

Universitatea " Politehnica" Timișoara
Facultatea de Electrotehnică

Ing. Popa Gabriel Nicolae

Teză de doctorat

Contribuții privind îmbunătățirea performanțelor unor electrofiltre
industriale pentru sisteme bifazice gaz-particule solide

369 641.504
Δ

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Șora Ioan

Timișoara
2004

1. INTRODUCERE

Una dintre principalele probleme cu care se confruntă omenirea este poluarea atmosferică datorată în special industrializării puternice din ultimii 100 de ani. Poluarea se datorează în primul rând arderii combustibililor fosili (cărbune și petrol sau produși ai petrolului) sau prin prelucrarea minereurilor neferoase, feroase și a materialelor de construcții. Pe lângă efectul negativ al poluării asupra sănătății faunei și florei, aceasta a determinat și subțierea stratului de ozon și efectul de seră, care vor avea implicații ireversibile asupra vieții pe Terra.

În Comunitatea Economică Europeană s-a emis norma 88/609/EEC din 28-29.06.1988 cu privire la concentrațiile de SO₂, NO_x și pulberi în funcție de tipul combustibilului și puterea termică (tabelul 1.1) [69].

Tabelul 1.1

Tipul de combustibil	Putere termică MW	Concentrația maximă în gazele de ardere uscate în mg/m ³ _x (pentru instalații noi)		
		SO ₂	NO _x	Pulberi
solid	50-100	2000	350	100
	100-500	2000-400 (variație liniară în funcție de putere)	650	100
	>500		650	50
lichid	50-100	1700	450	50
	100-500	1700-400 (variație liniară în funcție de putere)	450	50
	>500		450	50

Dioxidul de sulf (SO₂), oxizii de azot (NO_x obținuți prin combinația NO și NO₂) și praful cu diametre echivalente sub 2,5 μm, dacă se găsesc în concentrații mari determină iritații și cauzează chiar boli ale sistemului respirator. Dioxidul de sulf se formează din sulful conținut în combustibili. Oxizii de azot se formează din azotul din aer și cel din combustibil în urma procesului de ardere. Cele mai multe surse de combustie emit atât SO₂ cât și NO_x în același timp [145].

Desfășurarea activităților industriale trebuie să aibă loc, prin respectarea strictă a normativelor și reglementărilor în vigoare, cu privire la prevenirea sau diminuarea poluării mediului înconjurător. Pentru separarea particulelor din mediul bifazic gaz-solid se utilizează diferite desprăfuitoare: cicloane (separare inerțială), multicicloane, instalații cu spălare umedă la presiune medie, spălare umedă la presiune înaltă, filtre cu saci, filtre electrostatice uscate, filtre electrostatice umede, etc. Diferitele metode de desprăfuire pot fi foarte eficiente pentru diametre ale particulelor de praf de până la 10 μm, performanțe foarte scăzute obținându-se pentru particule cu diametre sub 1 μm, particule de praf care se întâlnesc în cele mai multe procese industriale [93].

Electrofiltrele sunt utilizate de peste 100 de ani la separarea particulelor de praf în diferite aplicații industriale. Până nu demult era considerat suficient ca aceste instalații să colecteze peste 90% praf, dar în prezent datorită legislațiilor existente referitoare la emisiile de praf și prin utilizarea unor tehnologii moderne gradul de colectare a ajuns la peste 99%. În prezent, se consideră suficientă o colectare cu o emisie de praf de până la 50 mg/m^3 . Avantajele electrofiltrelor sunt: consum specific mic de energie electrică $0,05 \text{ kWh} - 0,5 \text{ kWh}/1000 \text{ m}^3$ gaz epurat, posibilitatea de a lucra la temperaturi până la 500°C , atât în condiții de depresiune sau presiune de câteva atmosfere, pot epura de la câțiva m^3/h până la sute de mii de m^3/h , toate acestea în condițiile unui înalt grad de desprăfuire (peste 97% particule separate electrostatic), iar pierderea de presiune pe electrofiltru este mică. Deși necesită o investiție destul de mare iar gabaritul este mare, au o construcție destul de simplă și pot fi automatizate complet [156].

