenței pentru cazurile respective rămâne stabilă dinamic.

Din figurile 7.8, 7.10 și 7.12 constatăm că, pe măsură ce valoarea produsului constantelor de

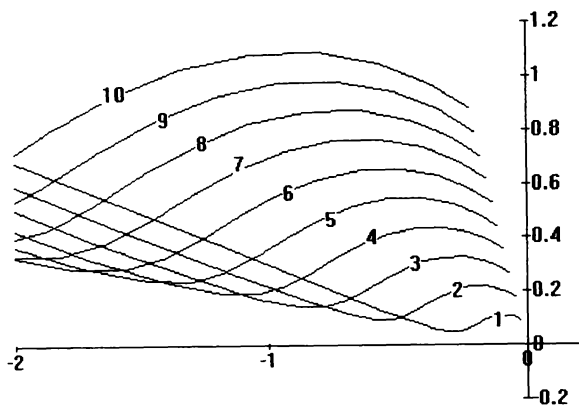


Fig. 7. 13 Hodografele corespunzătoare funcției F 653, pentru $T_{ir}=0,5$ s și constanta de proporționalitate rezultantă între 1 și de 40 de ori valoarea minimă.

proportionalitate crește, intersecția curbei trasate pentru valorile corespunzătoare - cu axa imaginară pozitivă - este tot mai depărtată de originea axelor, deci și pentru valori mai mari ale produsului constantelor de proporționalitate decât cele analizate, bucla de reglare a frecvenței rămâne stabilă dinamic.

În concluzie, utilizarea

unui regulator de tip PI aduce - pe lângă avantajul reducerii erorii staționare, la variații treaptă ale sarcinii - și avantajul că bucla de reglare a frecvenței rămâne stabilă dinamic pentru valori ale produsului constantelor de proporționalitate mai mari decât cele prezentate în tabelul 7.2.

Concluzia anterioară constituie o contribuție a autorului la îmbogățirea literaturii de specialitate referitoare la comportamentul buclelor de reglare ce conțin regulator de tip PI.

Este însă valabilă concluzia de mai sus, pentru orice valoare a constantei de timp T_r ? Pentru a putea răspunde la această întrebare, am investigat în continuare comportarea buclei de reglare a frecvenței și pentru valori ale constantei de timp a regulatorului PI în intervalul (0,5 s, 1 s) (figurile 7.13 și 7.14, anexele 13 și 14).

Dacă pentru $T_{ir}=0,5$ s nici unul dintre hodografele reprezentate nu înconjoară în sens orar punctul critic (figura 7.13), ceea ce înseamnă că bucla de reglare a frecvenței rămâne stabilă dinamic pentru orice valoare a produsului constantelor de timp (mai mare decât cea considerată de bază), confirmând astfel concluzia de mai sus, nu același lucru se întâmplă pentru $T_{ir}=1$ s (figura 7.14).

Se naște firesc întrebarea: care este valoarea limită a constantei de timp a regulatorului PI pentru care rămâne valabilă concluzia exprimată?

Din figura 7.14 se constată că primele trei hodografe (numerotate 1, 2, 3) nu înconjoară punctul critic, corespunzând unor bucle de funcționare a frecvenței stabile dinamic. Celelalte șapte hodografe (numerotate 4+10) înconjoară în sens orar punctul critic $(-1+0j)$, corespunzând deci unei funcționări instabile a buclei de reglare a frecvenței pentru valorile corespunzătoare. Curbele reprezentate în figura 7.14 par a

infirma concluzia de mai sus, dar oferă, în același timp, răspunsul referitor la limita constantei de timp T_{ir} .

Dacă hodo-grafele reprezentate în figura 7.13 pomeau de la curba de bază cu numărul 3 în figura 7.6, hodo-grafele reprezentate în figura 7.14 pomesc de la o altă curbă de bază, de forma celei cu numărul 4 în figura 7.6.

Din a-

ceastă ultimă figură se poate constata că hodo-graful numărul 3 rămâne întotdeauna în cadranul II, în timp ce hodo-graful numărul 4 se află în cadranul III pentru valori ale variabilei complexe tinzând către zero, și numai când variabila complexă tinde către infinit, acesta trece în cadranul II.

Acest comportament sugerează răspunsul la întrebarea exprimată mai sus.

Deci, valoarea maximă a constantei de timp a regulatorului de tip PI este aceea pentru care hodo-graful corespunzător rămâne în cadranul II pentru orice valoare a variabilei complexe.

Această ultimă concluzie constituie și ea o contribuție a autorului la îmbogățirea teoriei regulatorilor de tip PI.

În continuare, autorul și-a propus să stabilească valoarea constantei de timp T_{ir} pentru care hodo-graful funcției F 653 rămâne în totalitate în cadranul II. Pomind de la hodo-graful 3 din figura 7.6, a fost scris un alt program, atribuindu-i-se constantei de timp

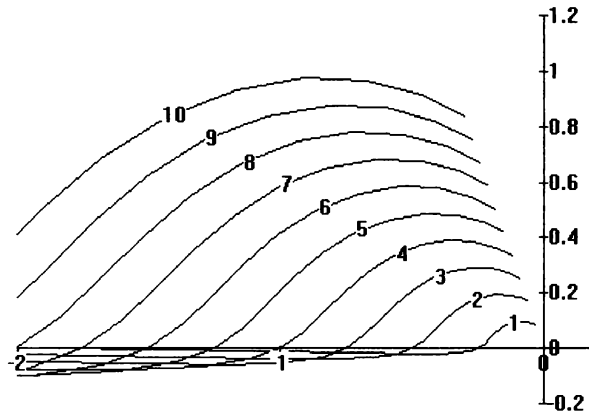


Fig. 7. 14 Hodografele corespunzătoare funcției F 653, pentru $T_{ir}=1$ s și constanta de proporționalitate rezultantă între 1 și de 40 de ori valoarea minimă.

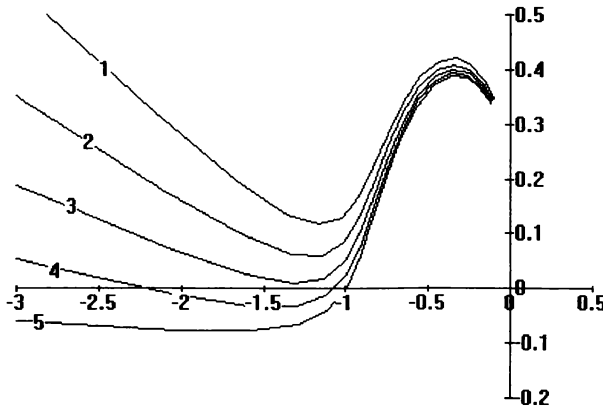


Fig. 7. 15 Hodografele corespunzătoare funcției F 653, pentru $T_{ir}=0,6+1$ s, realizate cu programul din anexa nr. 15.

amintite o creștere de 0,2 s. Au rezultat astfel hodografele 1+5 din figura 7. 15, corespunzătoare valorilor constantei T_{ir} între 0,6 și 1 s.

Din figură rezultă că primele trei hodografe (numerotate 1, 2, 3) rămân tot timpul în cadranul II, iar hodografele 4 și 5 au porțiuni și în cadranul III. Deci, în situația concretă, valoarea maximă a constantei de timp pentru care rămân valabile afirmațiile de mai sus este de 0,8 s. Metoda de determinare a acestei valori constituie deasemenea o contribuție a autorului la teoria privind acordarea optimă a regulatoarelor PI.

7.2.3. Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței, când regulatorul este de tip P și motorul de curent continuu funcționează cu excitație compund (viteza de rotație mică)

Această situație corespunde cazului real când frecvența tensiunii generatorului sincron este mai mare decât $f_0 - \Delta f$, dar mai mică decât $f_0 - \Delta f/2$ sau mai mică decât $f_0 + \Delta f$, dar mai mare decât $f_0 + \Delta f/2$ (§ 4.1.5), iar regulatorul prezentat în § 5.1.4, figura 5.5, este de tip P. Modelul matematic al buclei de reglare în acest caz este descris de ecuația (6.59).

Conform criteriului lui Nyquist, bucla de reglare a frecvenței în această situație este stabilă dinamic dacă hodograful corespunzător celui de-al doilea termen al numitorului din relația amintită nu înconjoară în sens orar punctul de coordonate (-1 + 0j), din planul complex în care acesta este reprezentat. Deci, funcția al cărei hodograf va fi analizat are expresia:

$$F_{659} = k_{659} \cdot \frac{1 + s \cdot c_1 + s^2 \cdot c_2 + s^3 \cdot c_3 + s^4 \cdot c_4}{s(1 + s \cdot T_{ic})[(1 + s \cdot T_f) + s \cdot T_{m1}(1 + s \cdot T_i)(1 + s \cdot T_E)]^2(1 + s \cdot T_p)} \quad (7.3)$$

Tabelul 7.3

Prezentarea tabelară a constantelor

Nr. crt.	Simbol	Relația de definiție sau paragraful	Valoarea	U.M.
1.	k_{p1}	(6.1), § 6.1.1	0,05	-
2.	k_{c1}	(6.3), § 6.1.2	1	-
3.	k_m	(6.12), § 6.1.4	98,36	-
4.	k_{A1}	(6.6), § 6.1.3	1	-
5.	k_{OR1}	(6.42), § 6.1.5	300+593	s^{-1}
6.	k_{EM1}	(6.49), § 6.17 (fig. 5.6)	0,109	$V \cdot Hz^{-1}$
7.	p_m	§ 4.1.6, 5.1.6	1	-
8.	Φ_{t0}	(6.16), § 6.1.4	0,0015	J·s
9.	i_T	(6.32), (6.33), § 6.1.5	34	-
10.	T_{ic}	(6.5), § 6.1.2	$5 \cdot 10^{-4}$	s
11.	T_p	(6.41), § 6.1.6	1,0178	s
12.	T_f	(6.19), § 6.1.4	0,066	s
13.	T_E	(6.19), § 6.1.4	0,1	s
14.	T_{m1}	(6.19), § 6.1.4	0,038	s
15.	T_i	(6.19), § 6.1.4	0,09	s

în care k_{659} este dat de relația următoare:

$$k_{659} = \frac{k_{p1} \cdot k_{c1} \cdot k_{A1} \cdot p_m \cdot k_{OR1} \cdot k_{EM1}}{k_m \cdot \Phi_{t0} \cdot i_T} \quad (7.4)$$

iar constantele $c_1 \div c_4$ au expresiile din relația (6.28).

Pentru reprezentarea hodografului funcției F659 este necesară cunoașterea constantelor de proporționalitate și de timp care intervin în relația (7.3).

Pentru modelul experimental, parțial calculat și prezentat în § 4.1.1÷4.1.7 și 5.1.1÷5.1.6, constantele de mai sus au valorile prezentate în tabelul 7.3.

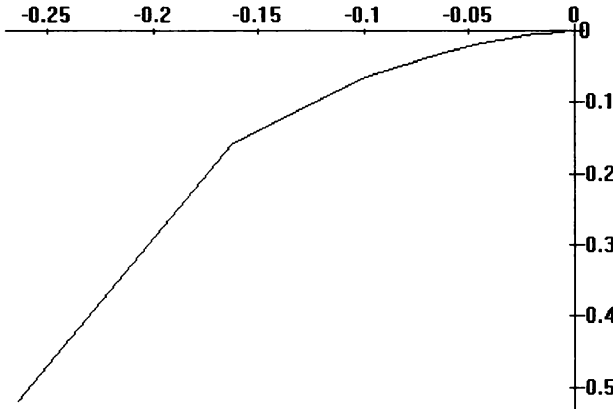


Fig. 7. 16 Hodograful corespunzător funcției F 659, când constantele de proporționalitate au valorile minime.

Introducând datele din tabelul de mai sus în programele scrise în limbajul și mediul de programare Maple (anexele nr. 16, 17, 18), pornind de la relația (7.3), au rezultat hodografele prezentate în figurile 7.16÷7.18.

În figura 7.16 este reprezentat hodograful funcției F 659 pentru cazul când constante-

le de proporționalitate din tabelul 7.3 au valorile minime. Se constată că hodograful nu înconjoară punctul de coordonate $(-1+0j)$ în sens orar, când variabila complexă variază de la zero la infinit.

Deci bucla de reglare a frecvenței este stabilă dinamic și în cazul când motorul de curent continuu lucrează cu turația mică, când constantele de proporționalitate au valorile minime.

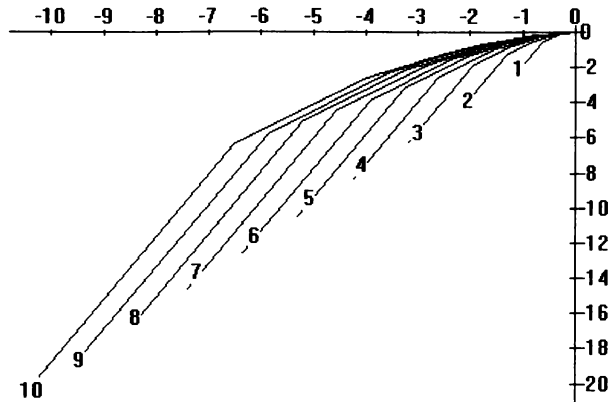


Fig. 7. 17 Hodografele corespunzătoare funcției F 659, când produsul constantelor de proporționalitate are valori între 1 și de 40 de ori valoarea sa minimă.

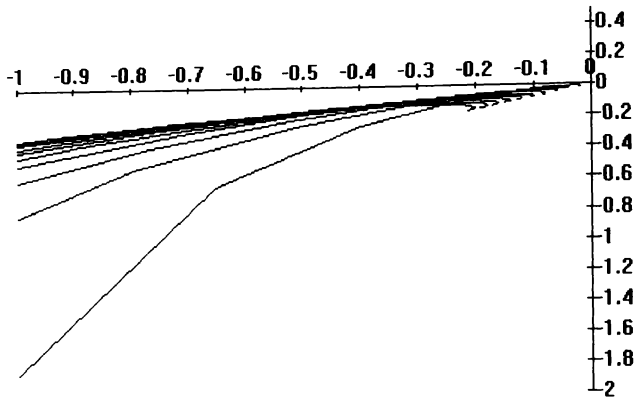


Fig. 7. 18 Hodografele corespunzătoare funcției F 659, când produsul constantelor de proporționalitate are valori între 1 și de 40 de ori valoarea sa minimă, în intervalul (-1, 0).

Din figura 7.3 rezulta că bucla de reglare a frecvenței este stabilă dinamic dacă produsul constantelor de proporționalitate nu depășea de 16 ori valoarea sa minimă. În continuare, se va stabili valoarea maximă a produsului constantelor de proporționalitate pentru care bucla rămâne stabilă dinamic în noile condiții. Pentru a-

ceasta s-a întocmit programul prezentat în anexa 17, hodoografele corespunzătoare fiind reprezentate în figura 7.17.

Din această figură se constată că toate cele zece hodoografe se află în cadranul III și nu înconjoară punctul critic (-1+0j), deci funcționarea buclei rămâne stabilă în toate situațiile prezentate - vezi figura 7.18.

Din această ultimă figură se constată fără dubii că hodoografele pentru cele zece cazuri nu intersectează axa reală negativă.

În procesul acordării buclei de reglare a frecvenței vom ține cont deci doar de restricția ce rezultă din § 7.1, referitoare la valorile maxime ale constantelor de proporționalitate, valori deja prezentate în tabelul 7.2.

7.2.4. Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței, când regulatorul este de tip PI și motorul de curent continuu funcționează cu excitație compund (viteza de rotație mică)

Această situație corespunde cazului real când frecvența tensiunii generatorului sincron este mai mare decât $f_0 - \Delta f$, dar mai mică decât $f_0 - \Delta f / 2$ sau mai mică decât $f_0 + \Delta f$, dar mai mare decât $f_0 + \Delta f / 2$ (§ 4.1.5), iar regulatorul prezentat în § 5.1.4, figura 5.5, este de tip PI. Modelul matematic al buclei de reglare în acest caz este descris de ecuația (6.60).

Conform criteriului lui Nyquist, bucla de reglare a frecvenței în această situație este stabilă dinamic dacă hodoograful corespunzător celui de-al doilea termen al numitorului din relația amintită nu înconjoară în sens orar punctul de coordonate (-1+0j), din planul complex în care acesta este reprezentat. Deci, funcția al cărei hodoagraf va fi analizat are expresia:

$$F_{660} = k_{660} \cdot \frac{(1 + s \cdot T_r)(1 + s \cdot c_1 + s^2 \cdot c_2 + s^3 \cdot c_3 + s^4 \cdot c_4)}{s^2(1 + s \cdot T_w)[(1 + s \cdot T_r) + s \cdot T_m(1 + s \cdot T_i)(1 + s \cdot T_E)]^2(1 + s \cdot T_p)} \quad (7.5)$$

în care k_{660} este dat de relația:

$$k_{660} = \frac{k_{p1} \cdot k_{c1} \cdot k_{A1} \cdot p_m \cdot k_{OR1} \cdot k_{EM1}}{k_m \cdot \Phi_{t0} \cdot i_T \cdot T_{ir}} \quad (7.6)$$

iar constantele $c_1 \div c_4$ au expresiile din relația (6.28).

Tabelul 7.4

Prezentarea tabelară a constantelor

Nr. crt.	Simbol	Relația de definiție sau paragraful	Valoarea	U.M.
1.	k_{p1}	(6.1), § 6.1.1	0,1	-
2.	k_{c1}	(6.3), § 6.1.2	2,55	-
3.	k_m	(6.12), § 6.1.4	98,36	-
4.	k_{A1}	(6.6), § 6.1.3	3,13	-
5.	k_{OR1}	(6.42), § 6.1.5	300+593	s^{-1}
6.	k_{EM1}	(6.49), § 6.17 (fig. 5.6)	0,109	$V \cdot Hz^{-1}$
7.	p_m	§ 4.1.6, 5.1.6	1	-
8.	Φ_{t0}	(6.16), § 6.1.4	0,0015	J·s
9.	i_T	(6.32), (6.33), § 6.1.5	34	-
10.	T_{ic}	(6.5), § 6.1.2	$5 \cdot 10^{-4}$	s
11.	T_p	(6.41), § 6.1.6	1,0178	s
12.	T_f	(6.19), § 6.1.4	0,066	s
13.	T_E	(6.19), § 6.1.4	0,1	s
14.	T_{m1}	(6.19), § 6.1.4	0,038	s
15.	T_i	(6.19), § 6.1.4	0,09	s
16.	T_{ir}	(6.7), § 6.1.3	0,0005+0,8	s

Pentru reprezentarea hodografului funcției F 660 este necesară cunoașterea constantelor de proporționalitate și de timp care intervin în relația (7.6), date prezentate în tabelul 7.4.

Introducând datele din acest tabel în programele prezentate în anexele 19, 20 și 21, pornind de la relația (7.5), au rezultat hodografele din figurile 7.19 ÷ 7.21.

Din figura 7.19, reprezentată la o scară liber aleasă de către program, rezultă alura hodografului când variabila comple-

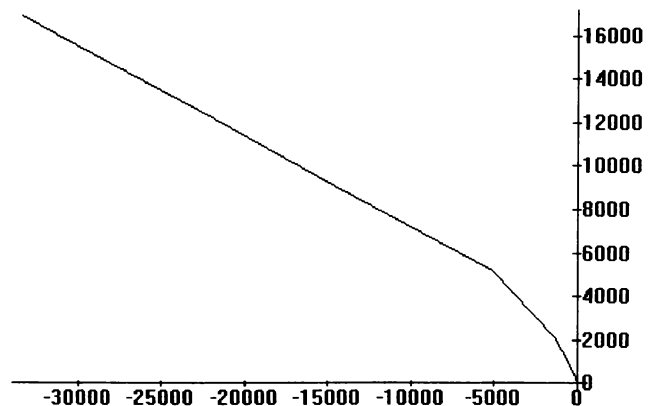


Fig. 7. 19 Hodograful funcției F 660, reprezentat pentru datele din tabelul 7.4.

xă tinde către zero (valorile mari ale părții reale, respectiv imaginare).

Din această figură se constată că hodograful se află în cadranul II, dar nu se

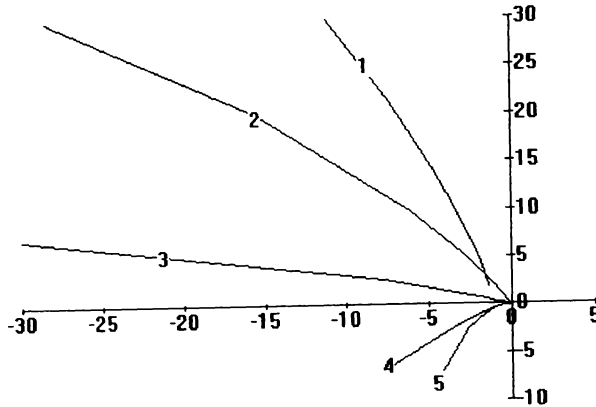


Fig. 7. 20 Hodografele funcției F 660, reprezentate pentru datele din tabelul 7.4, cu T_{ir} având valori $5 \cdot 10^{-4}$ s.

rent continuu are excitație compund. În anexă este prezentat un program în care am

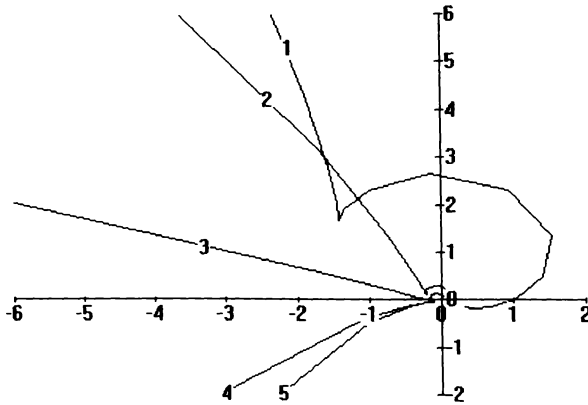


Fig. 7. 21 Hodografele funcției F 660, în intervalul (-6, 2).

respectiv $+\infty$, iar celelalte două hodografe (numerotate 4, 5) se situează în cadranul III, părțile reală și imaginară tinzând amândouă către $-\infty$.

Primele trei hodografe sunt reprezentate pentru valori ale constantei T_{ir} de 0,005 s, 0,05 s și respectiv 0,5 s, deci valori inferioare celei stabilite în § 7.2.2 ($T_{ir}=0,8$ s). Din figura 7.20 nu rezultă clar comportamentul hodografelor atunci când variabila complexă tinde către infinit. Reprezentând hodografele la o altă scară, conform programului prezentat în anexa 7.21, rezultă figura 7.21, din care se constată clar că nici unul dintre cele cinci hodografe nu înconjoară în sens orar punctul critic.

distinge comportamentul acestuia în apropierea originii axelor, adică atunci când variabila complexă tinde către infinit.

Vom constata comportamentul hodografului în apropierea originii, concomitent cu stabilirea influenței valorii constantei de timp T_{ir} asupra stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de curent continuu are excitație compund.

În anexă este prezentat un program în care am introdus diferite valori pentru constanta de timp, rezultând hodografele redate în figura 7.20. Din această figură se constată că, pentru variabilă complexă tinzând către zero, trei dintre hodografe se situează în cadranul II (numerotate 1, 2, 3), părțile reală, respectiv imaginară tinzând către $-\infty$,

Așadar, buclele de reglare corespunzătoare constantelor de proporționalitate din tabelul 7.4 și celor cinci valori ale constantei de timp T_{ir} rămân deci stabile dinamic.

Concluziile stabilite în finalul § 7.2.2, referitoare la valoarea maximă a constantei de timp T_{ir} , pentru care bucla de reglare a frecvenței rămâne stabilă dinamic, indiferent de valoarea produsului constantelor de proporționalitate, se verifică și în acest caz.

Deci bucla de reglare a frecvenței asigură o funcționare stabilă dinamic în toate cele patru cazuri analizate.

7.3. Analiza stabilității buclei de reglare a tensiunii

Relația (6.76), care reprezintă funcția de transfer a buclei de reglare a tensiunii generatorului sincron, corespunde unui element PT_2 tipic [41], a cărui analiză - referitoare la stabilitate - se poate face ușor. Relația (6.78), stabilită pentru cazul în care se ia în considerare și constantă de timp a excitației, este corespunzătoare unui element PT_3 tipic - dacă cele trei constante de timp au valori comparabile.

Este comod să analizăm stabilitatea buclei de reglare a tensiunii utilizând calculatorul, pentru a reprezenta hodografele corespunzătoare fiecărui caz.

7.3.1. Analiza stabilității buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației

Conform criteriului Nyquist, bucla de reglare a valorii tensiunii generatorului sincron este stabilă dinamic dacă hodograful corespunzător celui de-al doilea termen al numitorului din relația (6.76) nu înconjoară în sens orar punctul critic $(-1+0j)$ din planul complex, când variabila complexă „s” variază de la zero la infinit.

Deci funcția al cărei hodograf se va analiza are expresia

$$F_{676} = \frac{k_{A_2} \cdot k_{E_2} \cdot k_{OR_2} \cdot k_{EM_2}}{(1 + s \cdot T_{E_2})(1 + s \cdot T_{OR_2})}. \quad (7.7)$$

Pentru reprezentarea hodografului este necesară cunoașterea constantelor de proporționalitate și de timp ce intervin în relația (7.7), ce sunt prezentate în tabelul 7.5.

Tabelul 7.5

Prezentarea tabelară a constantelor

Nr. crt.	Simbol	Relația de definiție sau paragraful	Valoarea	U.M.
1.	k_{p2}	(6.62), § 6.3.1	1	-
2.	k_{c2}	(6.64), § 6.3.2	1	-
3.	k_{A_2}	(6.65), § 6.3.3	1÷10	-
4.	k_{E_2}	(6.67), § 6.3.4	128,5	-
5.	k_{OR_2}	(6.71), § 6.3.6	0,9463÷1,656	-
6.	k_{EM_2}	(6.73), § 6.3.7 (fig. 5.10)	202	-
7.	T_{E_2}	(6.67), § 6.3.4	0,001÷0,009	s
8.	T_{OR_2}	(6.72), § 6.3.6	0,112÷0,196	s

Pentru reprezentarea hodografului funcției F_{676} este necesară cunoașterea constantelor de proporționalitate și de timp care intervin în relația (7.7), date prezentate în tabelul 7.5.

La determinarea constantelor prezentate în tabelul de mai sus s-au avut în vedere valorile rezistoarelor calculate, valoarea tensiunii continue furnizate de redresorul trifazat monoalternanță - în regim nominal de funcționare (257 V), valoarea tensiunii de

comandă a circuitului β AA 145 - în regim nominal de funcționare (2 V), indicațiile bibliografice [35], relația între fluxul de excitație și tensiunea electromotoare ($U_e=4,44 \cdot f \cdot N \cdot k_B \cdot \Phi = c_1 \cdot \Phi = 39.214 \Phi$), valoarea rezistenței circuitului de excitație al generatorului sincron (59,3 Ω). Variația fluxului în funcție de curentul de excitație (sau, la altă scară, variația tensiunii electromotoare induse, în funcție de curentul de excitație) - în jurul unui punct staționar de funcționare - a rezultat din caracteristicile generatorului sincron [73], stând la baza calculului constantelor K_{OR2} și T_{OR2} .

Cu datele din tabelul 7.5 s-au întocmit programele din anexele 22+25, rezultând

hodografele din figurile 7.22+7.25. Din figura 7.22, rezultată pentru cazul când variabila complexă ia valori între 0 și 100, se constată comportamentul funcției în jurul originii variabilei complexe, dar nu rezultă comportamentul funcției în jurul originii axelor din planul complex de reprezentare.

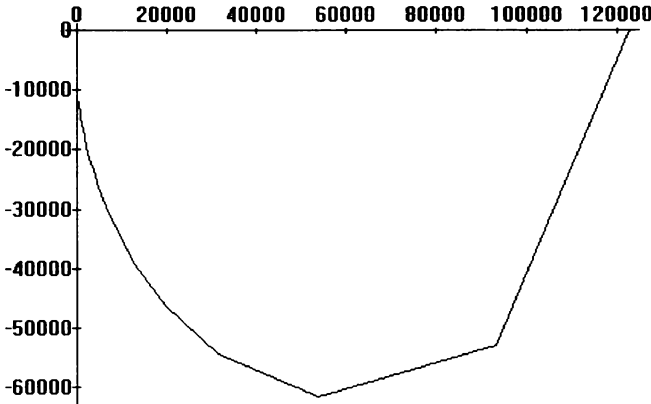


Fig. 7. 22 Hodograful funcției F 676, pentru valori ale variabilei complexe între 0 și 100 j.

Pentru a constata acest

lucru, am procedat la întocmirea unui program pentru valori ale variabilei complexe între 100 j și 1.000 j (anexa 23), rezultând o porțiune de hodograf redată în figura 7.23.

Din figura alăturată se poate constata că hodograful a trecut din cadranul IV în cadranul III, întorcându-se către originea axelor planului complex de reprezentare.

Nici acum nu se poate distinge cum se va comporta hodo-

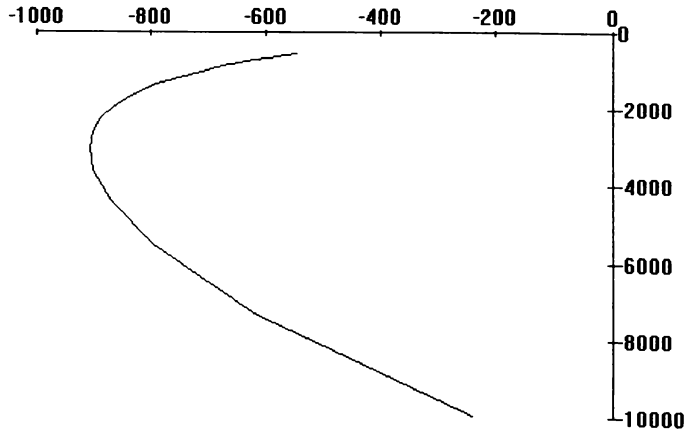


Fig. 7. 23 Hodograful funcției F 676, pentru valori ale variabilei complexe între 100 j și 1.000 j.

graful când variabila complexă tinde către infinit. De aceea, am întocmit programul anexat cu numărul 24, în care variabila complexă ia valori între $1.000\text{-}j$ și $13.500\text{-}j$. A rezultat porțiunea din hodograf redată în figura 7.24.

Cum nici din această figură nu rezultă comportamentul hodografului în apropierea originii axelor planului complex, am recurs la un nou program, în care variabila complexă variază între $13.500\text{-}j$ și $60.000\text{-}j$ (anexa 25), rezultând porțiunea de hodograf din figura 7.25. De această dată, se constată fără dubii că hodograful

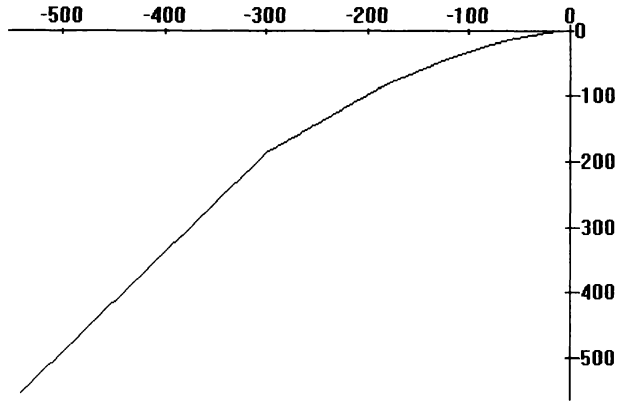


Fig. 7. 24 Hodograful funcției F 676, pentru valori ale variabilei complexe între $1.000\text{-}j$ și $13.500\text{-}j$.

funcției F 676 nu înconjoară în sens orar punctul critic $(-1+0\text{-}j)$, deci bucla de reglare a tensiunii generatorului sincron este stabilă dinamic, pentru valorile constantelor prezentate în tabelul 7.5.

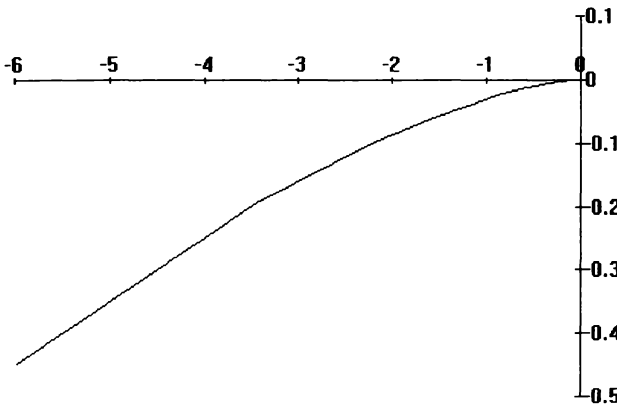
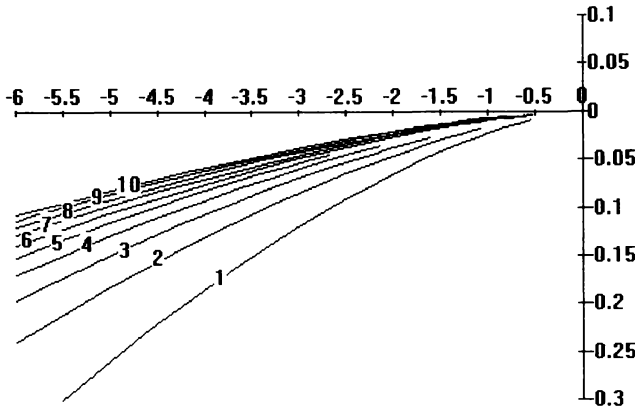


Fig. 7. 25 Hodograful funcției F 676, pentru valori ale variabilei complexe între $13.500\text{-}j$ și $60.000\text{-}j$.

Trebuie să admitem că fără ajutorul calculatorului electronic, această verificare ar fi fost foarte dificilă, și puțini automatiști s-ar fi încumetat să verifice poziția punctului critic față de hodograf.

Din analiza efectuată se constată că bucla de reglare a valorii tensiunii este stabilă dinamic pentru valorile minime ale constantelor din tabelul 7.5. În continuare, se va analiza comportarea buclei de reglare a tensiunii pentru diferite valori ale produsului constantelor de proporționalitate - între valoarea minimă și maximă rezultate din tabelul 7.5.



În acest sens, a fost întocmit programul anexat cu numărul 26, rezultând hodo-grafele din figura alăturată, reprezentate pentru valori ale variabilei complexe cuprinse între $13.500j$ și $150.000j$. Din figură rezultă că bucla de reglare a tensiunii rămâne stabilă dinamic pentru orice valoare a produsului constantelor de proporționalitate cuprinse între 24.563 și 429.850 .

Fig. 7. 26 Hodografele funcției F 676, pentru valori ale variabilei complexe între 13.500 și $60.000j$ și ale produsului constantelor de proporționalitate cuprinse între 24.563 și 429.850 .

telor de proporționalitate, între limitele ce rezultă din tabelul 7.5.

Pentru a avea certitudinea că bucla de reglare a tensiunii rămâne stabilă dinamic pentru orice valoare a constantelor de proporționalitate și de timp din tabelul 7.5, am investigat comportamentul acesteia și pentru valorile maxime ale constantelor de timp amintite.

Introducând valorile acestora în programul din anexa 27, și - pentru întreaga gamă de valori a produsului constantelor de proporționalitate - au rezultat hodo-grafele reprezentate în figura 7.27 (porțiunile lor situate în apropierea originii axelor planului complex de reprezentare). Se constată că nici unul dintre hodo-grafe nu înconjoară punctul critic, deci bucla de reglare a tensiunii generatorului sincron rămâne stabilă dinamic pentru orice combinație de valori ale constantelor de proporționalitate sau de timp din tabelul 7.5.

Am continuat investigația pentru varianta când amplificatorul regulator din bu-

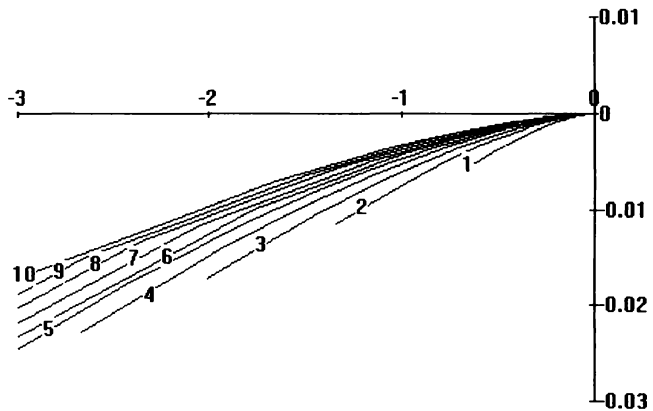


Fig. 7. 27 Hodografele funcției F 676, pentru valori ale produsului constantelor de proporționalitate cuprinse între 24.563 și 429.850 și pentru valorile maxime ale constantelor de timp.

cla de reglare a tensiunii este de tip PI. Funcția de transfer a buclei amintite rezultă în acest caz pornind de la relația 6.76.

$$Y_{2i}(s) = \frac{k_{p_2} \cdot k_{c_2} \cdot k_{A_2} \cdot k_{E_2} \cdot k_{OR_2} \cdot (1 + s \cdot T_{i_2})}{T_{i_2} \cdot s \cdot (1 + s \cdot T_{E_2}) (1 + s \cdot T_{OR_2})} \cdot \left(1 + \frac{k_{p_2} \cdot k_{c_2} \cdot k_{A_2} \cdot k_{E_2} \cdot k_{OR_2} \cdot k_{EM_2} \cdot (1 + s \cdot T_{i_2})}{T_{i_2} \cdot s \cdot (1 + s \cdot T_{E_2}) (1 + s \cdot T_{OR_2})} \right) \quad (7.8)$$

Pentru a analiza stabilitatea buclei de reglare a tensiunii în acest caz, este necesar să reprezentăm hodograful funcției F' 676, care are expresia următoare:

$$F'_{676} = \frac{k_{p_2} \cdot k_{c_2} \cdot k_{A_2} \cdot k_{E_2} \cdot k_{OR_2} \cdot k_{EM_2} \cdot (1 + s \cdot T_{i_2})}{T_{i_2} \cdot s \cdot (1 + s \cdot T_{E_2}) (1 + s \cdot T_{OR_2})} \quad (7.9)$$

Cu datele din tabelul 7.6 s-au întocmit programele din anexele 28 și 29, rezultând hodografele din figurile 7.28 (reprezentate pentru valori ale variabilei complexe între 100.j și 150.000.j, din care se constată alura acestora) și 7.29 (reprezentate pentru valori ale variabilei complexe între 12.000.j și 150.000.j; din acestea se constată comportamentul lor, în apropierea originii axelor planului complex de reprezentare).

Tabelul 7.6

Prezentarea tabelară a constantelor

Nr. crt.	Simbol	Relația de definiție sau paragraful	Valoarea	U.M.
1.	k_{p_2}	(6.62), § 6.3.1	1	-
2.	k_{c_2}	(6.64), § 6.3.2	1	-
3.	k_{A_2}	(6.65), § 6.3.3	1÷10	-
4.	k_{E_2}	(6.67), § 6.3.4	128,5	-
5.	k_{OR_2}	(6.71), § 6.3.6	0,9463÷1,656	-
6.	k_{EM_2}	(6.73), § 6.3.7 (fig. 5.10)	202	-
7.	T_{E_2}	(6.67), § 6.3.4	0,001÷0,009	s
8.	T_{OR_2}	(6.72), § 6.3.6	0,112÷0,196	s
9.	T_{i_2}	-	0,0005÷0,2	s

Se constată că în apropierea originii axelor de coordonate din planul complex (figura 7.29) hodografele rămân în cadranul II. Nu ne putem pronunța asupra stabilității buclei de reglare a tensiunii înainte de a ști în ce cadran se află porțiunea hodografului funcției F'676, când variabila complexă „s” tinde către zero. Comportamentul hodografului în acest caz rezultă din figura 7.30, realizată cu ajutorul programului prezentat în anexa 30.

Din această figură se constată că porțiunea „de început” a hodografului funcției amintite se află în cadranul III, trecând în cadranul II prin intersectarea axei reale negative în jurul valorii de $-3,84 \cdot 10^6$. Din figura 7.29 se constată că hodografele funcției F'676, reprezentate pentru valori ale produsului constantelor de proporționalitate între limitele rezultate din tabelul 7.6 înconjoară punctul critic (-1+0.j) în sens orar, deci -

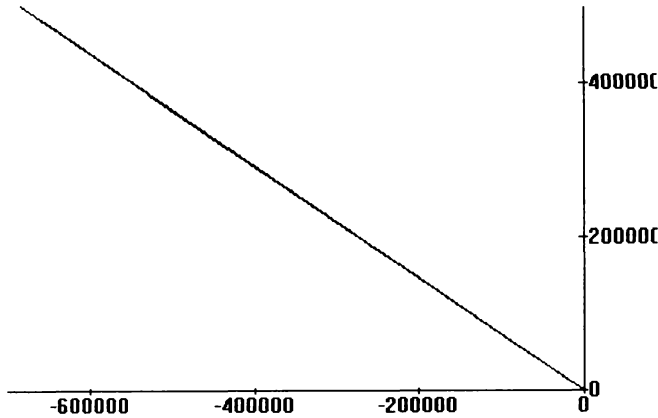


Fig. 7.28 Hodografele funcției F^*676 , când produsul constantelor de proporționalitate are valori între 24.563 și 429.850, iar $T_{12}=5 \cdot 10^{-4}$ s, pentru „s” $\in (100 \cdot j+60.000 \cdot j)$.

pentru valoarea constantei $T_{12}=5 \cdot 10^{-4}$ s - bucla de reglare a tensiunii generatorului sincron este instabilă dinamic.

Am continuat investigația pentru valori ale constantei de timp T_{12} între $5 \cdot 10^{-4}$ s și 0,2 s, și valori ale produsului constantelor de proporționalitate între valorile minimă și maximă rezultate din tabelul 7.6, cu scopul de a

constat dacă există valori ale acestei constante de timp pentru care bucla de reglare a tensiunii este stabilă dinamic.

În acest sens, am întocmit programul din anexa 31. Hodografele corespunzătoare sunt redate în figura 7.31.

Cum din figura 7.30 rezultă că partea „de început” a hodo-grafului funcției F^*676 se află în cadrantul III, s-a căutat să se stabilească valoarea constantei de timp T_{12} pentru care hodo-graful amintit rămâne tot timpul în cadrantul III. În programul din anexa 31 am stabilit o creștere a constantei T_{12} în trei decade. Din figura 7.31 rezultă că - pentru

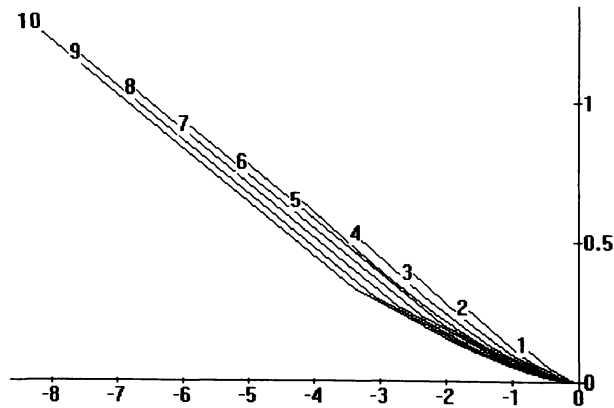


Fig. 7.29 Hodografele funcției F^*676 , când produsul constantelor de proporționalitate are valori între 24.563 și 429.850, iar $T_{12}=5 \cdot 10^{-4}$ s, pentru „s” $\in (12.000 \cdot j+150.000 \cdot j)$.

valori ale constantei T_{12} de $5 \cdot 10^{-4}$ s și $5 \cdot 10^{-3}$ s - hodo-grafele corespunzătoare (1 și 2) au porțiuni în cadrantul II, deci corespund unor bucle de reglare a tensiunii instabile dinamic. Hodografele 3 și 4 corespunzând valorilor constantei de timp T_{12} de $5 \cdot 10^{-2}$ s și respectiv

$5 \cdot 10^{-1}$ s, au partea „de sfârșit” în cadranul III. Cum și partea „de început” a hodo-grafelor funcției F'676 era în cadranul III (figura 7.30), am putea, „în grabă”, să afirmăm că pentru aceste valori ale constantei de timp, bucla de reglare a tensiunii este stabilă dinamic.

Se continuă însă investigația din două motive:

- pentru a determina mai exact valoarea minimă a constantei de timp T_{i2} pentru care hodo-grafele funcției F'676 rămân în cadranul III, sau trec în cadranul II fără să înconjoare în sens orar punctul critic;

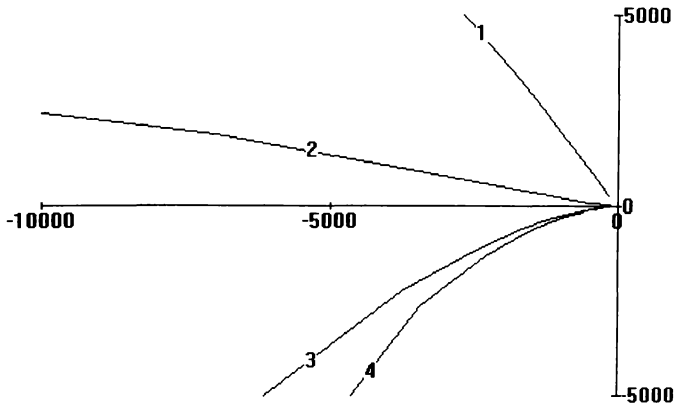


Fig. 7.31 Hodografele funcției F'676, când T_{i2} are valori între $5 \cdot 10^{-4}$ s și 0,5 s, pentru „s” $\in (0; j \pm 1.000; j)$.

deci unor situații în care bucla de reglare a tensiunii este instabilă dinamic.

Figura 7.32 răspunde celor două probleme de mai sus, **putându-se stabili valoarea minimă a constantei de timp T_{i2} , și anume 0,007 s, după care bucla de reglare a tensiunii rămâne stabilă dinamic pentru datele din tabelul 7.6.**

Metoda de investigare prezentată, precum și concluzia referitoare la comportamentul buclei de reglare a tensiunii cu regulator de tip PI, constituie deaseme-

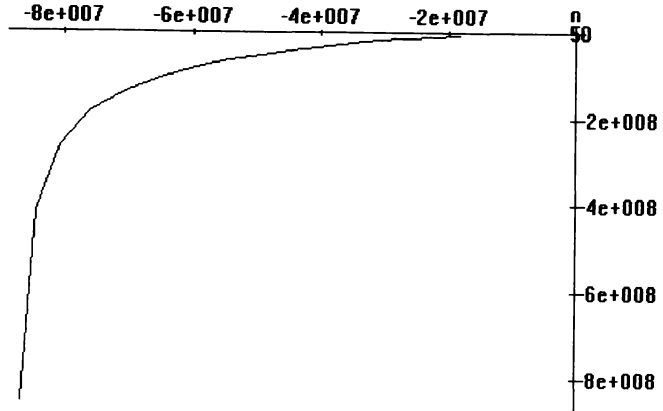


Fig. 7.30 Hodografele funcției F'676, când $T_{i2} = 5 \cdot 10^{-4}$ s, pentru „s” $\in (0; j \pm 10; j)$.

- pentru a stabili fără dubii dacă hodo-grafele corespunzătoare unor valori ale constantei de timp T_{i2} superioare celei minime stabilite mai sus înconjoară sau nu în sens orar punctul critic.