Sunt utilizate în termocentrale electrice, fabrici de hârtie, de ciment, industria siderurgică și industria chimică, și au două utilizări principale:

- reducerea poluării aerului din mediul ambiant;
- colectarea particulelor de praf în vederea reutilizării lor.

Gradul de colectare al electrofiltrelor este influențat de construcția sursei de alimentare cu energie electrică, de construcția filtrului, de modul de dispunere al electrozilor de emisie și a celor de depunere, de distribuția vitezelor particulelor în filtru, de proveniența prafului, de rezistivitatea și dimensiunea particulelor, de modul de întreținere al filtrului și de schimbările care au loc în proces [88,100,137].

În cazul termocentralelor, după arderea combustibilului (cărbune) din cazan, gazul rezultat trebuie desprăfuit. Termocentralele reprezintă cea mai importantă aplicație a electrofiltrelor. Precipitabilitatea prafului (care conține sulf și metale alcaline) depinde de rezistivitate. Variații în cadrul procesului de ardere a combustibilului determină rezistivități ale prafului între 10^8 și $10^{14} \Omega\text{cm}$. Rezistivități mari apar la cărbunii sulfuroși inferiori care sunt utilizați la ardere. O mare importanță o au depresiunea și temperatura de operare a electrofiltrelor care influențează condițiile de suprafață ale particulelor din gaz, modificându-se astfel rezistivitatea mediului gaz-solid.

În producția de ciment, electrofiltrele pot fi clasificate în uscate, umede și semiumede. Dificultatea majoră din cadrul acestui tip de industrie este tratarea kilnerului rezultat în urma procesului. Problemele apar mai ales în cazul utilizării electrofiltrelor umede. Particulele de praf sunt de obicei mai mici de $10 \mu\text{m}$ în diametru, multe dintre ele având diametrul mai mic de $4 \mu\text{m}$. Dimensiunile tipice depind de natura materialelor utilizate și, în particular, de metodele de strivire și măcinare, rezistivitatea modificându-se într-un domeniu larg. Temperatura gazului afectează puternic performanțele de colectare a electrofiltrelor. Pentru procesele semiumede rezistivitatea la temperatura de 100°C este mai mică de $10^{10} \Omega\text{cm}$, iar la temperaturi mai mari de 150°C rezistivitatea crește la valori mai mari de $10^{12} \Omega\text{cm}$.

Industria siderurgică este foarte complexă, etapele de producere a oțelului fiind: extragerea minereului, prepararea minereului, aglomerarea lui, topirea în furnal și elaborarea oțelului. Prepararea minereului cauzează probleme serioase mediului înconjurător, rezistivitatea prafului fiind de 10^{11} până la $10^{13} \Omega\text{cm}$. În combinatele de sinterizare a oțelului procesul implică debite mari de gaz și densitate mare de praf la temperaturi corespunzătoare temperaturii maxime. În România,

cu ajutorul electrofiltrelor rezultă 250000 t/an de praf ultrafin rezultat în urma procesului de aglomerare [18].

Producția sticlei necesită următoarele faze: prepararea materialelor, topirea în furnal, formarea și finisarea. Furnalul de topire contribuie cu peste 99% din poluarea totală cu praf a fabricilor de sticlă. Particulele rezultate din volatilizarea materialelor în timpul topirii se combină cu gaze și formează condens. Dimensiunea particulelor variază între 1 și 30 μm , depinzând de tipul sticlei. Rezistivitatea prafului este cuprinsă între 10^6 și 10^{13} Ωcm .

Pentru industriile amintite mai sus, se prezintă în tabelul 1.2 domeniile de variație pentru principalii parametri de care depinde colectarea electrofiltrelor [14].

Tabelul 1.2

Domeniul industrial	Debit [m^3/s]	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Densitatea prafului [$\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$]	Diametrul particulelor [μm]	Diametrul mediu [μm]	Rezistivitatea [Ωcm]
Producerea energiei electrice	60-800	120-180	5-25	5-30	10	10^9-10^{13}
Industria cimentului	30-500	100-350	5-50	2-50	5	$10^8-6 \cdot 10^{12}$
Industria siderurgică	40-400	80-180	5-15	6-50	15	$10^9-5 \cdot 10^{12}$
Industria sticlei	7-100	240-400	0,1-3	1-8	3	10^6-10^{13}

În cazul întreprinderilor noi, investițiile pentru o instalație de desprăfuire cu electrofiltre este de 4-5% pentru o termocentrală, iar pentru o fabrică de ciment de 5-10%. Costurile de implementare a electrofiltrelor în cazul întreprinderilor vechi este mai mare și necesită soluții deosebite [137].