Din figura 7.32 se constată că primele trei hodo-grafe înconjoară în sens orar (1, 2) sau trec (3) prin punctul critic, corespunzând

nea o contribuție a autorului la îmbogățirea literaturii de specialitate.

Deși programele prezentate în anexele 28+30 sunt scrise pentru valori concrete ale constantelor de proporționalitate și de timp, prin modificări minime ele se pot aplica

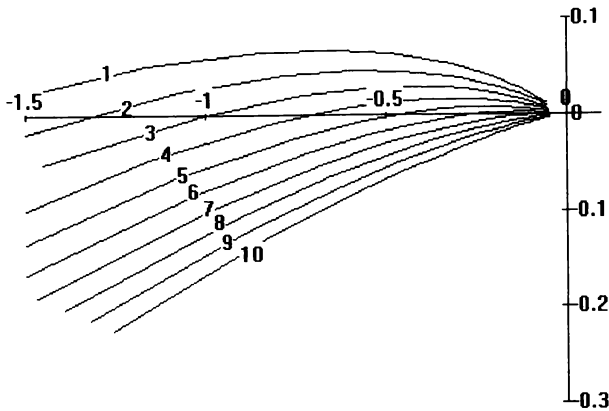


Fig. 7.32 Hodografele funcției $F'676$, când T_{i2} are valori între $5 \cdot 10^{-3}$ s și 0,05 s, pentru „s“ $\in (35-j+200-j)$.

în orice situație în care numărul termenilor ce conțin constante de timp nu se modifică.

Această afirmație conferă programelor și metodei de investigare aplicate un caracter de generalitate, constituind un aport original al autorului la teoria reguletoarelor de tip PI - în ceea ce privește acordarea lor optimă.

□

PREZENTAREA MODELULULUI EXPERIMENTAL ȘI A REZULTATELOR ÎNCERCĂRILOR ACESTUIA

8.1. Prezentarea modelului experimental al microrhidrocentralei

Realizarea modelului experimental al microrhidrocentralei a însemnat materializarea schemei bloc prezentată în figura 3.5 din § 3.1.

În acest sens, a fost proiectat și executat un generator sincron, având parametrii prezentați în § 5.1.2, care a fost asamblat cu o turbină de tip Banky - 0,25, cu caracteristicile prezentate în § 5.1.1, modificată în cadrul fostului Institut de Subingineri Reșița.

Grupul turbină - generator sincron, împreună cu dulapul de automatizare, s-au montat într-o clădire construită pe cursul apei, în avalul Lacului Mare de la Dognecea.

Aducțiunea apei în turbină se face cu ajutorul unei conducte cu diametrul de 250 mm (figura 8.1), iar evacuarea ei se face prin cădere liberă, în apa râului, sub clădire.

Căderea de calcul a apei din baraj este de 10 m (în funcție de frecvența ploilor, căderea de apă H este cuprinsă între 7,1 și 12,8 m).

Barajul a fost renovat în perioada 1980-1989, timp în care s-a construit și clădirea, cu destinație specială pentru amplasarea unei microrhidrocentrale, care trebuia să asigure iluminatul barajului precum și iluminatul și consumul casnic al cabanei aparținând fostului Oficiu de Gospodărire a Apelor, actualmente proprietate a R.A. Apele Române - Exploatarea Reșița.

În figurile 8.2 și 8.3 sunt redată amplasamentele barajului și a clădirii.

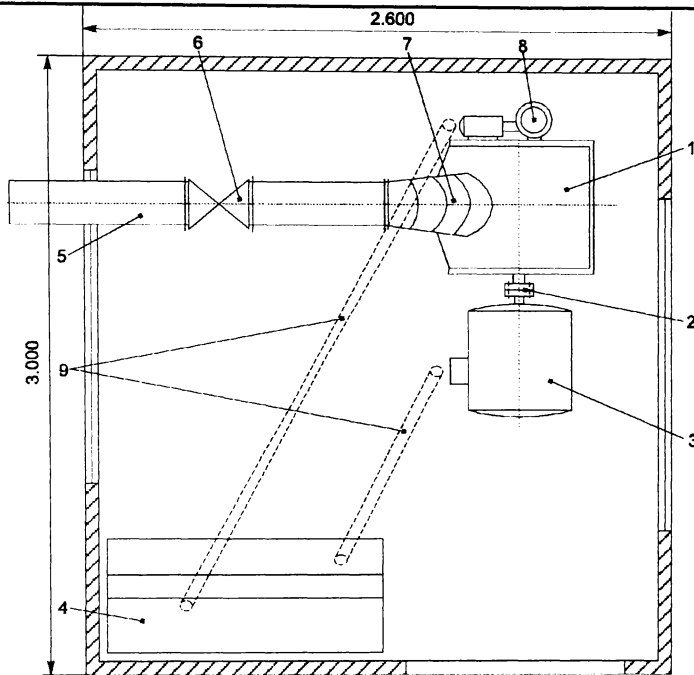


Fig. 8. 1 Schema de amplasare a turbinei Banky, a generatorului sincron, a dulapului de automatizare și a aducțiunii: 1 - turbina Banky - 0,25; 2 - cuplaj turbină - generator sincron; 3 - generator sincron; 4 - dulap de automatizare; 5- conducta de aducțiune; 6 - vană DN 200; 7 - reducție; 8 - organul de reglare; 9 - trasee subterane de cabluri.

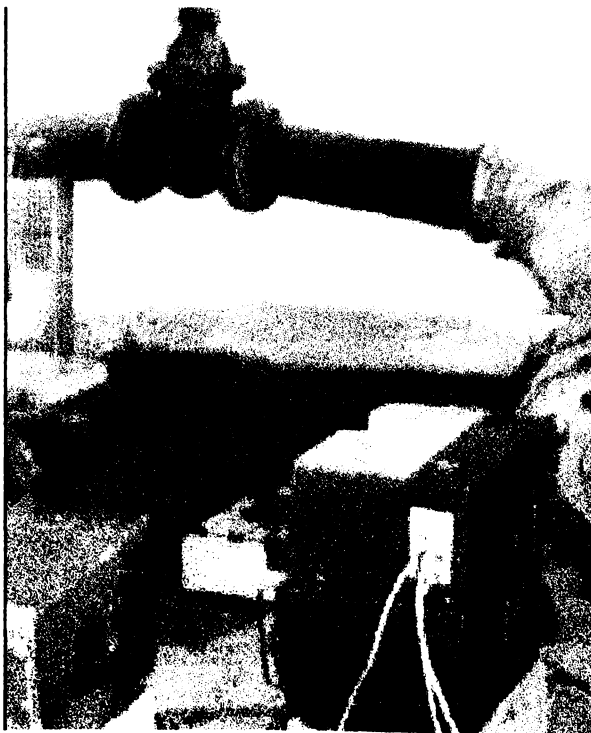


Fig. 8. 2 Vedere de ansamblu a barajului și a clădirii microhidrocentralei.



Fig. 8. 3 Vedere de ansamblu a clădirii microhidrocentralei.

Fig. 8. 4 Vedere din interiorul clădirii microhidrocentralei.



În figura 8.4 este prezentat grupul turbină hidraulică - generator sincron din interiorul clădirii.

În figurile 8.5 și 8.6 este redat dulapul de automatizare în ansamblu, respectiv o vedere interioară.



Fig. 8. 5 Vedere de ansamblu a dulapului de automatizare.



Fig. 8. 6 Vedere interioară a dulapului de automatizare: 1- bloc electronic, conținând partea de comandă a celor două bucle de reglare; 2 - redresor cu comportare mixtă; 3 - bloc de rele; 4- bloc de măsură.

8.2. Prezentarea rezultatelor încercărilor modelului experimental

8.2.1 Comportamentul blocului de alimentare

Din figura 3.1, redată în § 3.1, rezultă că sursa stabilizată de tensiune 6 este alimentată chiar de la bornele generatorului sincron autoexcitat. Acest lucru a condus la acordarea unei atenții sporite în ceea ce privește realizarea ei, urmărindu-se ca aceasta să asigure alimentarea blocurilor electronice chiar și atunci când tensiunea generatorului sincron scade sub valoarea limită admisă (198 V), situație ce poate apărea pentru foarte scurt timp la pomirea unui motor asincron.

Sursa stabilizată utilizează un transformator monofazat având două secundare izolate, două redresoare și circuitele integrate specializate de tip 7815, 7915, 7812 și 7912, ce asigură tensiuni stabilizate de ± 15 V c.c. și ± 12 V c.c.

În tabelul 8.1 sunt prezentate rezultatele măsurătorilor efectuate cu sursa stabilizată, alimentată cu tensiune alternativă cuprinsă între 150÷250 V. Din tabel se constată că tensiunea minimă la care sursa își păstrează proprietățile stabilizatoare este de 160 V, valoare inferioară celei minim admise ($U_n = 10\% U_n$).

Tabelul 8.1

$U_1 \sim [V]$	$U_{-15} [V]$	$U_{+15} [V]$	$U_{-12} [V]$	$U_{+12} [V]$	$U_{21} [V]$	$U_{22} [V]$
250	-15,3	15,5	-12,3	12,4	19,5	19,5
240	-15,2	15,5	-12,3	12,4	19,0	19,0
230	-15,2	15,5	-12,3	12,4	18,0	18,0
220	-15,2	15,5	-12,3	12,4	17,0	17,0
210	-15,2	15,5	-12,3	12,4	16,3	16,4
200	-15,2	15,5	-12,3	12,4	15,8	15,9
190	-15,2	15,5	-12,3	12,4	14,7	14,9
180	-15,2	15,5	-12,3	12,4	14,0	14,1
170	-15,2	15,2	-12,3	12,4	13,2	13,4
160	-14,8	14,8	-12,3	12,4	12,5	12,7
150	-13,6	13,2	-12,3	11,8	11,7	11,9

În tabelul 8.1, tensiunile U_{21} și U_{22} sunt valorile efective ale tensiunilor la bornele celor două secundare ale transformatorului. Încercarea surselor stabilizate s-a efectuat pentru curentul maxim cerut de blocurile electronice: 100 mA - pentru sursele ce asigură ± 15 V., respectiv 20 mA - pentru sursele de ± 12 V.

Din încercările practice efectuate pe microhidrocentrala realizată, pentru variații ale sarcinii suportate de puterea hidrolică a căderii de apă, nu s-au constatat scăderi ale tensiunii de fază ale generatorului sub 198 V, deci tensiunile furnizate de sursele stabilizate au rămas constante.

Realizarea sursei de tensiune stabilizată utilizând componentele electronice amintite asigură alimentarea blocurilor electronice de reglare a tensiunii, respectiv a frecvenței, fără a utiliza transformatoare de compundare sau alte elemente neliniare, care ar complica schema, neaducând rezultate mai bune (vezi figura 1.17).

8.2.2 Comportamentul buclei de reglare a tensiunii

Din figurile 3.4 și 3.5 rezultă că în bucla de reglare a tensiunii intervin: generatorul sincron, redresorul necomandat - utilizat ca element de măsurare, elementul de prescriere, de comparare și de amplificare a erorii, dispozitivul de comandă pe grilă și redresorul trifazat cu comportare mixtă - utilizat ca element de execuție (vezi și figura 6.4).

A. Caracteristicile generatorului sincron

Generatorul sincron a fost proiectat și realizat de către autor pornind de la un motor asincron cu rotor bobinat de tip CMR de 15 kW. Rotorul generatorului s-a realizat prin frezare din OL 37 masiv, tălpile polare având un astfel de profil încât să realizeze un întrefier invers cosinusoidal, fiind fixate pe poli cu șuruburi (figura 8.7). Această construcție se comportă, din punct de vedere electric, ca și o colivie de amortizare. Câmpul magnetic remanent are o valoare suficient de mare pentru a induce o tensiune electromotoare la bornele generatorului de 4 V (tensiune de linie) [43]. Câmpul magnetic remanent a asigurat autoexcitarea generatorului sincron la fiecare încercare a sa, chiar și după perioade lungi de nefolosire.

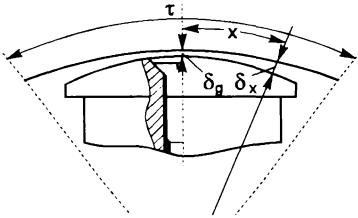


Fig. 8.7 Explicativă la realizarea tălpilor polare.

Înfășurarea statorică este realizată cu pas scurtat ($\gamma = 5/6 \cdot \tau$), asigurând reducerea amplitudinii armonicilor de ordinul 5 și 7. Prin modul de realizare deosebit de îngrijit al profilului tălpii polare - prin rectificare (utilizându-se o piatră abrazivă al cărei profil a fost calculat prin coordonate și realizat în cadrul Secției Sculărie a U.C.M. Reșița), pornindu-se de la un profil circular - și prin modul de realizare a înfășurării statorice, tensiunea unei faze la bornele generatorului sincron autoexcitat are o variație sinusoidală perfectă, după cum rezultă din figura 8.8, figură în care este redată înregistrarea

simultană a tensiunilor celor trei faze ale generatorului sincron, corespunzătoare unei valori efective a tensiunii de fază de 223 V. Se constată că tensiunile celor trei faze sunt perfect simetrice.

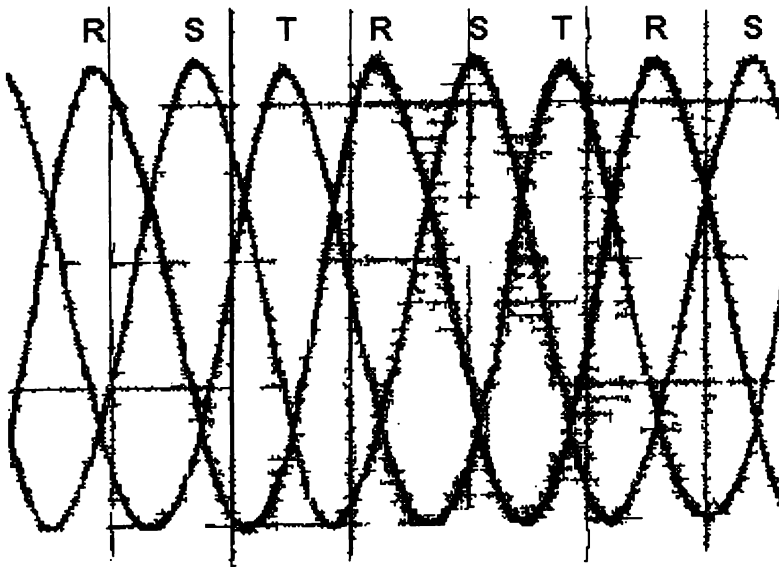


Fig. 8.8 Forma de variație a tensiunilor fazelor generatorului sincron la „mersul în gol”, corespunzătoare unei valori efective de fază de 223 V.

Figura 8.8 a fost realizată prin scanarea înregistrării originale (anexa 33) cu ajutorul scannerului A4 Scan - AS 8.000 PE (anexa 46, poziția 10), înregistrare care s-a realizat cu un înregistrator optic (poziția 6 din anexa nr. 46).

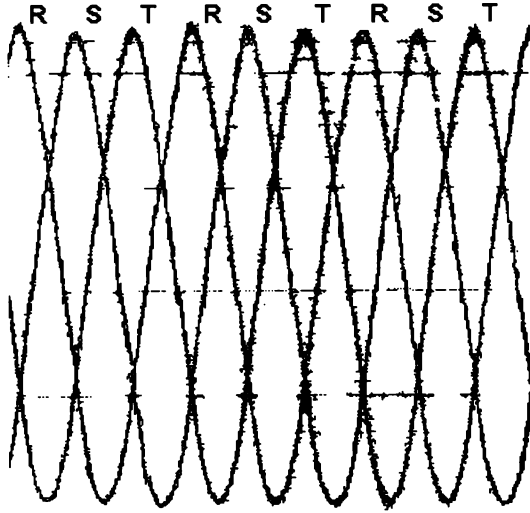


Fig. 8. 9 Forma de variație a tensiunilor fazelor generatorului sincron la mers în sarcină trifazată simetrică, $P_e=1,5 \text{ kW}$.

Forma tensiunilor și simetria lor nu s-a modificat la încărcarea generatorului, așa cum se poate observa din figura 8.9, care a fost și ea realizată prin scanarea înregistrării originale (anexa 34), efectuată cu înregistratorul optic (poziția 6 din anexa nr. 46), însă la o altă scară, corespunzătoare unei valori efective a tensiunii de fază de 220 V.

Generatorul sincron a fost încercat la supraturaj conform STAS 8.211/76, STAS 9.904/75 și STAS 1.893/72. Conform STAS 1.893/72, generatorul trebuie să reziste la o viteză de rotație cu 80% mai mare decât viteza de rotație nominală, adică $1,8 \times 500 \text{ rot./min.} = 900 \text{ rot./min.}$ Generatorul realizat a fost încercat la o viteză de rotație de 1.000 rot./min.

Caracteristicile generatoru-

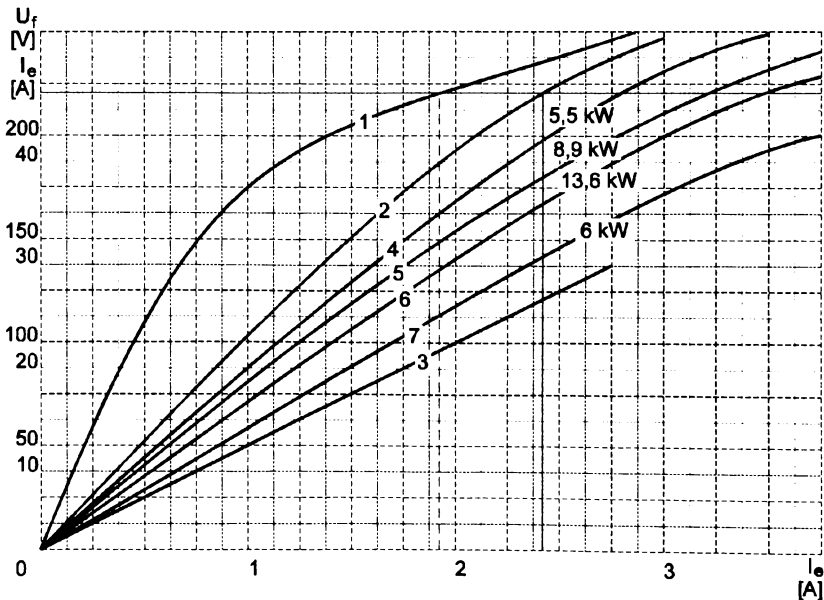


Fig. 8. 10 Caracteristici ale G.S.: de mers în gol cu excitație separată (1), cu autoexcitație (2), de scurtcircuit cu excitație separată (3), de mers în sarcină rezistivă cu autoexcitație (4, 5, 6) și sarcină rezistiv inductivă (7).

lui sincron funcționând autonom au fost determinate în două situații: antrenat de un motor de curent continuu de 13 kW - pe standul de probe al Secției Mașini Electrice II din I.C.M.R., și antrenat de turbina hidraulică Banky - 0,25. Cu datele obținute în prima situație s-au trasat caracteristicile din figura 8.10.

Din figura 8.10 rezultă că - în cazul utilizării excitației separate, curentul nominal de excitație este de 1,9 A, în timp ce - în cazul autoexcitării, curentul nominal de excitație este de 2,4 A. Diferența dintre cele două valori se explică prin faptul că - în cazul autoexcitării - nu s-a reprezentat o caracteristică de mers în gol propriu-zisă, ci o caracteristică „de sarcină” predominant inductivă, având în vedere că energia necesară excitației este furnizată de generatorul sincron autoexcitat.

Continuând investigația, am constatat că se pot reprezenta mai multe caracteristici de mers în gol ale generatorului sincron autoexcitat, esențial diferite, în funcție de tipul redresorului utilizat pentru obținerea tensiunii de autoexcitație. Astfel, utilizând redresor trifazat monoalternanță necomandat, respectiv comandat, au fost obținute caracteristicile „de mers în gol” prezentate în figura 8.11 (2, respectiv 1).

Am utilizat și alte tipuri de redresoare, dar caracteristicile „de mers în gol” obținute s-au încadrat între cele două caracteristici din figura 8.10. Explicația diferenței esențiale dintre caracteristicile 1 și 2 din figura 8.11 constă în aceea că - neexistând un mers în gol real - generatorul furnizează energia necesară excitației putând ajunge, din cauza reacției de indus și saturației, la o încărcare a fazelor cu valori ale curenților comparabile cu cele ale curenților de sarcină. Spre exemplu, pentru punctul de pe caracteristica 2 corespunzător curentului de excitație de 5 A și tensiunii la borne de 250 V, au fost măsurate curenții pe cele trei faze $I_R=3,30$ A, $I_S=2,40$ A și $I_T=2,77$ A și puterea electrică debitată de generator de 955 W, în timp ce - pentru punctul corespunzător curentului de excitație de 1,6 A și tensiunii la borne de 223 V de pe caracteristica 1 - au fost măsurate curenții pe cele trei faze $I_R=1,14$, $I_S=1,05$ și $I_T=1,05$ A, și puterea electrică debitată de generator de 350 W. Analizând rezultatele prezentate în

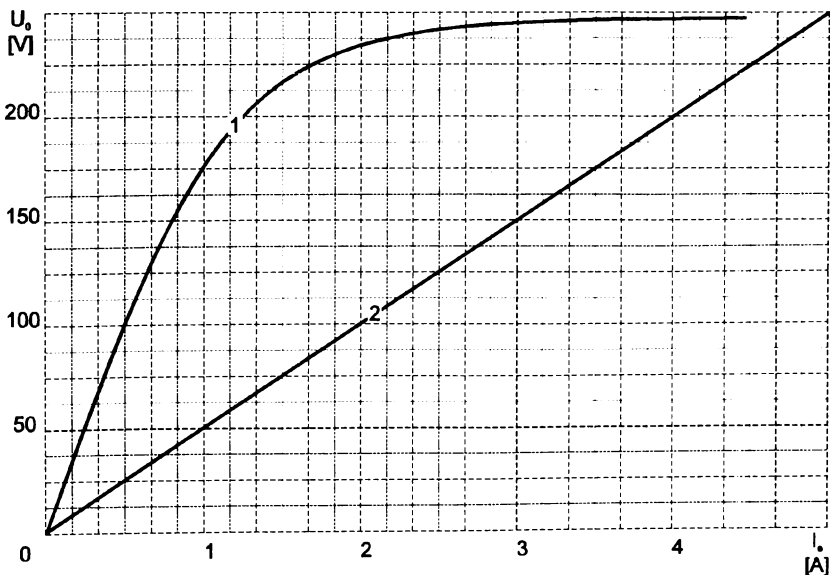


Fig. 8.11 Caracteristici „de mers în gol” în cazul utilizării unui redresor trifazat monoalternanță comandat (1), respectiv necomandat (2).

figurile 8.10 și 8.11, referitoare la caracteristica „de mers în gol”, mi-am pus problema „randamentului” autoexcitației, ajungând la concluzia că utilizarea unui redresor trifazat

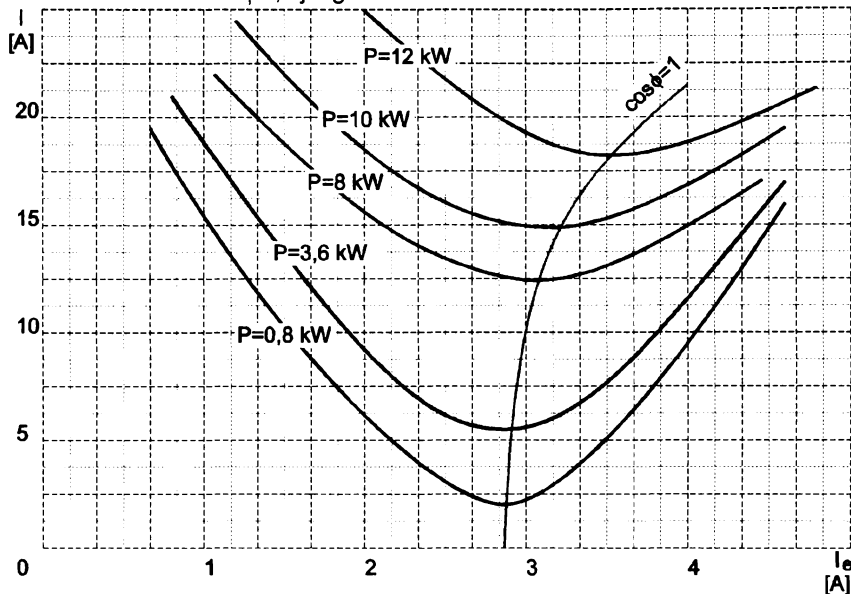


Fig. 8.12 Curbele în V ale generatorului sincron, în cazul utilizării excitației separate.

monoaltemanță comandat asigură autoexcitarea generatorului sincron în condiții optime. Curentul de excitație nominal, în cazul utilizării acestui redresor, este de numai 1,6 A.

Caracteristicile din figura 8.11 au fost obținute cu generatorul sincron antrenat de turbina hidrolică Banky -

0,25 a microhidrocentralei de la Lacul Mare - Dognecea.

În figura 8.12 sunt redatate curbele în V obținute pentru cazul în care generatorul

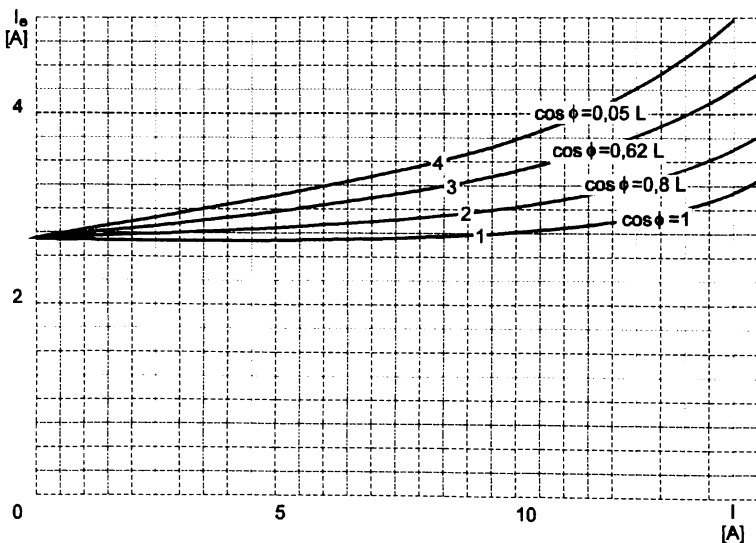


Fig. 8.13 Caracteristicile de reglare ale generatorului sincron, în cazul utilizării excitației separate.

sincron a fost antrenat de motorul de curent continuu mai sus amintit, și a debitat energie electrică în rețeaua standului de probe. În urma reprezentării acestor caracteristici, măsurându-se și temperatura înfășurărilor generatorului, a rezultat că puterea generatorului proiectat este de 12 kVA.

Caracteristicile de reglare, reprezentate în figura 8.13, pentru sarcini inductive și inductiv - rezistive, confirmă valorile obținute din proiectare, referitoare la curentul de excitație necesar pentru obținerea puterii nominale a generatorului, când factorul de putere este 0,8 inductiv.

Având în vedere că generatorul va lucra în regim autonom, am investigat comportamentul acestuia la încărcări nesimetrice. Astfel, în figura 8.14 (originalul

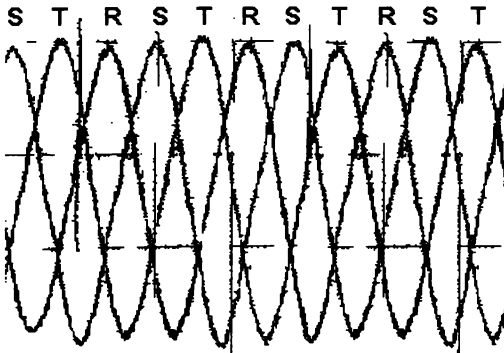


Fig. 8. 15 Formele de variație ale tensiunilor celor trei faze, la încărcare trifazată rezistivă nesimetrică, $P_e=1.440$ W.

permis încărcarea monofazată până la curentul nominal. Rezultatul încercării este totuși satisfăcător, deoarece încărcarea unei faze cu o sarcină de trei ori mai mare decât a celorlalte două reprezintă un caz limită, având în vedere măsurile de simetrizare a consumatorilor posibili ai generatorului sincron autonom (utilizarea unui motor sincron trifazat, conectarea simultană a trei surse de lumină - câte una pe fiecare fază, etc.).

Rezultate comparabile au fost obținute la încărcarea rezistivă nesimetrică a generatorului sincron, cu următoarele mărimi măsurate: $P_e=1.440$ W, $I_R=4,8$ A, $I_S=1$ A,

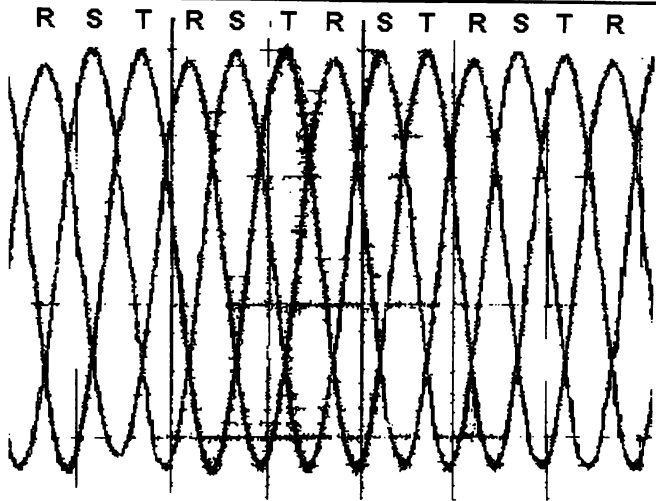


Fig. 8. 14 Formele de variație ale tensiunilor celor trei faze, la încărcare trifazată rezistivă nesimetrică, $P_e=1.020$ W.

înregistrării este prezentat în anexa cu numărul 35) sunt reprezentate formele de variație ale tensiunilor celor trei faze, la încărcare rezistivă nesimetrică a generatorului sincron. S-au măsurat mărimile: $P_e=1.020$ W, $I_R=3$ A, $I_S=0,9$ A, $I_T=1$ A, $U_R=216,1$ V, $U_S=223$ V, $U_T=223$ V. Curenții fazelor T și S sunt cei care corespund autoexcitației generatorului sincron. Se constată din această probă că tensiunea fazei încărcate a scăzut cu 3,08% față de tensiunile fazelor „neîncărcate”. Nu putem extrapola aceste rezultate, deoarece saturația generatorului poate influența procentajul determinat mai sus. Debitul de apă asigurat de aducțiunea microhidrocentralei nu a

$I_T=1,1 \text{ A}$, $U_R=215,2 \text{ V}$, $U_S=223 \text{ V}$, $U_T=223 \text{ V}$.

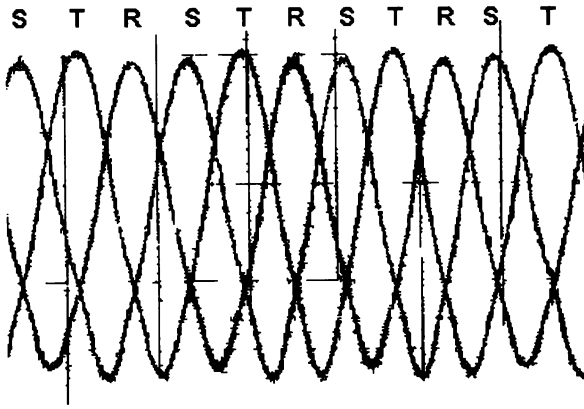


Fig. 8. 16 Formele de variație ale tensiunilor celor trei faze, la încărcare rezistivă nesimetrică, prin conectarea unui rezistor între 2 faze, cu nului izolat, $P_e=1.240 \text{ W}$.

S-au măsurat mărimile: $P_e=1.240 \text{ W}$, $I_R=2,3 \text{ A}$, $I_S=2,5 \text{ A}$, $I_T=1,1 \text{ A}$, $U_R=221 \text{ V}$, $U_S=211,1 \text{ V}$, $U_T=223 \text{ V}$. Curentul fazei T este corespunzător autoexcitației generatorului sincron. Se constată din această probă că tensiunea fazei mai încărcate a scăzut cu 5,3% față de tensiunea fazei „neîncărcate”. Rezultatul încercării este satisfăcător, deoarece încărcarea unei faze cu o sarcină de 2,27 ori mai mare decât a celei mai puțin încărcate este un caz puțin probabil, datorită măsurilor de simetrizare a consumatorilor posibili ai generatorului sincron autonom, „mai sus amintite. Acest tip de încărcare reprezintă de fapt un caz de avarie, când se întrerupe nului și una dintre cele trei faze, în cazul unui consumator rezistiv trifazat.

În cazul încărcării rezistive între două faze și nuli - figura 8.17 (al cărui original este în anexa cu numărul 38), s-au măsurat mărimile: $P_e=1.520 \text{ W}$, $I_R=3,1 \text{ A}$, $I_S=2,9 \text{ A}$, $I_T=1,1 \text{ A}$, $U_R=217 \text{ V}$, $U_S=221 \text{ V}$, $U_T=223 \text{ V}$. Se constată o scădere a tensiunii fazei celei mai încărcate, față de tensiunea fazei „în gol”, cu 2,7%. Faza R este în acest caz de 2,82 ori mai încărcată decât faza T. *Această situație poate apărea frecvent în exploatarea de zi cu zi a unui generator sincron autonom autoexcitat.*

Scăderea relativ mică a valorii tensiunilor fazei/fazelor încărcate, față de faza/fazele „neîncărcate/e” era de așteptat, având în vedere că autoexcitarea se face în aceste cazuri preponderent pe seama fazei/fazelor neîncărcate. **Acesta este în sine un**

În acest caz, încărcarea unei faze este de 4,36 ori mai mare decât a celorlalte două faze, în timp ce scăderea de tensiune a fazei încărcate este de numai 3,5% (vezi figura 8.15, a cărui original este în anexa cu numărul 36). Pentru comparație, gradul de nesimetrizare al rețelei este de 5%.

În figura 8.16 (originalul înregistrării este în anexa cu numărul 37) sunt reprezentate formele de variație ale tensiunilor celor trei faze, la încărcare rezistivă nesimetrică a generatorului sincron - prin conectarea unui rezistor între două faze, nului fiind izolat.

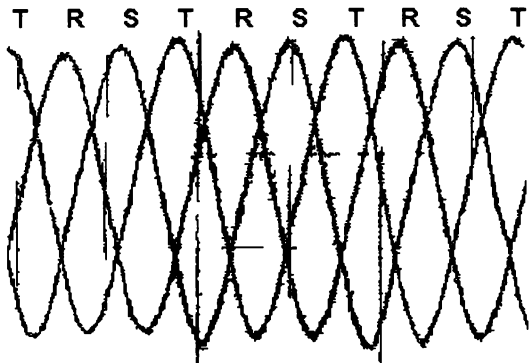


Fig. 8. 17 Formele de variație ale tensiunilor celor trei faze, la încărcare rezistivă între două faze și nuli, $P_e=1.520 \text{ W}$.

avantaj al generatorului sincron autonom autoexcitat, față de generatorul sincron cu excitație separată. Această constatare este o contribuție a autorului la îmbogățirea literaturii de specialitate referitoare la generatorul sincron.

B. Comportarea elementului de măsurare a tensiunilor generatorului sincron

Elementul de măsurare al tensiunilor este în cazul de față un redresor trifazat monoalternanță necomandat (vezi figura 5.10). Tensiunea continuă furnizată de acesta este dependentă de valorile tensiunilor celor trei faze ale generatorului. La funcționarea normală a generatorului sincron, elementul de măsurare asigură la ieșirea sa o tensiune de 257 V curent continuu, care - prin intermediul unui divizor rezistiv (R_3 , R_5 din figura 5.10) - asigură pe pinul 4 al unui circuit integrat de tip $\beta A741$ (CI_1 din aceeași figură) o tensiune de 7,5 V, identică cu cea de pe pinul 5, furnizată de elementul de prescriere.

C. Comportarea elementului de comparare și amplificarea

Compararea semnalului măsurat cu cel prescrist se face pe pinii 4 și respectiv 5 ai circuitului integrat CI_1 din figura 5.10, circuit care este în același timp și amplificatorul regulator din bucla de reglare a tensiunii generatorului sincron. În concordanță cu concluziile din § 7.3.1, regulatorul este de tip PI, cu o constantă de timp T_{12} de 0,0375 s (superioară valorii de 0,007 s stabilite în același paragraf).

Am investigat comportarea regulatorului amplificator în regim tranzitoriu de funcționare al generatorului sincron, regim determinat de conectarea și deconectarea unor sarcini rezistive sau rezistiv - inductive.

La o variație bruscă a sarcinii generatorului sincron (semnal treaptă), tensiunea furnizată de elementul de măsurare (RN din figura 5.10) și, în consecință, tensiunea de pe pinul 4 al circuitului integrat CI_1 prezintă un salt, conducând la o variație a tensiunii la pinul 10 al aceluiași circuit integrat (tensiune ce constituie mărimea de comandă pentru dispozitivului de comandă pe grila tiristoarelor) conform figurii 8.18 (originalul este redat în anexa 39).

Din figura 8.18 rezultă că la saltul de tensiune în sens pozitiv pe pinul 4 al circuitului integrat CI_1 , variație ce se observă în partea de jos a figurii, saltul de tensiune la pinul 10 al aceluiași circuit integrat prezintă câteva oscilații, care se propagă în bucla de reglare a tensiunii, devenind supărătoare. La saltul în sens negativ pe pinul 4, variația tensiunii la pinul 10 are caracter integrator clar, amplificatorul regulator comportându-se ca un element PT_1 , tensiunea la bornele generatorului revenind în regim aperiodic critic, la valoarea anterioară regimului tranzitoriu.

Comportamentul regulatorului amplificator, ilustrat în figura 8.18, nu satisface pretențiile referitoare la calitatea energiei electrice furnizate de generatorul sincron,

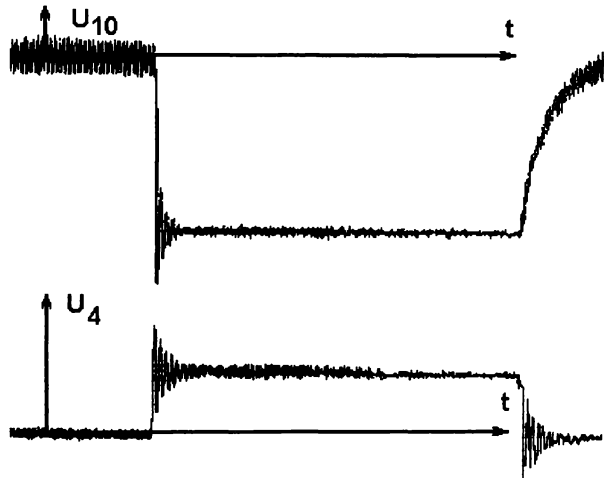


Fig. 8. 18 Variația tensiunii de ieșire a regulatorului PI din bucla de reglare a tensiunii, la un semnal treaptă de intrare.

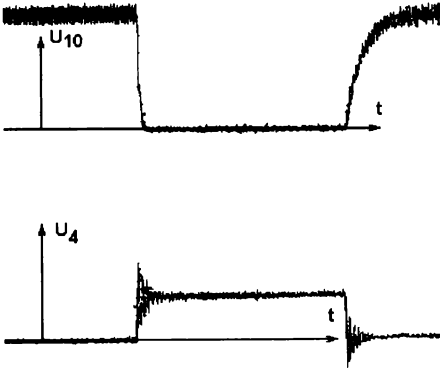


Fig. 8. 19 Răspunsul amplificatorului regulator la semnal treaptă crescător, aplicat la intrare.

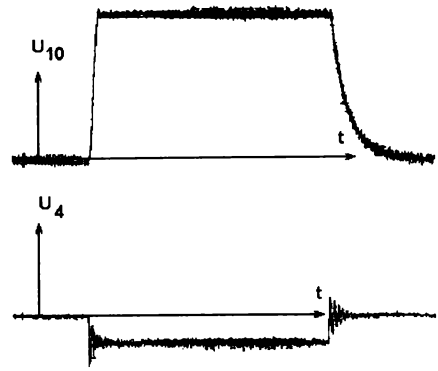


Fig. 8. 20 Răspunsul amplificatorului regulator la semnal treaptă descrescător, aplicat la intrare.

motiv pentru care am procedat la decuplări ale tensiunilor de alimentare ale circuitelor integrate cât mai aproape de terminalele acestora și la filtrarea semnalelor obținute.

Cel mai bun comportament al amplificatorului regulator a fost obținut în urma filtrării semnalului obținut pe pinul 10 al circuitului integrat $\beta A741$ cu un condensator de $10 \mu F$, conectat între pinul 10 și minusul sursei de alimentare. În figurile 8.19, respectiv 8.20, este prezentat răspunsul regulatorului amplificator la semnal treaptă aplicat la intrare.

Se observă absența oscilațiilor în semnalul de ieșire, la variații treaptă ale semnalului de intrare, în sensul creșterii (figura 8.19, al cărei original este anexat cu numărul 40), respectiv în sensul descreșterii (figura 8.20, a cărei înregistrare este anexată cu numărul 41).

D. Comportamentul elementului de execuție din bucla de reglare a tensiunii

În urma analizării comportamentului generatorului sincron autoexcitat (vezi punctul A), am adoptat soluția utilizării unui redresor trifazat monoaltemanță comandat ca element de execuție (figura 8.21). Această soluție asigură curentul de excitație minim - de $1,6 A$ - ce determină valoarea tensiunii de fază la borne de $220 V$ (I_{enom}), și curentul de excitație la încărcarea cu sarcină nominală a generatorului

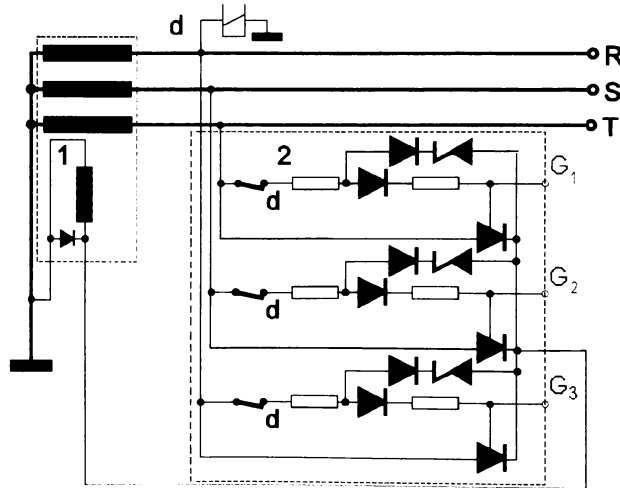


Fig. 8. 21 Schema de autoexcitație a generatorului sincron utilizând redresor trifazat monoaltemanță cu comportare mixtă (variantea adoptată după experimentări).

de 4,5 A

În figura 8.22 (înregistrarea fiind anexată cu numărul 42) este redată comportarea buclei de reglare a tensiunii la pornirea în gol a unui motor asincron de 1,5 kW. Din figură se poate constata că, în momentul conectării motorului, tensiunea la bornele generatorului scade, determinând creșterea tensiunii de comandă a generatoarelor de impulsuri, ceea ce implică creșterea tensiunii și curentului de excitație, iar apoi - după circa 8 perioade - tensiunea la borne este readusă la valoarea inițială. Procesul tranzitoriu se amortizează practic după circa 14 oscilații, adică după 0,28 s. Utilizând un aparat digital de măsură (poziția 7 din anexa 46), s-au făcut următoarele măsurători:

- înaintea conectării motorului, valoarea efectivă a tensiunii de fază a fost de 219,5 V;
- valoarea efectivă minimă a tensiunii, după conectarea motorului, este 203 V;
- valoarea efectivă, după amortizarea oscilațiilor, este 218,2 V;
- valoarea efectivă maximă a tensiunii după deconectarea motorului este 222 V;
- valoarea efectivă a tensiunii după amortizarea oscilațiilor este 219,5 V.

Consider că bucla de reglare a tensiunii se comportă foarte bine la conectarea și deconectarea unui motor asincron de 1,5 kW, voltmetrul de tablou indicând doar tendințe de scădere, respectiv creștere, a tensiunii efective de fază. Timpul amortizării oscilațiilor este de asemenea foarte bun. La becurile de probă, conectate

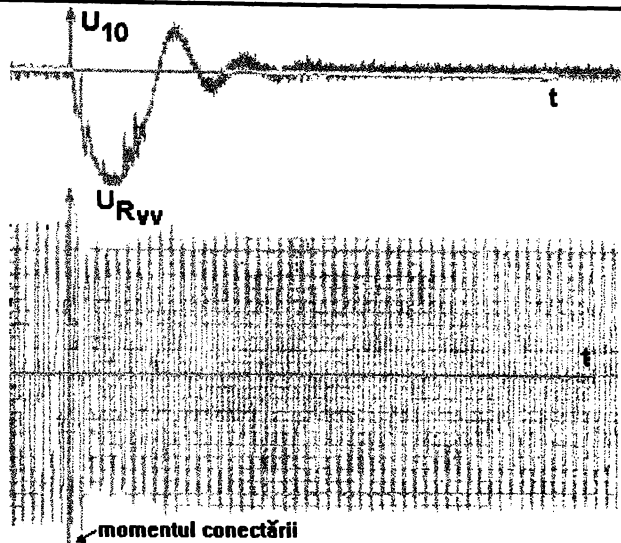


Fig. 8. 22 Variația tensiunii unei faze la pornirea în gol a unui motor asincron de 1,5 kW.

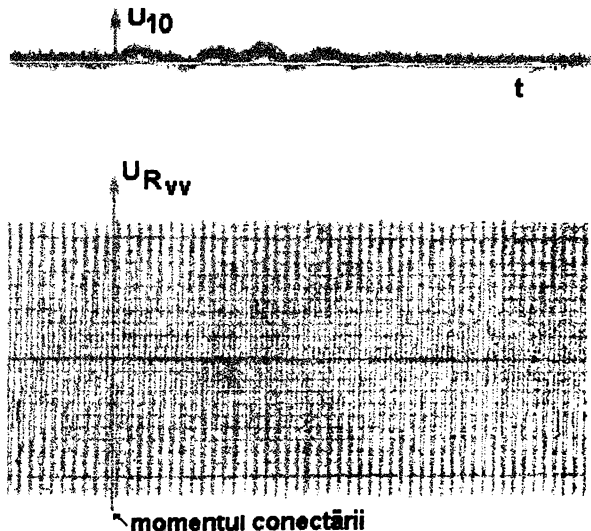


Fig. 8. 23 Variația tensiunii unei faze la conectarea unei sarcini rezistive de 1,5 kW.

pe cele trei faze, nu au fost sesizate variații ale intensității luminoase în momentele de conectare sau deconectare ale motorului asincron.

În figura 8.23 (înregistrarea originală fiind anexată cu numărul 43) este redată comportarea buclei de reglare a tensiunii la conectarea unei sarcini trifazate rezistive la bornele generatorului sincron. Din figura 8.23 se constată că procesul oscilator se întinde pe durata a 7 perioade, existând o supracreștere nesemnificativă a tensiunii - pe durata a două perioade - aparatele digitale sau analogice nesesizând de fapt această variație. Puterea sarcinii rezistive a fost de 1,5 kW.