Autorul exprimă cele mai alese mulțumiri și sentimente de recunoștință, coordonatorului științific, d-lui prof.dr.ing. Șora Ioan, pentru îndrumarea competentă și plină de înțelegere.

În perioada de elaborare a acestei lucrări, autorul a beneficiat de sprijinul esențial al d-lui dr.ing. Vaida Victor, director general la S.C. Electrocentrale Deva S.A, căruia îi mulțumește pentru bunăvoință. Tot pe această cale mulțumește d-lui ing. Borca Mircea pentru ajutor.

Aduce calde mulțumiri colegilor de la Facultatea de Inginerie Hunedoara, d-lui decan conf.dr.ing. Rusu Nicolae, d-lui conf.dr.ing. Deaconu Sorin, d-lui conf.dr.ing. Pănoiu Caius și d-lui prep.ing. Abrudean Cristian pentru sfaturile utile și pentru sprijinul acordat în perioada de pregătire a acestei lucrări. Aceleași mulțumiri le aduce și d-lui conf.dr.ing. Titihăzan Viorel de la Facultatea de Electrotehnică, Universitatea "Politehnica" Timișoara.

Nu în ultimul rând, aduce cele mai calde mulțumiri soției, Ana-Maria, părinților, conf.dr.ing. Popa Iosif și prof.matematică Popa Georgeta Victoria pentru dragostea, înțelegerea și sprijinul, atât moral cât și științific, acordat de-a lungul perioadei de elaborare a acestei lucrări.

Hunedoara, 22.01.2004

2. CONSTRUCȚIA ELECTROFILTELOR CU PLĂCI

2.1. Generalități

Electrofiltrele cu plăci epurează sute de mii de m^3/h cu randamente care depășesc 95%, iar volumul lor este foarte mare (comparabil cu al unei hale industriale). De obicei, costurile legate de întreținere este egal cu cel al energiei consumate. Într-o termocentrală electrică, electrofiltrele consumă aproximativ 1% din energia produsă de acestea. Integrarea electrofiltrelor într-o termocentrală se face ca în schema de principiu din fig.2.1 [39]. În fig.2.1 se prezintă o montare specială deoarece pentru epurarea gazelor se utilizează și cicloane la desprăfuire. Electrofiltrele cu plăci sunt amplasate între cicloanele de desprăfuire și coșul de evacuare al gazelor arse. Cicloanele sunt utilizate pentru desprăfuirea gazelor de particule mari de praf, iar electrofiltrele epurează gazele de ardere de particulele mici de praf. Există și posibilitatea ca electrofiltrele să fie utilizate singure fără cicloane (desprăfuitoare mecanice).

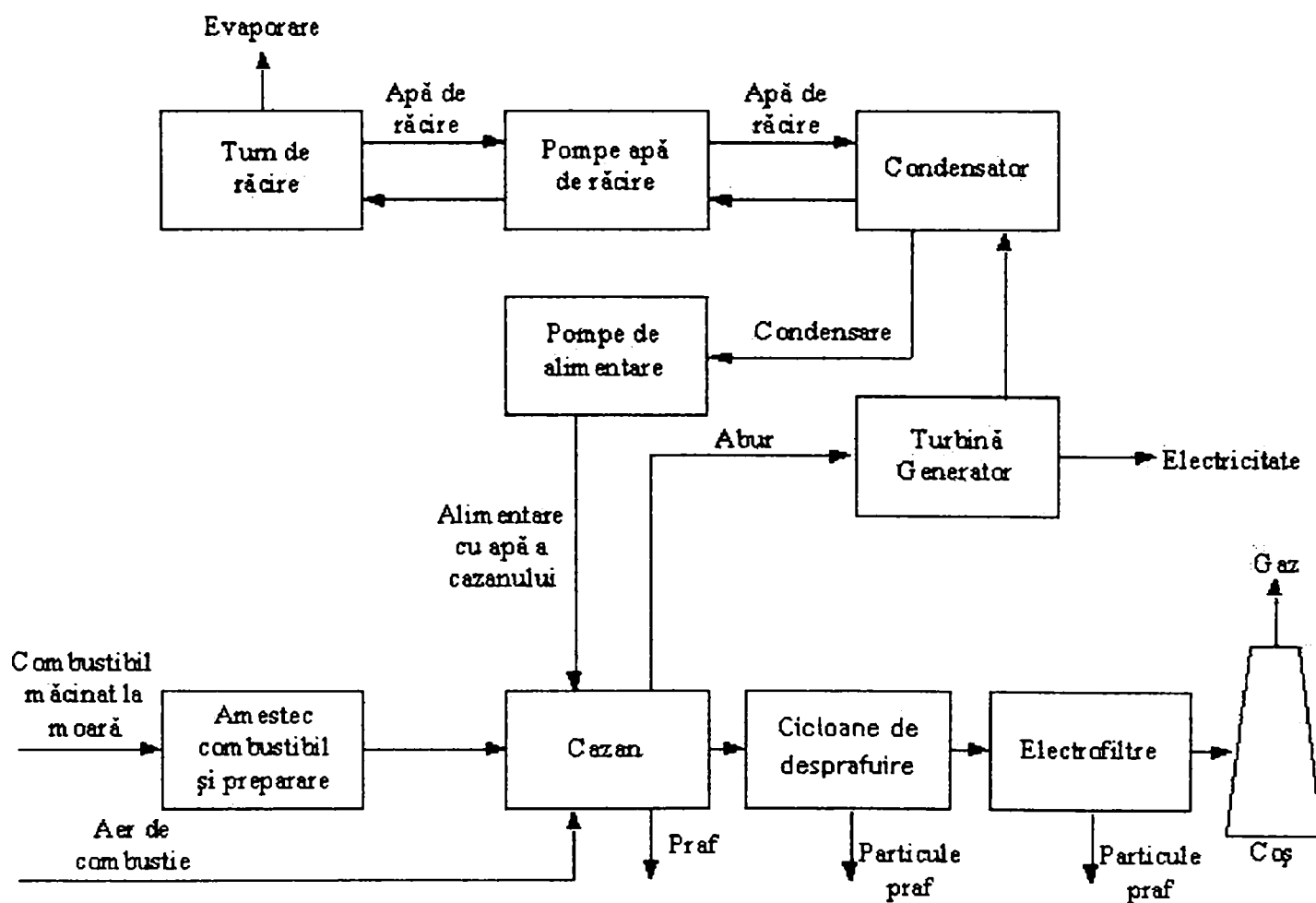


Fig.2.1. Schema de principiu a unei termocentrale

În fig.2.2 se prezintă o instalație de alimentare cu energie electrică a unui electrofiltru.