8.2.3 Comportamentul buclei de reglare a frecvenței

A. Comportamentul convertorului frecvență - tensiune cu amplificator atașat

Tabelul 8.2

f [Hz]	U_o [V]	f [Hz]	U_o [V]
20,00	-3,40	47,62	-0,24
25,00	-3,28	50,00	0,00
27,77	-2,95	52,60	0,33
30,30	-2,65	55,55	0,80
32,25	-2,40	58,82	1,35
34,48	-2,10	62,50	2,05
37,00	-1,72	66,66	2,65
40,00	-1,33	71,43	3,47
41,66	-1,12	77,00	4,30
43,47	-0,90	83,33	5,30
45,45	-0,60	90,90	6,60

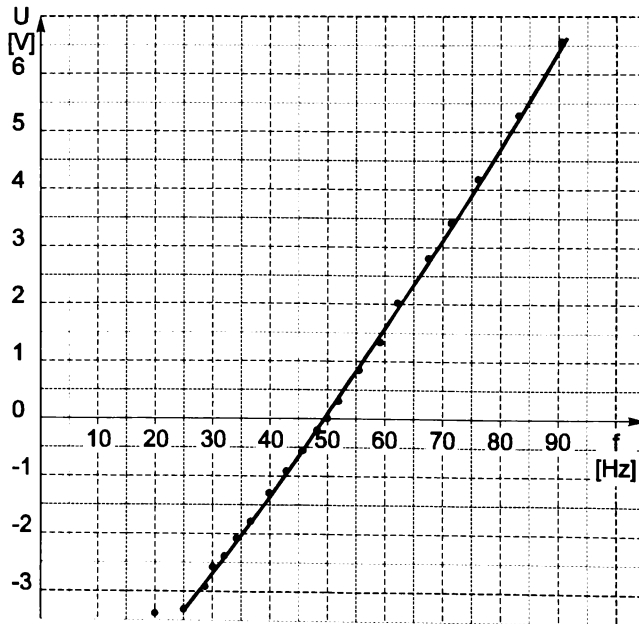


Fig. 8. 24 Caracteristica f - U a convertorului frecvență - tensiune cu amplificator atașat.

Având în vedere importanța convertorului frecvență - tensiune în bucla de reglare a frecvenței, am procedat la determinarea comportamentului acestuia pe instalația pilot.

În acest sens, s-a utilizat generatorul de joasă frecvență (poziția 2 din anexa 46), întreprinându-se bucla de reglare a frecvenței, păstrându-se alimentările de la sursa stabilizată a prototipului. Rezultatele măsurătorilor sunt trecute în tabelul 8.2.

Cu datele din tabelul 8.2 a fost întocmită caracteristica f - U a convertorului frecvență - tensiune cu amplificator atașat, reda-

tă în figura 8.24.

Din figură se constată că variația tensiunii la ieșirea amplificatorului atașat convertorului de frecvență este aproape liniară, iar plaja de frecvențe în care lucrează convertorul este cuprinsă între 25 și 91 Hz. Constanta k_c a convertorului - determinată pentru valori în jurul frecvenței de 50 de Hz - este 0,114 V/Hz. Această valoare este în concordanță cu valoarea constantei k_{EM1} , stabilită teoretic în § 7.2.1 și 7.2.2 (vezi și relația 6.49).

Variația tensiunii la ieșirea convertorului frecvență - tensiune (dependență de frecvența tensiunii de la bornele generatorului) rezultă și din figura 8.25 (al cărei original este anexat cu numărul 44), unde curba de jos reprezintă modificarea tensiunii U_{10} (tensiunea de pe pinul 10 al circuitului integrat Cl_3 din figura 5.5). Această

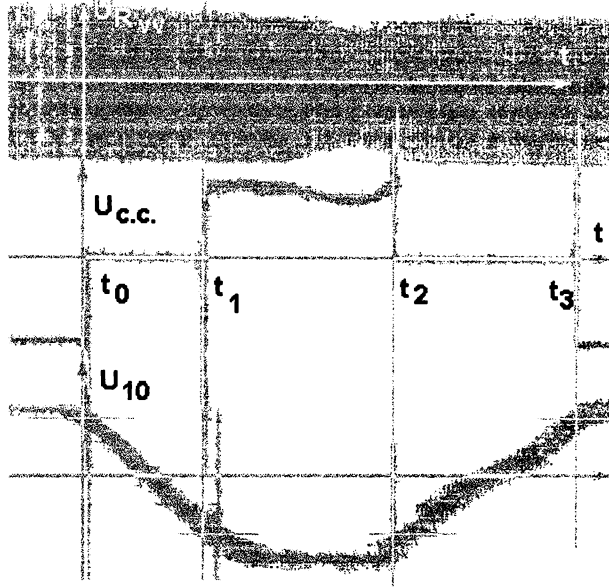


Fig. 8. 25 Variația tensiunii de fază (R), a tensiunii de ieșire din convertorul frecvență - tensiune și a tensiunii de alimentare a motorului de c.c.

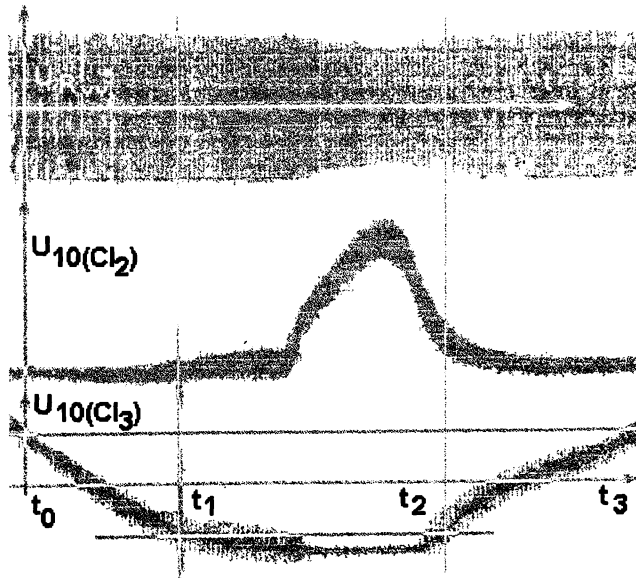


Fig. 8. 26 Ciclu de variație al frecvenței între 45 și 55 Hz.

variație este în concordanță cu caracteristica $f - U$ stabilită teoretic în figura 5.6. Anterior momentului t_0 , frecvența tensiunii la borne era mai mare de 52,5 Hz și motorul de c.c. era alimentat - rotindu-se în sensul necesar închiderii aparatului director (U_{cc} este negativă - curba din mijloc). La momentul t_0 , frecvența devine 52,5 Hz cu tendințe de scădere, U_{cc} este zero, motorul este în repaus, iar acest regim poate dura atât timp cât nu intervine o perturbație. Dacă o perturbație (încărcarea generatorului) determină scăderea frecvenței, la

momentul t_1 se atinge pragul de 47,5 Hz, cu tendințe de scădere, și motorul este alimentat cu o tensiune U_{cc} pozitivă, rotindu-se în sensul deschiderii aparatului director.

B. Comportamentul blocului de rele și al motorului de curent continuu cu excitație mixtă din bucla de reglare a frecvenței

Pentru a constata comportamentul elementelor mai sus amintite, am înregistrat concomitent următoarele trei mărimi: tensiunea unei faze a generatorului sincron, tensiunea U_{10} de la ieșirea integratului Cl_2 din figura 5.3 și tensiunea de alimentare a motorului de curent continuu care acționează aparatul director al turbinei hidraulice (figura 8.25).

Această figură ilustrează de fapt comportamentul buclei de reglare a frecvenței. La încărcarea generatorului sincron cu o sarcină - rezistivă sau inductivă - pe lângă tendința de scădere a tensiunilor acestuia (a căror revenire este făcută la intervenția buclei de reglare a tensiunii), există și o tendință de scădere a frecvenței, ca umare a cererii de putere activă, și bucla de reglare a frecvenței va asigura un debit sporit de apă, prin deschiderea aparatului director al turbinei, până la restabilirea frecvenței prescrise (50 Hz). De această manieră se petrec lucrurile cu bucla de reglare a frecvenței instalației pilot.

Am realizat artificial un ciclu de variație a frecvenței între 55 și 45 Hz. Între 55 și 52,5 Hz, motorul de curent continuu este alimentat, determinând reducerea debitului de apă; între 52,5 și 47,5 Hz, motorul de curent continuu nu este alimentat, debitului de apă putând avea orice valoare într-un interval în concordanță cu intervalul precizat de frecvență și cu sarcina generatorului sincron; între 47,5 și 45 Hz, motorul de curent continuu este alimentat, determinând creșterea debitului de apă.

Acest ciclu este ilustrat în figura 8.26, unde am notat cu t_1 momentul opririi motorului de curent continuu din mișcarea de rotație corespunzătoare scăderii debitului de apă, și cu t_2 momentul pomirii motorului de curent continuu pentru mișcarea de rotație corespunzătoare creșterii debitului de apă.

În funcționarea buclei de reglare a frecvenței (a vitezei de rotație a grupului turbină hidraulică - generator sincron) s-a constatat un fenomen nedorit, și anume inerția masei de apă din conducta de aducțiune, care este aproape orizontală pe o lungime de circa 10 m. Consider că această deficiență poate fi redusă sau chiar eliminată prin realizarea unei aducțiuni cu o pantă minimă asigurată.

8.2.4 Analiza interacțiunilor dintre cele două bucle de reglare, ce determină comportamentul optim al generatorului sincron

În cadrul acestui paragraf sunt prezentate rezultatele încercărilor microhidrocentralei pilot, în ceea ce privește interacțiunea celor două bucle de reglare - a tensiunii, respectiv a frecvenței - când frecvența tensiunii generatorului se modifică.

Este cunoscut faptul că tensiunea indusă în înfășurările unui generator sincron depinde atât de fluxul rezultat din întrefierul acestuia, cât și de frecvență, care este și ea dependentă de viteza de rotație (relațiile (1.2)-(1.4) din § 1.2.3).

Deci, modificarea frecvenței - în sensul creșterii sau scăderii sale - ar conduce la modificarea tensiunilor induse și, în consecință, a tensiunilor la bornele generatorului, în sensul creșterii sau scăderii lor. Pentru a contracara această tendință, este necesară scăderea, respectiv creșterea fluxului rezultat (deci, scăderea, respectiv creșterea fluxului de excitație). Acest lucru se realizează prin scăderea, respectiv creșterea curentului de excitație, a cărui mărime depinde de poziția impulsurilor de comandă a tiristoarelor din redresorul trifazat monoalternanță comandat, acestea - la rândul lor - depinzând de valoarea tensiunii de comandă a circuitelor de comandă pe grilă (β_{AA} 145).

Tensiunea de comandă este tocmai tensiunea la ieșirea circuitului integrat Cl_2

(BA 741) din bucla de reglare a tensiunii. În figura 8.26 se observă că - la tendința de scădere a frecvenței (curba inferioară) - există o tendință de scădere a tensiunii la borne (curba superioară), care este însă readusă la valoarea anterioară prin intervenția buclei de reglare a tensiunii (curba mediană - care prezintă o creștere, ceea ce conduce la creșterea unghiului de conducție al tiristoarelor, și, în consecință, la creșterea curentului de excitație (a fluxului de excitație)).

Din aceeași figură se constată că procesul de restabilire a valorii inițiale a tensiunii este amortizat.



Capitolul 9.

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

În acest ultim capitol voi prezenta concluziile ce se pot extrage din prezenta lucrare și apoi contribuțiile autorului.

Optimizarea funcționării generatoarelor de mică și medie putere, utilizate în echiparea microhidrocentralelor se referă la:

- stabilirea unei scheme optime de alimentare a excitației, sub aspectul funcționalității, simplității, fiabilității și asigurării autoexcitației generatorului sincron;
- stabilirea celui mai simplu element de comparare a tensiunilor de referință și de reacție, avându-se în vedere că se dispune de o singură sursă de tensiune, și anume chiar generatorul sincron autoexcitat;
- determinarea valorilor optime ale constantelor de timp electrice, electromecanice și mecanice, pornind de la comportarea dinamică a ansamblului turbină hidraulică - generator sincron și de la faptul că ansamblul amintit - lucrând în regim autonom - este un sistem de automatizare:
 - ◆ închis;
 - ◆ de stabilizare;
 - ◆ cu acțiune continuă în bucla de reglare a tensiunii;
 - ◆ cu acțiune discontinuă în bucla de reglare a frecvenței;
 - ◆ astatic pentru ambele bucle;
 - ◆ multivariabil;
 - ◆ specializat;
 - ◆ rapid (timpul procesului tehnologic mai mic de 10 secunde);
 - ◆ liniarizabil;
 - ◆ cu parametrii constanți [6];
- stabilirea unui criteriu de variație a curentului de excitație (criteriul radicalului) astfel încât modificarea unghiului intern al generatorului sincron - la variația sarcinii acestuia - să se facă fără oscilații sau cu oscilații cât mai mici, periodic amortizate, într-un timp cât mai scurt;
- analiza stabilității teoretice a celor două bucle de reglare, pornind de la funcțiile de transfer ale acestora, utilizând programul și mediul de programare Maple, în scopul stabilirii valorilor optime ce vor asigura stabilitatea practică a celor două bucle;
- stabilirea unor concluzii referitoare la mărimea momentului de inerție al pieselor aflate în mișcare de rotație, avându-se în vedere funcționarea autonomă a microhidrocentralei;

9.1. Concluzii referitoare la modelul experimental

Elementul de bază al microhidrocentralei realizate la Lacul Mare din Dognecea este generatorul sincron autoexcitat, care lucrează în regim autonom. Odată realizate condițiile autoexcitării, generatorul s-a autoexcitat la fiecare pomire a microhidrocentralei, fără excepție.

Redresorul trifazat monoalternanță cu comportare mixtă (necomandat, respectiv comandat) a funcționat în concordanță cu așteptările din faza de proiectare, nederminând șocuri sau oscilații la trecerea sa din regimul de redresor necomandat în regimul de redresor comandat. În timpul experimentărilor, am constatat cu satisfacție că redresorul trifazat monoalternanță cu comportare mixtă lucrează în conformitate cu așteptările, în procesul autoexcitării circuitele de comandă pe grilă (vezi figura 5.1) determinând funcționarea tiristoarelor în regim de diode. Calculele prezentate în § 5.2.3 s-au confirmat în faza experimentării prototipului microhidrocentralei. Plaja de tensiuni asigurată de către redresorul trifazat monoalternanță comandat este acoperitoare față de plaja de tensiune de excitație necesară.

Redresorul comandat trifazat monoalternanță a fost adoptat ca o soluție optimă în urmă experimentării mai multor tipuri de redresoare, penultima variantă fiind cea prezentată în figura 4.7 (un redresor trifazat în punte cu comportare mixtă). Față de aceasta, varianta adoptată, pe lângă faptul că este mai simplă, nu determină saturarea generatorului sincron în faza de autoexcitare, așa cum s-a întâmplat cu redresorul trifazat în punte cu comportare mixtă. În faza de autoexcitare - utilizând acest tip de redresor - se ajungea la o funcționare stabilă „în gol” a generatorului sincron în regim puternic saturat (curentul de excitație atinge valori de $4,5 \div 5$ A).

Trecerea la funcționarea în regim comandat a redresorului trifazat în punte conducea la apariția unor oscilații (neprezentate în lucrare) supărătoare, atât în ceea ce privește limitele de variație ale tensiunii, cât și funcționarea aparaturii de comandă.

Deci, redresorul comandat trifazat monoalternanță cu comportare mixtă constituie varianta optimă pentru microhidrocentrala pilot prezentată în această lucrare. Utilizarea lui presupune însă dimensionarea excitației generatorului sincron pentru o tensiune de excitație la mijlocul plajei de tensiuni asigurată de acesta. Această variantă mai aduce și avantajul că nu este necesar un transformator de adaptare a tensiunilor, care este un element neliniar, ceea ce ar complica microhidrocentrala și ar ridica costul acesteia.

Elementul de prescriere a tensiunii - realizat prin utilizarea chiar a tensiunii de la bornele generatorului sincron autoexcitat (figura 5.10) - a funcționat ireproșabil, confirmând calculele din § 5.2.1.

Răspunsul la semnal treaptă al amplificatorului regulator din bucla de reglare a tensiunii (figurile 8.19 și 8.20) este în concordanță cu comportamentul standard al unui amplificator regulator de tip PI, determinând un comportament periodic amortizat al buclei de reglare a tensiunii la apariția unor variații ale puterii active (determinate de pomirea unui motor asincron - figura 8.22, sau de conectarea/deconectarea unei sarcini rezistive).

Stabilitatea buclei de reglare a tensiunii, analizată teoretic în § 7.3, s-a confirmat deasemenea în perioada încercărilor efectuate cu prototipul realizat. De rezultatele analizei teoretice a stabilității buclei de reglare a tensiunii s-a ținut seama în reglările practice ale acesteia. Consider că analiza teoretică a stabilității buclei de reglare a tensiunii a fost deosebit de utilă, constituind o modalitate eficientă de reducere a timpului necesar pentru reglarea practică a buclei.

Consider că schema de excitație utilizată la realizarea prototipului microhidrocentralei răspunde cerințelor pe care mi le-am impus, referitoare la simplitate,

funcționalitate, fiabilitate și autoexcitare a generatorului sincron. Printr-o dimensionare corespunzătoare a acesteia, ea se poate folosi și la generatoarele sincrone de puteri mai mari. Rezultatele experimentale obținute (figurile 8.8, 8.9, 8.14, 8.15, 8.22, 8.23), care prezintă variația tensiunii celor trei faze sau a unei faze - după caz - sunt concludente în susținerea acestei afirmații.

În realizarea buclei de reglare a tensiunii am utilizat elemente deosebit de simple. Astfel, compararea tensiunii prescrise cu tensiunea de reacție (parte din tensiunea la borne) se realizează la valori mici, în tensiuni continue, cu același element care are și rolul de amplificator regulator.

Analiza teoretică a stabilității buclelor de reglare a frecvenței, respectiv a tensiunii - aplicând criteriul de stabilitate Nyquist și folosind mediul de programare Maple (vezi anexele 1+32 și figurile 7.1+7.32) - a condus la stabilirea valorilor optime ale constantelor de timp și de proporționalitate, care, implementate în practică, au determinat funcționarea stabilă a celor două bucle.

Momentul de inerție al pieselor în mișcare de rotație nu intervine în funcția de transfer a buclei de reglare a tensiunii (vezi § 6.4). Deci, o valoare mare a acestuia nu influențează durata regimurilor tranzitorii care apar în bucla de reglare a tensiunii. În bucla de reglare a frecvenței însă intervine momentul de inerție al pieselor în mișcare de rotație a grupului turbină hidraulică - generator sincron (§ 6.1.6). O valoare mare a momentului de inerție amintit va determina o mai mare stabilitate în funcționarea acestei bucle [72], [74]. În concluzie, utilizarea unui volant la o microhidrocentrală autonomă nu este doar benefică, ci și neapărat necesară.

9.2. Concluzii referitoare la posibilitatea extrapolării soluției prezentate pentru microhidrocentrale de puteri mai mari

Metoda de investigare a stabilității teoretice a buclelor de reglare, prezentată în capitolul 7 al lucrării, este în sine o metodă de uz general, putând fi aplicată pentru proiectarea și realizarea unor microhidrocentrale de puteri mai mari decât cea prezentată, în calculele ce s-ar efectua introducându-se valorile concrete ale constantelor de timp și de proporționalitate corespunzătoare.

Schema buclei de reglare a tensiunii este simplă, fiabilă, funcțională și asigură autoexcitarea generatorului sincron fără excepție, dacă sunt îndeplinite condițiile necesare autoexcitării. Autorul își propune să utilizeze această schemă, eventual cu alte generații de circuite integrate, mai performante, la realizarea unei alte microhidrocentrale, care urmează a fi amplasată în Munții Semenic.

Schema buclei de reglare a frecvenței, deși se comportă corespunzător, este perfectibilă în ceea ce privește eliminarea contactoarelor electromecanice (microrelee, relee intermediare), prin utilizarea unor elemente electronice.

Generatorul sincron autoexcitat, al cărui partizan convins se declară autorul, este recomandabil a se realiza pornindu-se de la un motor asincron de putere puțin mai mare (110-120%) decât cea dorită a se obține. Astfel, în cazul unei producții de serie mică de microhidrocentrale, să se realizeze o „tipizare” a acestora. De exemplu, s-ar putea „tipiza” microhidrocentrale pentru consumatori izolați de 5 kW, 10 kW, 25 kW, 100 kW, alegerea lor depinzând evident de sursa de apă disponibilă.

Aplicarea „criteriului radicalului” (prezentat în § 4.1.2) - care devine eficientă la puteri mai mari ale microhidrocentralei - necesită utilizarea unui minicalculator de proces, care, lucrând în timp real, ar duce la o și mai mare stabilitate a buclelor de reglare.

9.3. Contribuții personale

În elaborarea tezei sunt evidențiate următoarele contribuții ale autorului, sintetizate mai jos:

- ◆ 1. Opțiunea categorică, motivată, pentru utilizarea strictă a generatoarelor sincrone autoexcitate în realizarea microhidrocentralelor autonome.
- ◆ 2. Proiectarea, executarea și încercarea unui generator sincron cu poli aparenti, cu variație invers cosinusoidală a întrefierului sub talpa polară, pomind de la un motor asincron casat.
- ◆ 3. Conceperea, proiectarea, realizarea și încercarea unei scheme simple și fiabile pentru bucla de reglare a tensiunii generatorului autoexcitat.
- ◆ 4. Conceperea, proiectarea, realizarea și încercarea unei scheme simple și fiabile pentru bucla de reglare a frecvenței tensiunii generatorului autoexcitat.
- ◆ 5. Analiza funcționării unei microhidrocentrale în ansamblul ei.
- ◆ 6. Conceperea, proiectarea, realizarea și încercarea unui redresor trifazat în punte cu comportare mixtă.
- ◆ 7. Conceperea, proiectarea, realizarea și încercarea unui redresor trifazat monoaltemanță cu comportare mixtă.
- ◆ 8. Obținerea tensiunii de prescriere și tensiunii de reacție din aceeași sursă - redresorul trifazat monoaltemanță necomandat - conectat la bornele generatorului.
- ◆ 9. Realizarea a trei funcții - prescriere, comparare și amplificare a erorii - utilizând același circuit integrat.
- ◆ 10. Stabilirea metodei „radicalului” (numită de autor) de variație a curentului de excitație, în funcție de variația puterii interne a generatorului sincron
- ◆ 11. Stabilirea unei metode de analiză și a programului aferent, utilizând limbajul și mediul de programare Maple, pentru analiza și optimizarea funcționării unei bucle de reglare a frecvenței cu regulator de tip P.
- ◆ 12. Stabilirea unei metode de analiză și a programului aferent, utilizând limbajul și mediul de programare Maple, pentru analiza și optimizarea funcționării unei bucle de reglare a frecvenței cu regulator de tip PI.
- ◆ 13. Stabilirea unei valori minime a produsului constantelor de proporționalitate din bucla de reglare a frecvenței, pentru care aceasta rămâne stabilă dinamic, utilizând limbajul și mediul de programare Maple, când regulatorul este de tip PI.
- ◆ 14. Stabilirea unei valori maxime a constantei de timp a regulatorului de tip PI, pentru care bucla de reglare a frecvenței rămâne stabilă dinamic, utilizând limbajul și mediul de programare Maple.
- ◆ 15. Stabilirea unei metode de investigare a comportamentului buclei de reglare a tensiunii cu regulator de tip PI, utilizând limbajul și mediul de programare Maple.
- ◆ 16. Sublinierea avantajului generatorului sincron autonom autoexcitat, față de generatorul sincron cu excitație separată, referitoare la comportarea acestuia la încărcare cu sarcină nesimetrică (dezechilibrată).
- ◆ 17. Realizarea unei microhidrocentrale autonome, utilizând generator sincron autoexcitat.