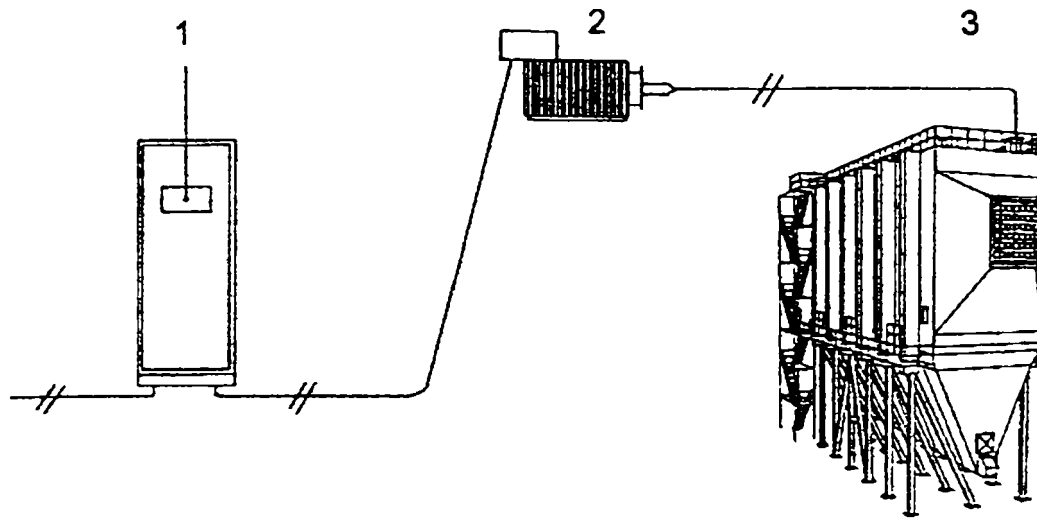


Fig.2.2. Principiul de alimentare al electrofiltrelor

unde: 1 este partea de alimentare, comandă și reglare automată a convertorului de alimentare cu energie electrică al electrofiltrului, 2 – incintă care conține transformatorul ridicător de tensiune și puntea redresoare (imersate în ulei), 3 – electrofiltru.

2.2. Variante constructive

2.2.1. Părțile componente ale electrofiltrelor cu plăci

În funcție de procesul tehnologic, de natura particulelor separate, de gradul de separare și de caracteristicile gazului purtător există mai multe tipuri de electrofiltre [88,93].

O clasificare este după direcția de curgere a gazului purtător de particule ce urmează a fi separate. După acest criteriu electrofiltrele se împart în:

- electrofiltre orizontale;
- electrofiltre verticale.

Principala diferență între cele două tipuri de electrofiltre constă în faptul că direcția de curgere a gazelor se schimbă la electrofiltrul vertical (gazul intră în plan orizontal și iese în plan vertical).

După depozitarea particulelor de praf, acestea trebuie evacuate din corpul filtrului. În funcție de starea depunerilor separate electrofiltrele se împart în:

- electrofiltre uscate;
- electrofiltre umede.

Pentru evacuarea particulelor din electrofiltrele uscate se utilizează transportoare cu raclete, iar pentru electrofiltrele umede sisteme hidraulice.

După dispunerea relativă a electrozilor de emisie și depunere, electrofiltrele se împart în:

- dispunere separată a electrozilor de emisie și de depunere;
- dispunere în același câmp a electrozilor de emisie și de depunere;
- dispunere în același câmp a electrozilor de emisie și de depunere cu electrozi de depunere suplimentari.

Electrozii de emisie și de depunere pot fi așezați în diferite sisteme:

- sisteme plane;

- sisteme concentrice;
- sisteme mixte.

Pentru a avea o eficiență mai bună electrofiltrele se împart în câmpuri. Ele pot fi:

- cu un singur câmp;
- cu mai multe câmpuri;
- cu câmpuri secționizate.

Uneori, pentru ca mărimea electrofiltrului să nu fie prea mare se recurge la o separare mecanică a prafului, înainte de a fi separat electrostatic. Separarea mecanică se realizează cu ajutorul unor jaluzele în racordul de intrare [88].

Există două tipuri de electrofiltre cu o singură secțiune [93]:

- cilindric (fig.2.3.a);
- paralelipipedic (fig.2.3.b).