BIBLIOGRAFIE

1. AMBROS, T.: *Mașini electrice, vol. I - Transformatoare și mașini asincrone, vol. II - Mașini sincrone și de curent continuu. Procese tranzitorii*, Ed. Universitas, 1992-1994, Chișinău, R. Moldova.
2. ANTON, M., POPOVICI, M., FITERO, I.: *Hidraulica și mașini hidraulice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1978.
3. ANGHEL, ȘT., PIROI, I.: *Cercetări privind concepția, realizarea și încercarea unui prototip experimental de turbină eoliană cu palete rabatabile tip TEPA 3*, I.S.Reșița, Contract de cercetare științific nr. 4/1986.
4. BABUȚIA, I., BUDIȘAN, N.: *Teoria sistemelor automate, vol. I și II*, Litografia I.P.,T.V." Timișoara, 1972.
5. BĂLĂ, C.: *Mașini electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1979.
6. BEJAN, I., BALABAN, G.: *Automatizări și telecomunicații*, în *Electroenergetica*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1976.
7. BICHIR, N., ș.a.: *Mașini electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1979.
8. BLAZEK, K.: *Forces acting on the Stator of Hydroalternator, caused by Subharmonics of the Stator Magnetic Tension*, *Electrotechnicky ozbor*, R.S. Cehoslovacia, nr. 12, 1987, pag. 700-704.
9. BOGOVICI, N.: *Electrotehnică și măsurări electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1979.
10. BOLDEA, I., ATANASIU, GH.: *Analiza unitară a mărimilor electrice*, Ed. Academiei R.S.R., București, 1983.
11. BONAL, I.: *Some Properties of Synchronous Machines in Transient States*, *Electrotechnicky Ozbor*, R.S. Cehoslovacia, nr. 1, 1986, pag. 22-29.
12. BUDIȘAN, N., ș.a.: *Puterea activă și reactivă a unui sistem automat de conversie a energiei cu generator asincron pentru agregate aeroelectrice*, E.E.A., E., nr. 5, iulie 1984, pag. 167.
13. BUDIȘAN, N., MARCHIȘ, D.: *Sistem automat de reglare a puterii grupurilor energetice a microhidrocentralelor autonome*, E.E.A., E., nr. 2, febr. 1984, pag. 37.
14. BURCEA, T.: *Dimensionarea optimă a bobinelor de curent continuu după criteriul minimului de volum*, E.E.A., E., nr. 3, aprilie 1979, pag. 97.
15. BURDUBUȘ, FL., ș.a.: *Unele aspecte teoretice și experimentale ale funcționării în comun a ansamblului motor diesel - generator sincron - redresor, cu aplicații la o locomotivă diesel-electrică CoCo 2.940 kW / 2.250 kW (4.000 CP)*, în E.E.A., E., nr. 6, august 1979, pag. 261.
16. CÂMPEANU, A.: *Mașini electrice*, Ed. Scrisul Românesc, Craiova, 1988.
17. CĂLIN, S., DUMITRACHE, I.: *Reglatoarele automate*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1985.
18. CIOC, I., ș.a.: *Mașini electrice. Îndrumar de proiectare*, Ed. Scrisul Românesc, Craiova, 1985.
19. CONDRUC, M.: *Identificarea parametrilor unui motor sincron cu excitație prin inducție și redresor*, E.E.A., E., nr. 1, ian. 1983, pag. 28.
20. CREȚA, V., ș.a.: *Noua serie de generatoare sincrone fără inele și perii, tip U.M.E.B.*, în E.E.A., E., nr. 5, iulie 1977, pag. 214.
21. CRISTEA, N., ș.a.: *Introducerea calculatoarelor numerice în proiectarea mașinilor sincrone*, E.E.A., E., nr. 6, august 1979, pag. 250.
22. CRISTEA, N., ș.a.: *Colivii de amortizare sau de pornire la mașinile sincrone cu poli înecați*, E.E.A., E., nr. 7, sept. 1984, pag. 284.
23. CRIȘAN, O.: *Ecuatiile de funcționare pentru mașina sincronă liniarizată*, E.E.A., E., nr. 1, ian. 1977, pag. 42.
24. DAN, D.A., ș.a.: *Diode cu siliciu. Catalog*, Ed. Tehnică, București, 1985.
25. DESIRÉ LE COURIERES: *Energie éolienne. Théorie, conception et calcul pratique des installations*, Edition Peyrolles, Paris, France, 1980.
26. DOGARU, M., ș.a.: *Modelarea matematică a regimurilor de funcționare la scurtcircuit trifazat brusc și la mersul în asincron al turbogeneratoarelor de mare putere, asistată de calculatorul numeric*, E.E.A., E., nr. 5, iulie 1980, pag. 228.
27. DORDEA, T.: *Mașini electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1977.
28. DORDEA, T.: *Asupra ecuațiilor mașinilor electrice de curent alternativ, Studii de Energetică și Electrotehnică*, tom 16, nr. 1, Ed. Academiei R.S.R., 1966.
29. DÖRING, G., EUHL, H.: *Behavior Mode of the Excitation of Synchronous on bus-bar faults with regard to the used Voltage Regulators*, Part 1 *Electric*, R.D. Germană, 33 (1979), nr. 5, pag. 275-276.
30. DRĂGĂNESCU, N.: *Încercările mașinilor electrice rotative*, Ed. Tehnică, București, 1987.

31. DRĂGĂNESCU, N., CIUCĂ, M.: *Echipamentul electric al automobilelor*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1978.
32. DRĂGULĂNESCU, N.: *Agenda radioelectronistului* (ed. a II-a), Ed. Tehnică, București, 1989.
33. DUMITRACHE, I., ș.a.: *Acordarea blocurilor de stabilizare ale regulatorului de tensiune al generatorului sincron*, E.E.A., E. 38, nr. 3, aprilie 1990, pag. 125.
34. DUȘA, V.: *Mașina sincronă fără limită a stabilității naturale*, E.E.A., E. 38, nr. 6, august 1990, pag. 242.
35. FRANSUA, AL., MĂGUREANU, R.: *Mașini și acționări electrice*, Ed. Tehnică, București, 1986.
36. GABER, E.: *Asupra preciziei de măsură a circuitelor de conversie U-f și f-U*, E.E.A., E., nr. 2, febr. 1983, pag. 69.
37. GALAN, N., ș.a.: *Modelul matematic simplificat al mașinii sincrone trifazate*, E.E.A., E., nr. 37, oct. 1987, pag. 279.
38. GALAN, N., MIHALACHE, N.: *Identificarea experimentală a schemei electrice echivalente pentru mașina sincronă convențională*, E.E.A., E., nr. 2, febr. 1984, pag. 54.
39. GALAN, N.: *Considerații cu privire la stabilitatea dinamică a mașinii sincrone*, E.E.A., E., nr. 1, ian. 1980.
40. GALAN, N., ș.a.: *Mașini electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1981.
41. GÂRLAȘU, ȘT., RUJA, I.: *Teoria sistemelor și automatizări*, Litografia U., E.M." Reșița, 1993.
42. GÂRLAȘU, ȘT., PIROI, I.: *Sistem de reglare a tensiunii unui microhidrogenerator sincron în regim autonom*, în Comunicările Simpozionului de mașini electrice asociate cu convertoare statice SIMEX'83, 18-19 nov. 1983, București.
43. GÂRLAȘU, ȘT., PIROI, I.: *Microhidrogenerator sincron pentru rețea separată*, în Comunicările Simpozionului de mașini electrice asociate cu convertoare statice SIMEX'83, 18-19 nov. 1983, București.
44. GHEORGHIU, I. S., FRANSUA, AL.: *Tratat de mașini electrice: I. Mașini de curent continuu - 1968; II. Transformatoare - 1970; III. Mașini asincrone - 1971; Mașini sincrone - 1972*, Ed. Academiei R.S.R., București.
45. GHIȚĂ, V.V.: *Îmbunătățirea stabilității sistemului insular cu grupuri diesel - generator sincron cuplate în paralel*, alimentând comutatoare statice, E.E.A., E. 37, nr. 1, ian. 89, pag. 16.
46. GÜNTER, E., ș.a.: *Rotierende elektrische Maschinen*, Veb Verlag Technik, Berlin, 1977.
47. IONESCU, G.H., BRESTEA, I.: *Contribuții la calculul schemei de compundaj derivație cu bobină de reacțanță folosită la generatoarele sincrone cu autoexcitație*, E.E.A., E., nr. 2, febr. 1983, pag. 66.
48. IORDACHE, M.: *Simularea și calculul circuitelor electrice neliniare în regim tranzitoriu pe calculatorul numeric*, E.E.A., E., nr. 4, mai 1977, pag. 161.
49. JERVE, G.K.: *Încercările mașinilor electrice rotative*, Ed. Tehnică, București, 1972.
50. JEZERSKI, E., ș.a.: *Transformatoare electrice. Construcție și proiectare*, Ed. Tehnică, București, 1960.
51. KELEMEN, A.: *Acționări electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1978.
52. KOSOW, I.: *Electric Machinery and Transformers*, Prentice-Hall Inc., Engelwood Cliffs, New Jersey, U.S.A., 1972.
53. KOVÁCS, K.P.: *Analiza regimurilor tranzitorii ale mașinilor electrice*, Ed. Tehnică, București, 1980.
54. MADESCU, GH.: *Analiza armonică automată a câmpului magnetic produs de înfășurările repartizate de curent alternativ*, E.E.A., E., nr. 5, iulie 1984, pag. 187.
55. MATLAC, I., NIȚU, C., FEȘTILĂ, C.: *Echipamente electrice și electronice de automatizare*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1983.
56. MATLAC, I.: *Convertoare electroenergetice*, Ed. Facla, Timișoara, 1987.
57. MĂGUREANU, R., VASILE, D.: *Motoare sincrone cu magneți permanenți și reluctanță variabilă*, Ed. Tehnică, București, 1982.
58. MĂGUREANU, R., VASILE, N.: *Calculul câmpului magnetic și al parametrilor de regim staționar la motorul sincron cu reluctanță variabilă și bariere nemagnetice*, E.E.A., E., nr. 2, 1979, pag. 54.
59. MĂGUREANU, R.: *Mașini electrice speciale pentru sisteme automate*, Ed. Tehnică, București, 1980.
60. MICIU, I.: *Protecția convertizoarelor cu tiristoare utilizate pentru sistemele de excitație ale generatoarelor sincrone din centralele electrice*, E.E.A., A.E., nr. 1, martie 1977, pag. 19.
61. MIHALACHE, M.: *Asupra predeterminării caracteristicilor de funcționare în sarcină ale generatoarelor sincrone anizotrope*, E.E.A., E. 31, nr. 8, nov. 1983, pag. 345.
62. MIHALACHE, M.: *Metode experimentale privind exprimarea adimensională a parametrilor înfășurării de excitație a mașinii sincrone*, E.E.A. 29, nr. 2, 1981, pag. 59.
63. MIHALACHE, M.: *Identificarea dinamică a parametrilor tranzitorii din axa longitudinală a mașinii sincrone*, E.E.A., E., nr. 7, oct. 1979, pag. 290.

64. NEMEȘ, M.: *Sisteme electroenergetice*, Litografia I.P.,T.V." Timișoara, 1990.
65. NICOLAIDE, A.: *Mașini electrice. Teorie. Proiectare, vol. I și II*, Ed. Scrisul Românesc, Craiova, 1975.
66. NOVAC, I., ș.a.: *Mașini electrice*, Litografia I.P.,T.V." Timișoara, 1973.
67. NOVAC, I.: *Mașini electrice*, Litografia I.P.,T.V." Timișoara, 1975.
68. NOVAC, I., ș.a.: *Mașini și acționări electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1982.
69. OLARIU, GH.: *Agregat pentru uz general cu generator electric de 1 kW, acționat de vânt*, E.E.A., E. 36, nr. 6, sept. 1988, pag. 231.
70. PIROI, I.: *Generator sincron de mică putere*, Lucrări științifice și tehnice, I.S. Reșița, 20-21 mai 1983.
71. PIROI, I.: *Regimuri tranzitorii la generatorul sincron autoexcitat de 12 kVA*, Lucrări științifice și tehnice, I.S. Reșița, 1988.
72. PIROI, I., TĂTUCU, I.: *Control Loop of the Speed of Rotation of the Banky Turbine to maintain the Frequency of the 12 kVA Synchronous Generator between Tolerance Limits*, Proceedings, The fifth National Conference on Electrical Drives, Iași, May 16-17, 1986.
73. PIROI, I., TĂTUCU, I.: *Voltage Control Loop of the 12 kVA Autonomous Synchronous Generator*, Proceedings, The fifth National Conference on Electrical Drives, Iași, May 16-17, 1986.
74. PIROI, I.: *Stabilitatea statică și dinamică a unui grup turbină hidroelectrică - generator sincron autoexcitat, ce echipează o microhidrocentrală*, Universitatea „Eftimie Murgu” Reșița, Comunicări Științifice, 22-23 oct. 1993.
75. PIROI, I.: *Sisteme de autoexcitație ale generatoarelor sincrone pentru microhidrocentrale*, Universitatea „Eftimie Murgu” Reșița, Comunicări Științifice, 22-23 oct. 1993.
76. PIROI, I.: *Instalații și echipamente electrice*, Curs pentru subingineri, Reșița, 1984.
77. PIROI, I., ș.a.: *Studiu privind valorificarea potențialului hidroenergetic prin microhidrocentrale a cursului de apă Dognecea, a Lacului Mare, a pârâului Valea Lacului și a Lacului Mic*, Protocol nr. 1, Contract de cercetare științifică nr. 49/1987, I.P.,T.V." Timișoara-I.S. Reșița - C.P.J. (-S.A.S.T.I.), Reșița, nov. 1987.
78. PIROI, I., ș.a.: *Studiu privind valorificarea potențialului hidroenergetic prin microhidrocentrale a cursului de apă Dognecea, a Lacului Mare, a pârâului Valea Lacului și a Lacului Mic*, Protocol nr. 2, Contract de cercetare științifică nr. 49/1987 I.P.,T.V." Timișoara-I.S. Reșița - C.P.J.(-S.A.S.T.I.), Reșița, oct. 1988.
79. PONNER, I.: *Electronică industrială*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1972.
80. POPESCU, A., COSTACHE, H., VĂDUVA, GH.: *Bloc electronic de reglare pentru locomotivă diesel*, E.E.A., E., nr. 6, august 1979, pag. 279.
81. POSTNIKOV, I.N.: *Proiectarea mașinilor electrice*, trad. lb. rusă, Ed. Energetică de Stat, București, 1954.
82. POZIDAIEV, V.M.: *Reguljator castaty vrascenjia bescontactovny electrodivigateljia postojiannogo toka*, Pribomostroenie, nr. 2, U.R.S.S., 1986.
83. RADU, A.: *Turbina de vânt EV - 04, proiectare și experimentări*, E.E.A., E. 36, nr. 6, sept. 1988, pag. 235.
84. RĂDULEȚ, R., OPASCHI, M.: *Proiectarea hidrogenatoarelor și a motoarelor sincrone*, Ed. Tehnică, București, 1980.
85. RĂDUȚI, C., ș.a.: *Mașini electrice rotative fabricate în România. Îndreptar*, Ed. Tehnică, București, 1981.
86. RICHTER, R.: *Înfășurările mașinilor electrice*, Ed. Tehnică, București, 1958.
87. RICHTER, R.: *Mașini electrice, vol. I - Elemente generale de calcul. Mașina de curent continuu*, Ed. Tehnică, București, 1958.
88. RICHTER, R.: *Mașini electrice, vol. II - Mașina sincronă și mașina comutatoare*, Ed. Tehnică, București, 1959.
89. SELINSCHI, AL., MUCICHESCU, G.: *Stabilitatea dinamică a generatoarelor sincrone, cu luarea în considerare a efectului motoarelor serviciilor interne*, Energetica, nr. 3, București, 1983, pag. 134-137.
90. SPÎNULESCU, I., ș.a.: *Electronica pentru perfecționarea profesorilor*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1983.
91. STOICA, P.: *Identificarea cu semnal de probă a proceselor automatizate*, E.E.A., A.E., nr. 3, sept. 1987, pag. 118.
92. TEODORESCU, D.: *Mașini electrice. Soluții noi, tendințe - orientări*, Ed. Facla, Timișoara, 1981.
93. TOCACIUC, GH.: *Echipamentul electric al automobilelor*, Ed. Tehnică, București, 1978.
94. TOPA, I., ș.a.: *Instalație pentru determinarea parametrilor electrici ai alternatoarelor auto*, E.E.A., E., nr. 2, febr. 1979, pag. 69.

95. TUNSOIU, GH., SERACIN, E., SAAL, C.: *Acționări electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1982.
96. VĂTĂȘESCU, A., ș.a.: *Circuite integrate liniare. Manual de utilizare, vol. I*, Ed. Tehnică, București, 1979.
97. VIOREL, I. A., IANCU, V.: *Mașini și acționări electrice*, Litografia Universității Tehnice, Cluj-Napoca, 1990.
98. YLDIRIM, Y., HUBECUL, D.: *Existența și stabilitatea punctelor de echilibru ale unui generator asincron autoexcitat, acționat de o turbină eoliană, în Mașini și acționări electrice. Tendințe actuale*, vol. I, Ed. Tehnică, București, 1988.
99. ZLATANOVICI, D.: *Thermal limits in the continous underexcited Duty of Hydrogenerators*, Energetica, nr. 3, București, 1989.
100. *** *Mașini electrice rotative. Culegere de standarde*, Ed. Tehnică, București, 1976.
101. *** (Siemens) *Memoratorul inginerului electrician*, Ed. Tehnică, București, 1971.
102. *** *Dicționar cronologic al științei și tehnicii universale*, Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1979.
103. *** *Circuite integrate analogice. Catalog*, Ed. Tehnică, București, 1983.
104. *** *Relee. Catalog, Întreprinderea de relee Mediaș*, 1990.



ANEXE

ANEXA Nr. 1

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței, când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip P (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7.1

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> kA1:=1;
kA1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=300;
kor1=302 la pornirea în gol, =593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
komega1=1,004576+4345,24
> komega1:=kp1*kc1*kA1*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT);
> Tic:=0.0005;
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> Tp:=1.0178;
> F652:=komega1*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*(1+s*Tm+s^2*T
> *Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> G:=conformal(F652,s=0..10*I);
> display({G});
> G;

```

ANEXA Nr. 2

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței, când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip P (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 2

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> kA1:=1;
kA1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=300;
kor1=302 la pomirea în gol, =593 la pomirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
komegal=1,004576+4345,24
> komegal:=kp1*kc1*kA1*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT);
> Tic:=0.0005;
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> Tp:=1.0178;
> F652:=komegal*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*(1+s*Tm+s^2*T
> *Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F652: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,color=red) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,color=blue) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-3.4,-9.9,`1`],[ -6.9,-16.1,`2`],[ -10.6,-22.5
> ,`3`],[ -13.7,-29.3,`4`],[ -17,-36.3,`5`],[ -20.4,-42.7,`6`],[ -23
> .8,-49.7,`7`],[ -27.33,-56.2,`8`],[ -30.7,-62.7,`9`],[ -33.3,-65.
> 5,`10`]});
> display({G.(1..10),Gtext});

```

ANEXA Nr. 3

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip P (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 3

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> kA1:=1;
kA1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=300;
kor1=302 la pomirea în gol, =593 la pomirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
komegal=1,004576+4345,24
> komegal:=kp1*kc1*kA1*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT);
> Tic:=0.0005;
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> Tp:=1.0178;
> F652:=komegal*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*(1+s*Tm+s^2*T
> *Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F652: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-5-5*I..1+1*I,color=red) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-5-5*I..1+1*I,color=blue) fi
> : od ;
> Gcerc1:=plot(sqrt(1-x^2),x=-1..0);
> Gcerc2:=plot(-sqrt(1-x^2),x=-1..0);
> Gcerc:=display({Gcerc1,Gcerc2});
> Gcerc;
> Gtext:=textplot({[-2.25,-2.76,`1`],[ -3.19,-2.76,`2`],[ -3.97,-2
> .76,`3`],[ -4.43,-2.76,`4`],[ -4.82,-2.76,`5`],[ -3.8,-1.75,`6`],
> [-4,-1.75,`7`],[ -4.27,-1.75,`8`],[ -4.45,-1.75,`9`],[ -4.78,-1.7
> 5,`10`]});
> display({G.(1..10),Gcerc,Gtext});
> G;

```

ANEXA Nr. 4

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 4

```

> kp1:=0.1;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=2.55;
kc1=23...27
> ka1:=3.13;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pornirea în gol, =593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=0.0005;
Tir=0,0005...1, în funcție de stabilitatea obținută
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komegal:=kp1*kc1*ka1*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komegal*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
> F653dec:=(komegal/10^i)*(1+s*(10^i)*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)
> /((1+s*Tic)*s*s*(1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> G653_01:=conformal(F653,s=0..10*I);
> G653_01;

```

ANEXA Nr. 5

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 5

```

> kp1:=0.1;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=2.55;
kc1=23...27
> ka1:=3.13;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pornirea în gol, =593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=0.0005;
Tir=0,0005...1, în funcție de stabilitatea obținută
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komegal:=kp1*kc1*ka1*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komegal*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
> F653dec:=(komegal/10^i)*(1+s*(10^i)*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)
> /((1+s*Tic)*s*s*(1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 5 do temp:=F653dec: if i>3 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-200-200*I..20+200*I,color=blue)
> else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-200-200*I..20+200*I,color=red)
> fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-91.75,189,`1`],[-200,162.4,`2`],[-125,21,`3
> `],[-26,-32,`4`],[-16,-37,`5`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..5)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 6

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 6

```

> kp1:=0.1;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=2.55;
kc1=1...27
> kal:=3.13;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pomirea în gol, =593 la pomirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=0.0005;
Tir=0,0005...0,05
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komegal:=kp1*kc1*kal*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komegal*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
> F653dec:=(komegal/10^i)*(1+s*(10^i)*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)
> /((1+s*Tic)*s*s*(1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 5 do temp:=F653dec: if i>3 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-5-5*I..1+5*I,color=blue) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-5-5*I..1+5*I,color=red) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot([[ -2.6, 4.7, `2` ], [ -4.8, 1.3, `3` ], [ -4.8, -2.5, `4` ]
> , [ -4.8, -3.3, `5` ]]);
> G:=display({Gtext,G.(1..5)});
> G;

```

ANEXA Nr. 7

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 7

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> ka1:=1;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pornirea în gol, =593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=0.0005;
Tir=0,0005...0,05
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komega1:=kp1*kc1*ka1*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komega1*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F653: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-150000-100*I..200+75000*I,color
> =blue) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-150000-100*I..200+75000*I,color
> =red) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-27560,12040,`1`],[-53020,25490,`2`],[-74900
> ,36800,`3`],[-95980,48210,`4`],[-113500,57750,`5`],[-115100,63
> 160,`6`],[-110300,63160,`7`],[-103900,63160,`8`],[-97970,63160
> ,`9`],[-92000,63160,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;

```


ANEXA Nr. 8

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 8

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> ka1:=1;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pomirea în gol, =593 la pomirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=0.0005;
Tir=0,0005...0,05
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komegal:=kp1*kc1*ka1*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komegal*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F653: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-500-100*I..250+1500*I,color=blu
> e) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-500-100*I..250+1500*I,color=red
> ) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-447,865,`1`],[-360,865,`2`],[-326,865,`3`],
> [-301,865,`4`],[-282,865,`5`],[-261,865,`6`],[-237,865,`7`],[-
> 208,865,`8`],[-172,865,`9`],[-134,865,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 9

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 9

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> ka1:=1;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pornirea în gol, =593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=0.005;
Tir=0,0005...0,05
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komegal:=kp1*kc1*ka1*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komegal*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F653: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-20000-100*I..200+10000*I,color=
> blue) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-20000-100*I..200+10000*I,color=
> red) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-2785,1290,`1`],[-5510,2650,`2`],[-8240,3980
> ,`3`],[-10920,5390,`4`],[-13590,6750,`5`],[-15140,7644,`6`],[-
> 16000,8287,`7`],[-16645,8850,`8`],[-17230,9292,`9`],[-17660,98
> 55,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 10

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 10

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05...0,81
> kcl:=1;
kc1=1...27
> kal:=1;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> korl:=302;
kor1=302 la pomirea în gol, =593 la pomirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=0.005;
Tir=0,0005...0,05
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komegal:=kp1*kcl*kal*pm*kprim*korl*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komegal*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F653: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-50-10*I..25+100*I,color=blue)
> else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-50-10*I..25+100*I,color=red) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot([[-39,75,`1`],[ -31,75,`2`],[ -28.4,75,`3`],[ -26
> .8,75,`4`],[ -24.6,75,`5`],[ -22,75,`6`],[ -19.25,75,`7`],[ -16,75
> ,`8`],[ -12.5,75,`9`],[ -7.7,75,`10`]]);
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 11

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf) - figura 7. 11

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> ka1:=1;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pornirea în gol, =593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=0.05;
Tir=0,0005...0,05
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komegal:=kp1*kc1*ka1*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komegal*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F653: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-1500-1*I..2+750*I,color=blue)
> else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-1500-1*I..2+750*I,color=red) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-275,120,`1`],[-534,249,`2`],[-769,365,`3`],
> [-972,470,`4`],[-1155,563,`5`],[-1266,631,`6`],[-1206,631,`7`],
> [-1147,631,`8`],[-1091,631,`9`],[-1027,631,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 12

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 12

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> ka1:=1;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pomirea în gol, =593 la pomirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=0.05;
Tir=0,0005...0,05
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komegal:=kp1*kc1*ka1*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komegal*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F653: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-5-1*I..2+10*I,color=blue) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-5-1*I..2+10*I,color=red) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-0.256,0.734,`1`],[ -0.406,1.303,`2`],[ -0.503
> ,1.91,`3`],[ -0.777,2.661,`4`],[ -0.949,3.361,`5`],[ -1.129,3.975
> ,`6`],[ -1.269,4.675,`7`],[ -1.48,5.28,`8`],[ -1.685,5.99,`9`],[ -
> 1.834,6.6,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 13

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 13

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05...0,81
> kcl:=1;
kc1=1...27
> kal:=1;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> korl:=302;
kor1=302 la pornirea în gol, =593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=0.5;
Tir=0,0005...0,05
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komegal:=kp1*kcl*kal*pm*kprim*korl*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komegal*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F653: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-2-0.2*I..0.2+1.2*I,color=blue)
> else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-2-0.2*I..0.2+1.2*I,color=red)
> fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-0.11,0.09,`1`],[ -0.27,0.2,`2`],[ -0.43,0.3,`
> 3`],[ -0.6,0.4,`4`],[ -0.76,0.47,`5`],[ -0.92,0.57,`6`],[ -1.11,0.
> 68,`7`],[ -1.26,0.76,`8`],[ -1.41,0.85,`9`],[ -1.6,0.95,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=3,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 14

Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f_0 -DELTAf, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 14

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> ka1:=1;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pomirea în gol, =593 la pomirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=1;
Tir=0,0005...0,05
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komegal:=kp1*kc1*ka1*pm*kprim*kor1*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komegal*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F653: if i>3 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-2-0.2*I..0.2+1.2*I,color=red)
> else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-2-0.2*I..0.2+1.2*I,color=blue)
> fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-0.11,0.09,`1`],[ -0.25,0.174,`2`],[ -0.39,0.2
> 6,`3`],[ -0.538,0.343,`4`],[ -0.69,0.43,`5`],[ -0.83,0.51,`6`],[ -
> 0.97,0.59,`7`],[ -1.11,0.67,`8`],[ -1.26,0.76,`9`],[ -1.4,0.84,`1
> 0`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=3,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 15

Analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație serie și regulatorul este de tip PI (viteza mare de rotație, deci în afara intervalului (f₀-DELTAf, f₀+DELTAf) - figura 7. 15

```

> kpl:=0.1;
kp1=0,05...0,81
> kcl:=2.55;
kc1=1...27
> kal:=3.13;
ka1=1...5
> kprim:=0.0324;
> pm:=1;
> korl:=302;
kor1=302 la pornirea în gol, =593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> F:=0.00155;
> kEM1:=0.114;
> iT:=34;
> Tir:=0.5;
Tir=0,0005...0,05
> Tic:=0.0005;
> Tp:=1.0178;
> komegal:=kpl*kcl*kal*pm*kprim*korl*kEM1/(F*iT*Tir);
> T:=0.1008;
> Tm:=0.133;
> F653:=komegal*(1+s*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(
> 1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
> F653dec:=(komegal/(1+0.2*i))*(1+s*(1+0.2*i)*Tir)*(1+2*s*Tm+3*s
> ^2*T*Tm)/((1+s*Tic)*s*s*(1+s*Tm+s^2*T*Tm)^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 5 do temp:=F653dec: if i>3 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-3-0.2*I..0.5+0.5*I,color=red)
> else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-3-0.2*I..0.5+0.5*I,color=blue)
> fi
> : od ;
> Gtext:=textplot([[ -2.455,0.4,`1`],[ -2.566,0.2643,`2`],[ -2.668,
> 0.15,`3`],[ -2.761,0.03296,`4`],[ -2.854,-0.06457,`5`]]);
> G:=display({Gtext,G.(1..5)});
> G;

```


ANEXA Nr. 16

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație compund și regulatorul este de tip P (viteza mică de rotație, deci în intervalele (f_0 -DELTAf, f_0 -DELTA f/2), sau (f_0 +DELTA f/2, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 16

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05.....81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> ka1:=1;
ka1=1....5
> Fito:=0.0015;
> TE:=0.1;
> Tf:=0.066;
> Tm1:=0.038;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pornirea în gol, =593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> kEM1:=0.109;
> iT:=34;
> Tic:=0.0005;
> Ti:=0.09;
> km:=98.36;
> Tp:=1.0178;
> k659:=kp1*kc1*ka1*pm*kor1*kEM1/(Fito*km*iT);
> c1:=2*(Tf+Tm1);
> c2:=3*Tm1*Ti+3*Tm1*TE+Tf^2+Tf*Tm1;
> c3:=4*Ti*TE*Tm1+Tf*Ti*Tm1+Tf*TE*Tm1;
> c4:=3*Ti*TE*Tf*Tm1;
> F659:=k659*(1+s*c1+s^2*c2+s^3*c3+s^4*c4)/(s*(1+s*Tf+s*Tm1*(1+s
> *Ti)*(1+s*TE))^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> G659:=conformal(F659,s=0..10*I);
> G659;

```

ANEXA Nr. 17

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație compund și regulatorul este de tip P (viteza mică de rotație, deci în intervalele (f_0 -DELTAf, f_0 -DELTA f/2), sau (f_0 +DELTA f/2, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 17

```
> kp1:=0.05;
kp1=0,05.....81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> ka1:=1;
ka1=1....5
> Fito:=0.0015;
> TE:=0.1;
> Tf:=0.066;
> Tm1:=0.038;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pornirea în gol, =593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> kEM1:=0.109;
> iT:=34;
> Tic:=0.0005;
> Ti:=0.09;
> km:=98.36;
> Tp:=1.0178;
> k659:=kp1*kc1*ka1*pm*kor1*kEM1/(Fito*km*iT);
> c1:=2*(Tf+Tm1);
> c2:=3*Tm1*Ti+3*Tm1*TE+Tf^2+Tf*Tm1;
> c3:=4*Ti*TE*Tm1+Tf*Ti*Tm1+Tf*TE*Tm1;
> c4:=3*Ti*TE*Tf*Tm1;
> F659:=k659*(1+s*c1+s^2*c2+s^3*c3+s^4*c4)/(s*(1+s*Tf+s*Tm1*(1+s*
> *Ti)*(1+s*TE))^2*(1+s*Tp));
```

Grafice

```
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F659: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,color=blue) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,color=blue) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-1.063,-2.129,`1`],[ -2.027,-3.941,`2`],[ -3.0
> 19,-5.667,`3`],[ -4.071,-7.565,`4`],[ -5.064,-9.463,`5`],[ -6.144
> , -11.62,`6`],[ -7.225,-13.69,`7`],[ -8.393,-16.28,`8`],[ -9.502,-
> 18.61,`9`],[ -10.38,-20.35,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;
```

ANEXA Nr. 18

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație compund și regulatorul este de tip P (viteza mică de rotație, deci în intervalele (f_0 -DELTAf, f_0 -DELTA f/2), sau (f_0 +DELTA f/2, f_0 +DELTAf)) - figura 7. 18

```

> kp1:=0.05;
kp1=0,05.....81
> kc1:=1;
kc1=1...27
> ka1:=1;
ka1=1...5
> Fito:=0.0015;
> TE:=0.1;
> Tf:=0.066;
> Tm1:=0.038;
> pm:=1;
> kor1:=302;
kor1=302 la pornirea în gol, =593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> kEM1:=0.109;
> iT:=34;
> Tic:=0.0005;
> Ti:=0.09;
> km:=98.36;
> Tp:=1.0178;
> k659:=kp1*kc1*ka1*pm*kor1*kEM1/(Fito*km*iT);
> c1:=2*(Tf+Tm1);
> c2:=3*Tm1*Ti+3*Tm1*TE+Tf^2+Tf*Tm1;
> c3:=4*Ti*TE*Tm1+Tf*Ti*Tm1+Tf*TE*Tm1;
> c4:=3*Ti*TE*Tf*Tm1;
> F659:=k659*(1+s*c1+s^2*c2+s^3*c3+s^4*c4)/(s*(1+s*Tf+s*Tm1*(1+s*Ti)*(1+s*TE))^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=4*i*F659: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-1-2*I..0+0.5*I,color=blue) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-1-2*I..0+0.5*I,color=blue) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-1.063,-2.129,`1`],[ -2.027,-3.941,`2`],[ -3.0
> 19,-5.667,`3`],[ -4.071,-7.565,`4`],[ -5.064,-9.463,`5`],[ -6.144
> ,-11.62,`6`],[ -7.225,-13.69,`7`],[ -8.393,-16.28,`8`],[ -9.502,-
> 18.61,`9`],[ -10.38,-20.35,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 19

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație compund și regulatorul este de tip PI (viteza mică de rotație, deci în intervalele ($f_0 - \Delta f$, $f_0 - \Delta f/2$), ($f_0 + \Delta f/2$, $f_0 + \Delta f$)) - figura 7. 19

```

> kp1:=0.1;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=2.55;
kc1=1...27
> ka1:=3.13;
ka1=1...5
> Fito:=0.0015;
> TE:=0.1;
> Tf:=0.066;
> Tm1:=0.038;
> pm:=1;
> kor1:=302;
> km:=98.36;
kor1=302 la pomirea în gol,=593 la pomirea cu o sarcină de 50%
> kEM1:=0.109;
> iT:=34;
> Tic:=0.0005;
> Tir:=0.0005;
Tir=0,0005...0,8
> Ti:=0.09;
> Tp:=1.0178;
> k660:=kp1*kc1*ka1*pm*kor1*kEM1/(Fito*km*iT*Tir);
> c1:=2*(Tf+Tm1);
> c2:=3*Tm1*Ti+3*Tm1*TE+Tf^2+Tf*Tm1;
> c3:=4*Ti*TE*Tm1+Tf*Ti*Tm1+Tf*TE*Tm1;
> c4:=3*Ti*TE*Tf*Tm1;
> F660:=k660*(1+s*Tir)*(1+s*c1+s^2*c2+s^3*c3+s^4*c4)/(s*s*(1+s*T
> f+s*Tm1*(1+s*Ti)*(1+s*TE))^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> G660:=conformal(F660,s=0..10*I);
> G660;

```

ANEXA Nr. 20

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație compund și regulatorul este de tip PI (viteza mică de rotație, deci în intervalele (f_0 -DELTA f , f_0 -DELTA $f/2$), (f_0 +DELTA $f/2$, f_0 +DELTA f)) - figura 7. 20

```

> kp1:=0.1;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=2.55;
kc1=1...27
> ka1:=3.13;
ka1=1...5
> Fito:=0.0015;
> TE:=0.1;
> Tf:=0.066;
> Tm1:=0.038;
> pm:=1;
> kor1:=302;
> km:=98.36;
kor1=302 la pornirea în gol,=593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> kEM1:=0.109;
> iT:=34;
> Tic:=0.0005;
> Tir:=0.0005;
Tir=0,0005...0,8
> Ti:=0.09;
> Tp:=1.0178;
> k660:=kp1*kc1*ka1*pm*kor1*kEM1/(Fito*km*iT*Tir);
> c1:=2*(Tf+Tm1);
> c2:=3*Tm1*Ti+3*Tm1*TE+Tf^2+Tf*Tm1;
> c3:=4*Ti*TE*Tm1+Tf*Ti*Tm1+Tf*TE*Tm1;
> c4:=3*Ti*TE*Tf*Tm1;
> F660:=(k660*(1+s*Tir)*(1+s*c1+s^2*c2+s^3*c3+s^4*c4)/(s*s*(1+s*T
> f+s*Tm1*(1+s*Ti)*(1+s*TE))^2*(1+s*Tp)));
> F660dec:=(k660/10^i)*(1+s*(10^i)*Tir)*(1+s*c1+s^2*c2+s^3*c3+s^
> 4*c4)/(s*s*(1+s*Tf+s*Tm1*(1+s*Ti)*(1+s*TE))^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 5 do temp:=F660dec: if i>3 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-30-10*I..5+30*I,color=red) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,-30-10*I..5+30*I,color=blue) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-8.8,25,`1`],[-15.5,19.7,`2`],[-21.3,5.2,`3`
> ],[-7.5,-6.5,`4`],[-4.5,-8.4,`5`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..5)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 21

Program pentru analiza stabilității buclei de reglare a frecvenței când motorul de c.c. funcționează cu excitație compund și regulatorul este de tip PI (viteza mică de rotație, deci în intervalele (f_0 -DELTA f, f_0 -DELTA f/2), (f_0 +DELTA f/2, f_0 +DELTA f)) - figura 7. 21

```

> kp1:=0.1;
kp1=0,05...0,81
> kc1:=2.55;
kc1=1...27
> ka1:=3.13;
ka1=1...5
> Fito:=0.0015;
> TE:=0.1;
> Tf:=0.066;
> Tm1:=0.038;
> pm:=1;
> kor1:=302;
> km:=98.36;
kor1=302 la pornirea în gol,=593 la pornirea cu o sarcină de 50%
> kEM1:=0.109;
> iT:=34;
> Tic:=0.0005;
> Tir:=0.0005;
Tir=0,0005...0,8
> Ti:=0.09;
> Tp:=1.0178;
> k660:=kp1*kc1*ka1*pm*kor1*kEM1/(Fito*km*iT*Tir);
> c1:=2*(Tf+Tm1);
> c2:=3*Tm1*Ti+3*Tm1*TE+Tf^2+Tf*Tm1;
> c3:=4*Ti*TE*Tm1+Tf*Ti*Tm1+Tf*TE*Tm1;
> c4:=3*Ti*TE*Tf*Tm1;
> F660:=(k660*(1+s*Tir)*(1+s*c1+s^2*c2+s^3*c3+s^4*c4)/(s*s*(1+s*Tir)
> f+s*Tm1*(1+s*Ti)*(1+s*TE))^2*(1+s*Tp));
> F660dec:=(k660/10^i)*(1+s*(10^i)*Tir)*(1+s*c1+s^2*c2+s^3*c3+s^
> 4*c4)/(s*s*(1+s*Tf+s*Tm1*(1+s*Ti)*(1+s*TE))^2*(1+s*Tp));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 5 do temp:=F660dec: if i>3 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..20*I,-6-2*I..2+6*I,color=red) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..20*I,-6-2*I..2+6*I,color=blue) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-2.1,5.3,`1`],[ -2.4,4.2,`2`],[ -3.3,1.1,`3`],
> [-3,-2,`4`],[ -2.2,-2,`5`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..5)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 22

Program pentru analiza buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației - figura 7. 22

```

> kp2:=1;
> kc2:=1;
> kA2:=5;
kA2= 1...10
> kE2:=128.5;
> TE2:=0.001;
TE2=0,001...0,009
> kOR2:=0.9463;
kOR2=0,9463 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
kOR2=1,656 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> TOR2:=0.112;
TOR2=0,112 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
TOR2=0,196 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> kEM2:=202;
> F676:=kA2*kE2*kOR2*kEM2/((1+s*TE2)*(1+s*TOR2));
Grafice
> with(plots);
> G676:=conformal(F676, s=0..100*I);
> G676;

```

ANEXA Nr. 23

Program pentru analiza buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației - figura 7. 23

```

> kp2:=1;
> kc2:=1;
> kA2:=5;
kA2= 1...10
> kE2:=128.5;
> TE2:=0.001;
TE2=0,001...0,009
> kOR2:=0.9463;
kOR2=0,9463 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
kOR2=1,656 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> TOR2:=0.112;
TOR2=0,112 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
TOR2=0,196 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> kEM2:=202;
> F676:=kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2/((1+s*TE2)*(1+s*TOR2));
Grafice
> with(plots);
> G676:=conformal(F676,s=100*I..1000*I,-1000-10000*I..1+1*I);
> G676;

```


ANEXA Nr. 24

Program pentru analiza buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației - figura 7. 24

```

> kp2:=1;
> kc2:=1;
> kA2:=5;
kA2= 1 . . . 10
> kE2:=128.5;
> TE2:=0.001;
TE2=0,001 . . 0,009
> kOR2:=0.9463;
kOR2=0,9463 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
kOR2=1,656 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> TOR2:=0.112;
TOR2=0,112 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
TOR2=0,196 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> kEM2:=202;
> F676:=kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2/((1+s*TE2)*(1+s*TOR2));
Grafice
> with(plots);
> G676:=conformal(F676,s=1000*I..13500*I);
> G676;

```

ANEXA Nr. 25

Program pentru analiza buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației - figura 7. 25

```

> kp2:=1;
> kc2:=1;
> kA2:=5;
kA2= 1...10
> kE2:=128.5;
> TE2:=0.001;
TE2=0,001...0,009
> kOR2:=0.9463;
kOR2=0,9463 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
kOR2=1,656 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> TOR2:=0.112;
TOR2=0,112 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
TOR2=0,196 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> kEM2:=202;
> F676:=kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2/((1+s*TE2)*(1+s*TOR2));
Grafice
> with(plots);
> G676:=conformal(F676,s=13500*I..100000*I,-6-0.5*I..0.1+0.1*I);
> G676;

```

ANEXA Nr. 26

Program pentru analiza buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației - figura 7. 26

```

> kp2:=1;
> kc2:=1;
> kA2:=5;
kA2= 1...10
> kE2:=128.5;
> TE2:=0.001;
TE2=0,001...0,009
> kOR2:=0.9463;
kOR2=0,9463 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
kOR2=1,656 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> TOR2:=0.112;
TOR2=0,112 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
TOR2=0,196 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> kEM2:=202;
> F676:=kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2/((1+s*TE2)*(1+s*TOR2));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=1.75*i*F676: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=13500*I..150000*I,-6-0.3*I..0.1+0.1*I,co
> lor=red) else
> G.i:=conformal(temp,s=13500*I..60000*I,-6-0.3*I..0.1+0.1*I,col
> or=blue) fi: od;
> Gtext:=textplot({[-3.83,-0.173,`1`],[-4.485,-0.152,`2`],[-4.85
> ,-0.143,`3`],[-5.26,-0.138,`4`],[-5.56,-0.136,`5`],[-5.874,-0.
> 133,`6`],[-5.68,-0.116,`7`],[-5.438,-0.103,`8`],[-5.147,-0.088
> 8,`9`],[-4.8,-0.075,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=8,ytickmarks=8);
> G;

```

ANEXA Nr. 27

Program pentru analiza buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației - figura 7. 27

```

> kp2:=1;
> kc2:=1;
> kA2:=5;
kA2= 1...10
> kE2:=128.5;
> TE2:=0.009;
TE2=0,001...0,009
> kOR2:=0.9463;
kOR2=0,9463 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
kOR2=1,656 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> TOR2:=0.196;
TOR2=0,112 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
TOR2=0,196 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> kEM2:=202;
> F676:=(kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2/((1+s*TE2)*(1+s*TOR2)));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=1.75*i*F676: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=13500*I..150000*I,-3-0.03*I..0.01+0.01*I
> ,color=red) else
> G.i:=conformal(temp,s=13500*I..60000*I,-3-0.03*I..0.01+0.01*I,
> color=blue) fi: od;
> Gtext:=textplot({[-0.658,-0.00538,`1`],[ -1.208,-0.00984,`2`],[
> -1.734,-0.01382,`3`],[ -2.316,-0.01892,`4`],[ -2.842,-0.02258,`5
> `],[ -2.22,-0.01494,`6`],[ -2.388,-0.01525,`7`],[ -2.595,-0.01589
> ,`8`],[ -2.786,-0.01653,`9`],[ -2.962,-0.01685,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=3,ytickmarks=3);
> G;

```

ANEXA Nr. 28

Program pentru analiza buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației - figura 7. 28

```

> kp2:=1;
> kc2:=1;
> kA2:=5;
kA2= 1...10
> kE2:=128.5;
> TE2:=0.009;
TE2=0,001...0,009
> Ti2:=0.0005;
Ti2=0,0005 . . 0,2
> kOR2:=0.9463;
kOR2=0,9463 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
kOR2=1,656 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> TOR2:=0.196;
TOR2=0,112 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
TOR2=0,196 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> kEM2:=202;
> F676:=(kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2*(1+s*Ti2)/Ti2)/(s*(1+s*TE2)*(
> 1+s*TOR2));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=1.75*i*F676: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=100*I..150000*I,-700000-1*I..1+500000*I,
> color=red) else
> G.i:=conformal(temp,s=100*I..60000*I,-700000-1*I..1+500000*I,c
> olor=blue) fi: od;
> G:=display({G.(1..10)},xtickmarks=3,ytickmarks=3);
> G;

```

ANEXA Nr. 29

Program pentru analiza buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației - figura 7. 29

```

> kp2:=1;
> kc2:=1;
> kA2:=5;
kA2= 1...10
> kE2:=128.5;
> TE2:=0.009;
TE2=0,001...0,009
> Ti2:=0.0005;
Ti2=0,0005 . . 0,2
> kOR2:=0.9463;
kOR2=0,9463 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
kOR2=1,656 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> TOR2:=0.196;
TOR2=0,112 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
TOR2=0,196 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> kEM2:=202;
> F676:=(kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2*(1+s*Ti2)/Ti2)/(s*(1+s*TE2)*(
> 1+s*TOR2));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=1.75*i*F676: if i>5 then
> G.i:=conformal(temp,s=12000*I..150000*I,color=red) else
> G.i:=conformal(temp,s=12000*I..60000*I,color=blue) fi: od;
> Gtext:=textplot({[-0.855,0.1328,`1`],[ -1.74,0.267,`2`],[ -2.577
> ,0.395,`3`],[ -3.391,0.5356,`4`],[ -4.275,0.6586,`5`],[ -5.112,0.
> 7929,`6`],[ -5.973,0.9328,`7`],[ -6.787,1.061,`8`],[ -7.647,1.19,
> `9`],[ -8.345,1.297,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=3,ytickmarks=3);
> G;

```

ANEXA Nr. 30

Program pentru analiza buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației - figura 7. 30