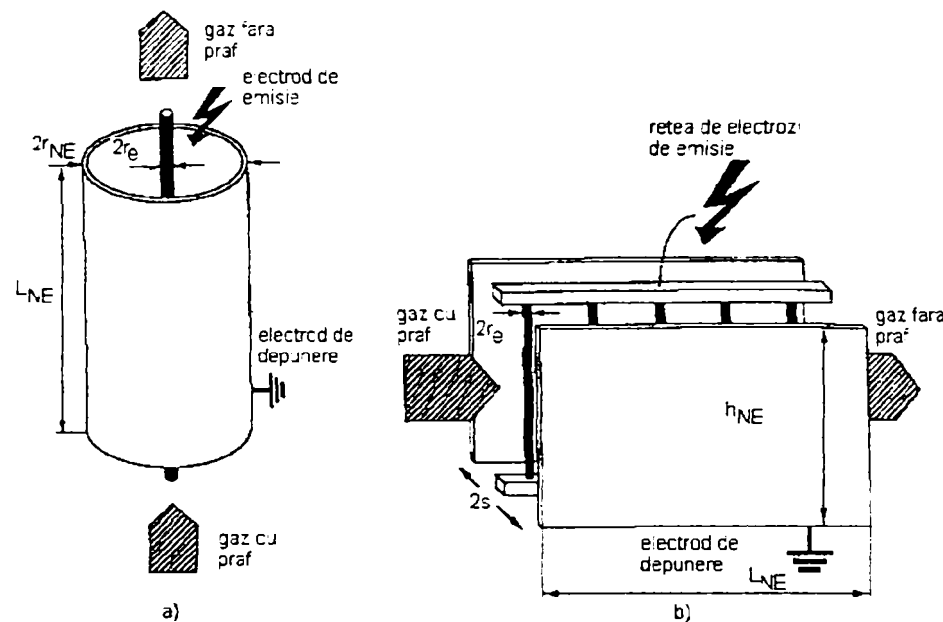


Fig.2.3. Tipuri de electrofiltre cu o singură secțiune

La electrofiltrele tubulare, firul de descărcare și tubul sunt montate vertical, în cele mai multe aplicații suprafața colectoare (interiorul cilindrului) este curățată printr-un film de lichid care curge uniform spre zona de colectare a prafului. În trecut, electrofiltrele tubulare erau utilizate în aplicațiile uscate, iar stratul de praaf era îndepărtat prin impact mecanic la fel ca la electrofiltrele paralelipipedice. Acest tip constructiv se utilizează de obicei în industria chimică.

La electrofiltrele paralelipipedice electrozii de descărcare sunt orientați vertical de-a lungul plăcilor colectoare, electrozii de descărcare fiind paraleli cu suprafețele colectoare formând astfel niște canale prin care curge gazul încărcat cu praaf. Praful este depozitat de-a lungul suprafețelor colectoare datorită forțelor care acționează asupra particulelor. Suprafețele sunt curățate prin impact mecanic, straturile de praaf cazând în buncăre. O alternativă a îndepărtării mecanice a straturilor de praaf depuse pe plăcile colectoare, este utilizarea curgerii unui fluid peste plăcile colectoare [134].

Electrofiltrele industriale au suprafețele colectoare împărțite în câmpuri electrice legate în serie și paralel. Un câmp este caracterizat prin aceea că se alimentează de la o sursă de tensiune independentă. De aceea câmpurile electrofiltrului pot funcționa în condiții electrice diferite, pentru diferite dimensiuni de particule. Astfel, condițiile de operare pot fi optimizate pentru diferite

încărcări cu praf și pentru diferite dimensiuni ale particulelor la trecerea gazului prin câmpurile electrofiltrului. La electrofiltrele paralelipipedice, sensul de curgere a gazului este perpendicular pe rândurile electrozilor de descărcare. Curgerea gazelor trebuie să fie uniformă pentru a avea loc o încărcare corespunzătoare a particulelor pe înălțimea electrofiltrului. O atenție deosebită trebuie avută pentru obținerea unei distribuții omogene a curgerii gazului la intrarea în electrofiltru.

Electrofiltrele uscate cu plăci constituie varianta cea mai întâlnită în practică datorită avantajelor pe care le au comparativ cu alte tipuri de electrofiltre: obținerea unor grade de separare mai mari, fiabilitate crescută și posibilitatea de a trata debite de gaze foarte mari. Deși diferă de la un constructor la altul, există părți constructive care se regăsesc la toate tipurile de electrofiltre. Acestea sunt: carcasa, electrozii de emisie, de depunere, racordurile de intrare și de ieșire, dispozitivele de uniformizare a gazelor, lagărele de susținere, dispozitivele de scuturare, instalația electrică, izolația termică și echipamentele anexe [88,159,167].

O vedere de ansamblu a unui electrofiltru uscat cu plăci este prezentată în fig.2.4 și 2.5.