```

> kp2:=1;
> kc2:=1;
> kA2:=5;
kA2= 1...10
> kE2:=128.5;
> TE2:=0.009;
TE2=0,001...0,009
> Ti2:=0.0005;
Ti2=0,0005...0,2
> kOR2:=1.656;
kOR2=0,9463 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
kOR2=1,656 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> TOR2:=0.196;
TOR2=0,112 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
TOR2=0,196 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> kEM2:=202;
> k676:=(kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2/Ti2);
> F676_1:=(kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2*(1+s*Ti2)/Ti2)/(s*(1+s*TE2)
> *(1+s*TOR2));
Grafice
> with(plots);
> F676_1dec:=(k676/10^i)*(1+s*(10^i)*Ti2)/(s*(1+s*TE2)*(1+s*TOR2
> ));
Grafice
> for i from 0 to 0 do temp:=F676_1dec: if i>1 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,color=red) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..10*I,color=blue) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-2.1,5.3,`1`],[-2.4,4.2,`2`],[-3.3,1.1,`3`],
> [-3,-2,`4`],[-2.2,-2,`5`]});
> G:=display({Gtext,G.(0..0)},xtickmarks=3,ytickmarks=3);
> G;

```

ANEXA Nr. 31

Program pentru analiza buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației - figura 7. 31

```

> kp2:=1;
> kc2:=1;
> kA2:=5;
kA2= 1...10
> kE2:=128.5;
> TE2:=0.009;
TE2=0,001...0,009
> Ti2:=0.0005;
Ti2=0,0005...0,2
> kOR2:=1.656;
kOR2=0,9463 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
kOR2=1,656 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> TOR2:=0.196;
TOR2=0,112 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
TOR2=0,196 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> kEM2:=202;
> k676:=(kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2/Ti2);
> F676_1:=(kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2*(1+s*Ti2)/Ti2)/(s*(1+s*TE2)
> *(1+s*TOR2));
Grafice
> with(plots);
> F676_1dec:=(k676/10^i)*(1+s*(10^i)*Ti2)/(s*(1+s*TE2)*(1+s*TOR2
> ));
> for i from 0 to 3 do temp:=F676_1dec: if i>1 then
> G.i:=conformal(temp,s=0..1000*I,-10000-5000*I..1+5000*I,color=
> blue) else
> G.i:=conformal(temp,s=0..1000*I,-10000-5000*I..1+5000*I,color=
> red) fi
> : od ;
> Gtext:=textplot({[-2380,4500,`1`],[-5340,1440,`2`],[-5340,-406
> 1,`3`],[-4300,-4340,`4`]});
> G:=display({Gtext,G.(0..3)},xtickmarks=3,ytickmarks=3);
> G;

```

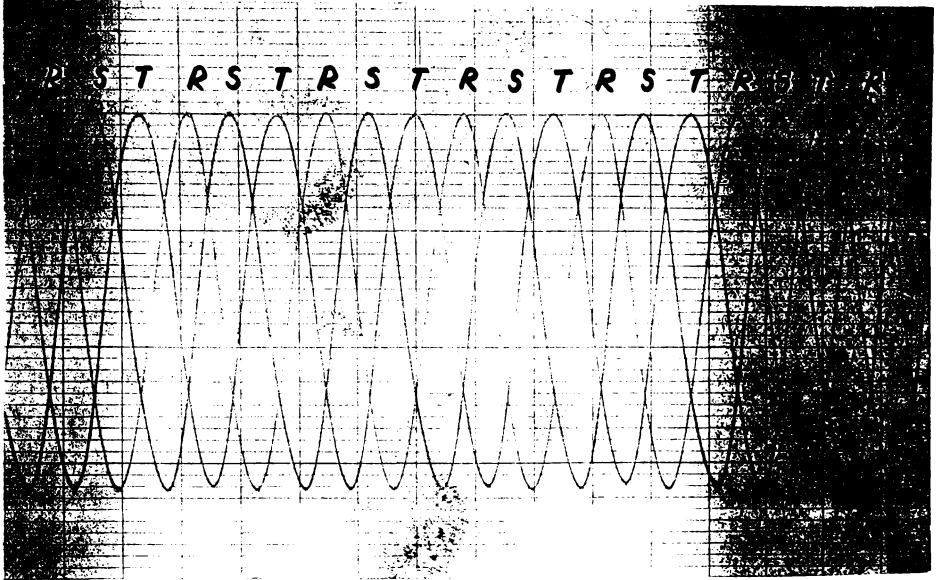

ANEXA Nr. 32

Program pentru analiza buclei de reglare a tensiunii, când nu se ia în considerare constanta de timp a excitației - figura 7. 32

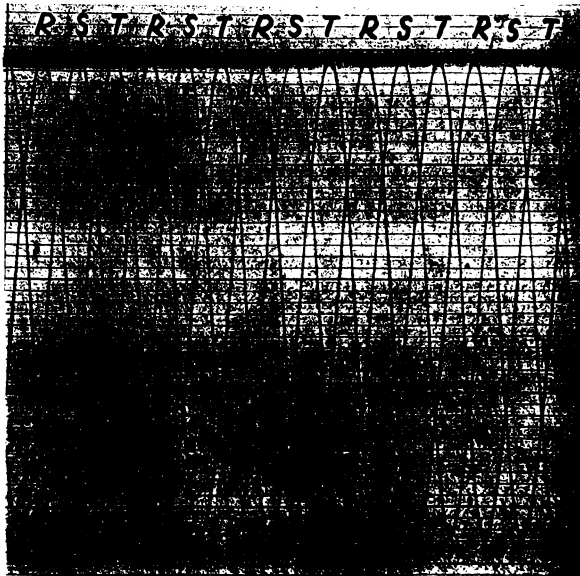
```

> kp2:=1;
> kc2:=1;
> kA2:=5;
kA2= 1...10
> kE2:=128.5;
> TE2:=0.009;
TE2=0,001...0,009
> Ti2:=0.005;
Ti2=0,0005...0,2
> kOR2:=0.9463;
kOR2=0,9463 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
kOR2=1,656 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> TOR2:=0.196;
TOR2=0,112 (într-un punct din zona saturată a caracteristicii de mers în gol);
TOR2=0,196 (într-un punct din zona nesaturată a caracteristicii de mers în
gol).
> kEM2:=202;
> F676:=(kp2*kc2*kA2*kE2*kOR2*kEM2*(1+s*(1+0.1*i)*Ti2)/(1+0.1*i
> *Ti2)/(s*(1+s*TE2)*(1+s*TOR2)));
Grafice
> with(plots);
> for i from 1 to 10 do temp:=F676: if i>3 then
> G.i:=conformal(temp,s=35*I..200*I,-1.5-0.3*I..0.1+0.1*I,color=
> blue) else
> G.i:=conformal(temp,s=40*I..200*I,-1.5-0.3*I..0.1+0.1*I,color=
> red) fi: od;
> Gtext:=textplot({[-1.272,0.044,`1`],[ -1.213,0.008,`2`],[ -1.153
> ,-0.018,`3`],[ -1.111,-0.041,`4`],[ -1.064,-0.063,`5`],[ -1.031,-
> 0.08,`6`],[ -0.992,-0.098,`7`],[ -0.9627,-0.1127,`8`],[ -0.9373,-
> 0.133,`9`],[ -0.8695,-0.1446,`10`]});
> G:=display({Gtext,G.(1..10)},xtickmarks=3,ytickmarks=3);
> G;

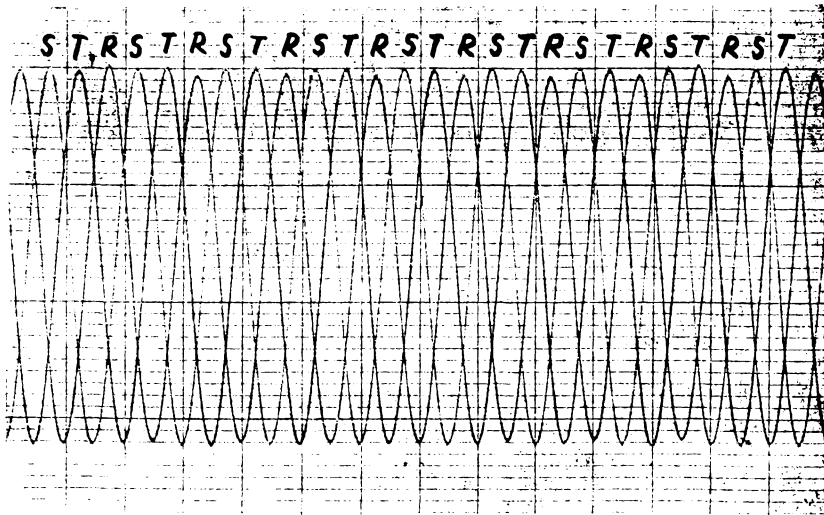
```



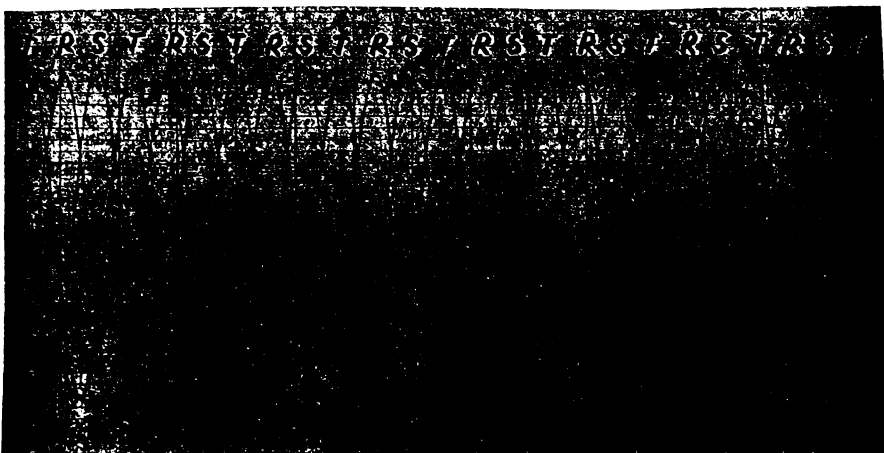
Forma de variație a tensiunilor fazelor G.S. la „mersul în gol”, corespunzătoare unei valori efective de fază de 223 V.



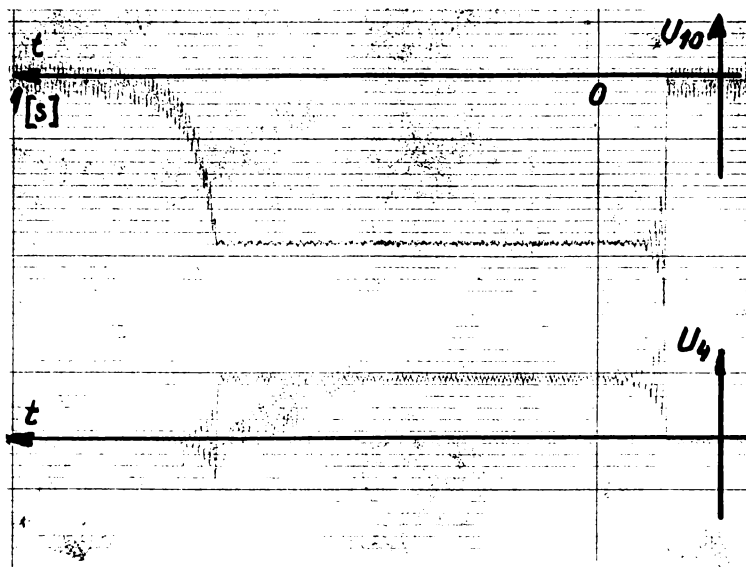
Forma de variație a tensiunilor fazelor G.S. la mersul în sarcină rezistivă simetrică, $P_e=1.58 \text{ kW}$



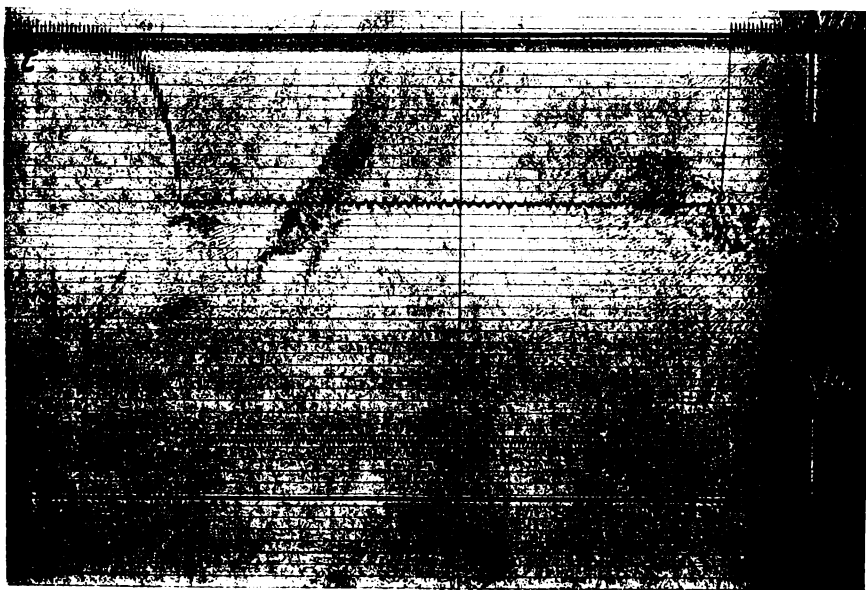
Formele de variație ale tensiunilor celor trei faze. la încărcare trifazată rezistivă nesimetrică. $P_c=1.020$ W (figura 8 14)



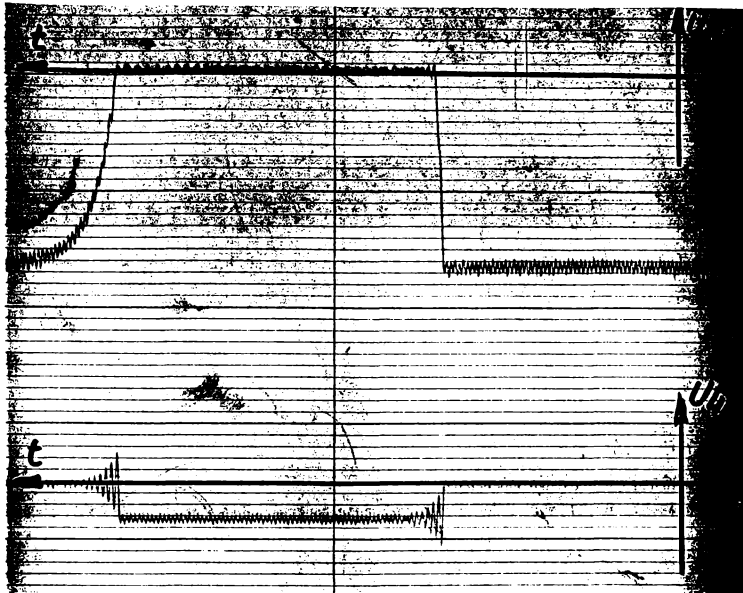
Formele de variație ale tensiunilor celor trei faze. la încărcare trifazată rezistivă nesimetrică $P_c=1.440$ W (figura 8 15)



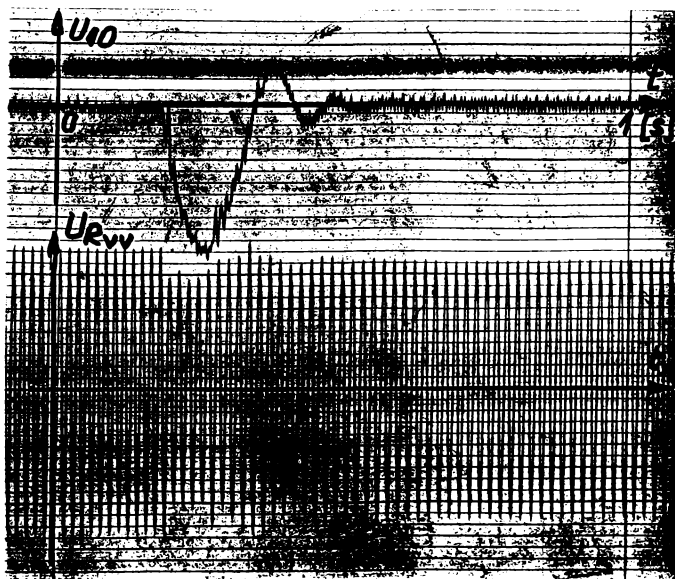
Variația tensiunii de ieșire a regulatorului PI din bucla de reglare a tensiunii, la semnal treaptă de intrare (figura 8.18).



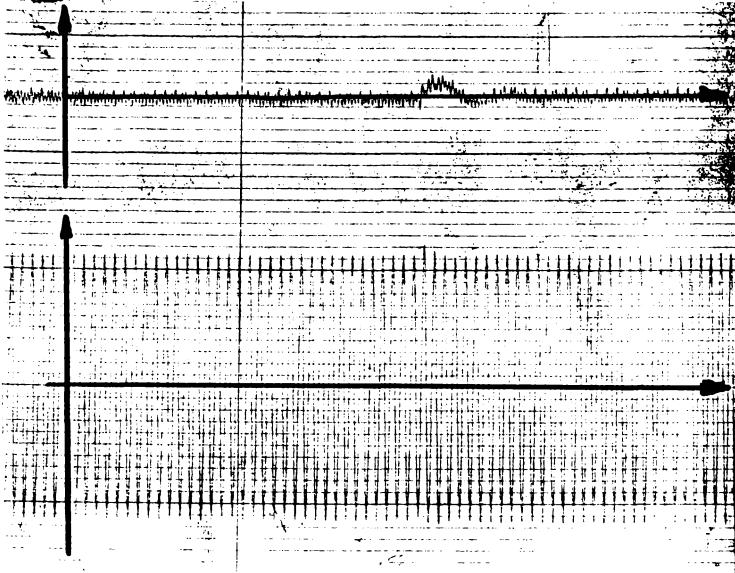
Răspunsul amplificatorului regulator la semnal treaptă crescător aplicat la intrare (figura 8.19)



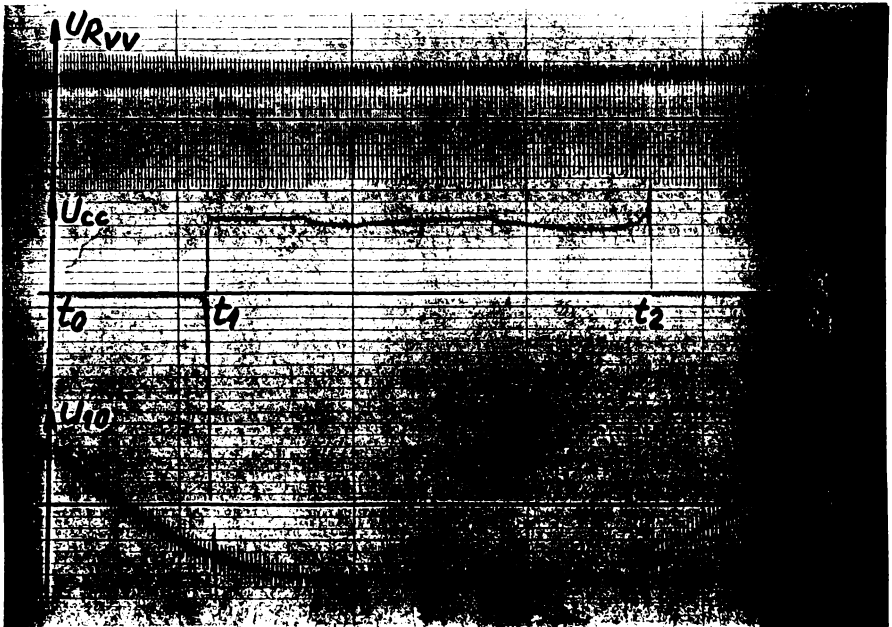
Răspunsul amplificatorului regulator la semnal treaptă descrescător aplicat la intrare.



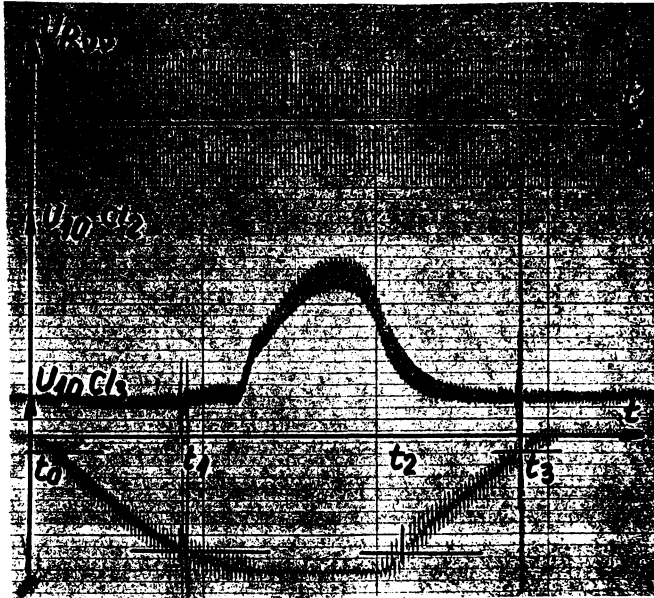
Variația tensiunii unei faze la pomirea în gol a unui motor asincron de 1,5 kW.



Variația tensiunii unei faze la conectarea unei sarcini rezistive de 1,5 kW.



Variația tensiunii la ieșirea convertorului frecvență - tensiune (U_{10}), a tensiunii de alimentare a motorului de c.c. cu două viteze de rotație și a unei faze a G.S.



Variația tensiunii la ieșirea convertorului $f - U$ ($U_{10} Cl_3$ din bucla de reglare a frecvenței), a tensiunii de comandă a circuitelor $\beta A 145$ ($U_{10} Cl_2$ din bucla de reglare a tensiunii) și a tensiunii unei faze a G.S., într-un ciclu de variație a frecvenței între 55 și 45 Hz

**Lista aparatelor și înregistratoarelor utilizate pentru realizarea încercărilor asupra
prototipului microhidrocentralei și a aparaturii utilizate pentru
prelucrarea datelor rezultate**

- 1. Calculator compatibil IBM, DTK Pentium-S/120, seria UC 0.301.0099, produs de Datatech Enterprises Co., Ltd., Taiwan.
- 2. Generator de joasă frecvență 1 Hz - 1 MHz, tip E 0501, seria 210/76, produs de IAEMI București.
- 3. Instrument de măsură digital, tip DT 3.800, produs de Konrad Electronics, Germania.
- 4. Instrument de măsură digital, tip 36 B, produs de Konrad Electronics, Germania.
- 5. Instrument de măsură digital, tip 215 T, produs de Konrad Electronics, Germania.
- 6. Înregistrator optic cu opt canale 8 RS - 1, cu redare pe hârtie autodevelopantă, tip 4621.11, seria 3.107.13.473, produs de RFT, R.D. Germană.
- 7. Multimetric digital cu indicator de valoare minimă și maximă a mărimilor măsurate, tip Finest 3.487 A, seria LT-2.348, produs de Sinclair Digital Co., USA.
- 8. Osciloscop, tip E 0104, seria 991/80, produs de I.A.E.M.I. București.
- 9. Osciloscop digital cu două spoturi, cu memorie și cu port serial pentru transmisie de date către calculator compatibil IBM, tip Tektronix 2.201, seria H 702832, produs de Tektronix Industries, U.S.A.
- 10. Scanner A4 Scan, tip AS - 8.000 PE, seria S/N 92033176, produs de A4 Tech, Taiwan.
- 11. Sursă stabilizată de tensiune continuă 2x20 V, 400/400 mA, tip E 4.109, seria 152/80, produsă de I.A.E.M.I. București
- 12. Trusă voltampermetrică QN - 10, seria 561137, produsă de Metra, R.S. Cehoslovacia.
- 13. Voltampermetru analogic LDAV, tip MSZ808, seria 084160, produs de EKM, Ungaria.

□□□
□

184 p. cu fig. tab.
Pret: 2.500 lei