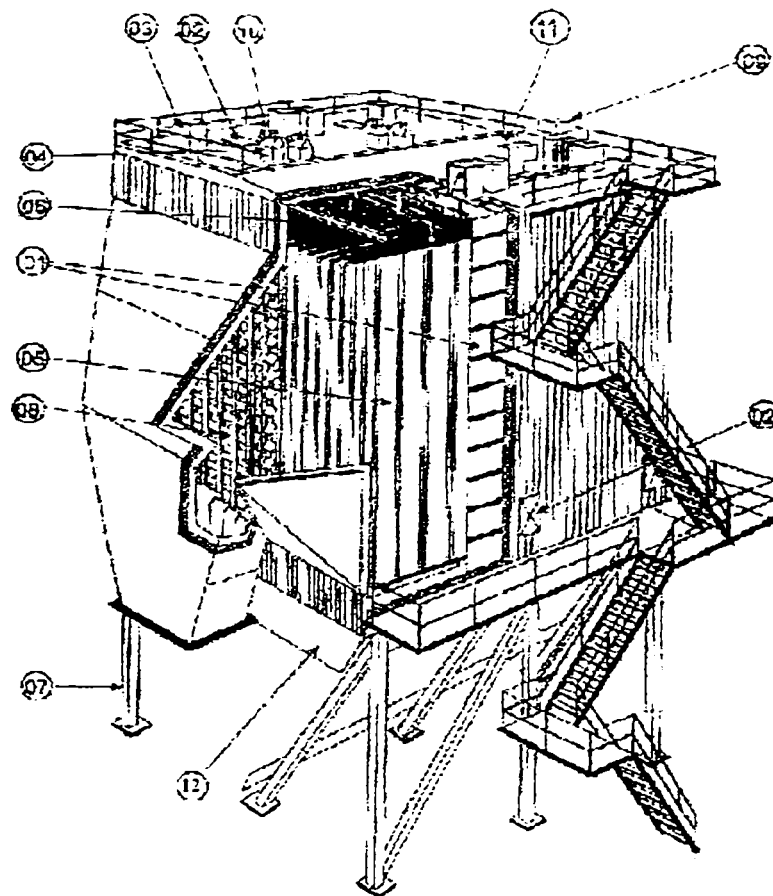


Fig.2.4. Vedere de ansamblu a unui electrofiltru cu două câmpuri

Reperetele din fig.2.4 au semnificațiile: 01 – carcasa electrofiltrului, tubulatura de intrare; 02 – ușa de vizitare; 03 – compartimentele izolatoarelor; 04 – grupul de acționare pentru mecanismele de scuturare; 05 – plăci de colectare; 06 – electrozii de descărcare; 07 – suporturi metalici de susținere a carcasei electrofiltrului; 08 – ecrane de distribuție a gazelor; 09 – grup format din transformator și redresor; 10 – motoreductoare; 11 – izolatoare de intrare; 12 – buncăre de colectare a prafului precipitat.

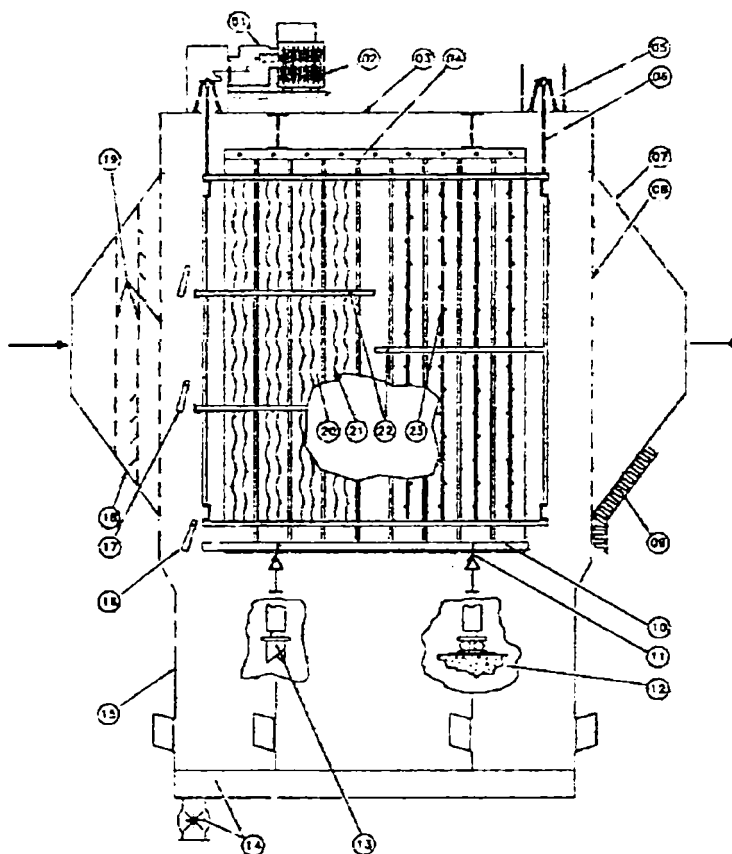


Fig.2.5. Secțiune longitudinală printr-un electrofiltru cu două câmpuri

În fig.2.5 sunt date următoarele repere: 01 – cutie de bransament; 02 – grup format din transformator și redresor de înaltă tensiune; 03 – placă de acoperiș; 04 – suport pentru plăcile colectoare; 05 – izolator de susținere; 06 – bară de susținere; 07 – ieșire; 08 – ecran de distribuție a gazelor de ieșire; 09 – izolație; 10 – bară de scuturare pentru plăcile colectoare; 11 – ghidaj spate pentru bara de scuturare; 12 – reazem de beton; 13 – suport metalic, suport pendular; 14 – transportor de praf/cenușă; 15 – buncăr; 16 – mecanism de scuturare pentru sistemul de depunere; 17 - mecanism de scuturare pentru sistemul de descărcare; 18 – intrare; 19 – ecran de distribuție a gazelor de intrare; 20 – placă colectoare; 21 – electrod de descărcare tip 1 (spiral); 22 – element central de ramă; 23 - electrod de descărcare tip 2.

Sistemul de emisie constituit în special din electrozii de emisie (ramele de emisie, în care sunt întinși electrozii de emisie și care sunt așezate la mijlocul trecerilor formate din electrozii de depunere) include ramele cu electrozii de emisie, ce sunt suspendate de carcasa electrofiltrului prin intermediul izolatoarelor de susținere și a ramelor de susținere. Electrozii de emisie se împart în două categorii: cu secțiune constantă și cu secțiune variabilă (cu vârfuri) de-a lungul lungimii lor. Electrozii cu secțiune constantă asigură o emisie uniformă de-a lungul lungimii lor, pe când cealaltă categorie de electrozi asigură emisia în zona vârfurilor. Alegerea electrozilor de emisie cu diametru cât mai mic este limitat din considerente mecanice. De obicei, se supradimensionează electrozii de emisie tocmai pentru a nu se rupe fapt ce determină scoaterea din funcțiune a câmpului sau secțiunii respective din electrofiltru. Electrozii din sârmă rotundă permit scurgerea unui curent Corona cu atât mai mare cu cât diametrul lor este mai mic. Electrozii cu vârfuri (fig.2.6) se realizează din platbande sau fier cornier care se ștanțează pentru a crea vârfurile necesare apariției efectului

Corona [130]. Pentru electrofiltrele mari, într-un câmp electrozii de emisie pot fi în număr de 2000 – 3000.

Sistemul de depunere cuprinde electrozii de depunere (dispuși în treceri paralele cu fluxul de gaze), susținerile acestora precum și barele, respectiv mecanismele de scuturare. Fiecare electrod de depunere constă dintr-un profil special (fig.2.7), suspendat la capătul superior de grinda de susținere prin intermediul unor bolțuri și a unor piese de formă adecvată. Fiecare susținere a electrozilor de depunere a unui câmp constă dintr-o grindă profilată care conține panourile de depunere dintr-un câmp. Ambele capete ale grinzii de susținere se sprijină pe consolele aferente grinzii de acoperiș. În zonele de intrare și de ieșire a panourilor de depunere sunt distanțieri pentru electrozii de depunere, prin care se realizează centrajul acestora. Panourile de depunere trebuie să fie corespunzătoare din punct de vedere a câmpului electric, fără vârfuri și muchii, trebuie să fie aerodinamice, să aibă rigiditate mecanică corespunzătoare, rezistență corespunzătoare la deformare ca efect al temperaturii, să poată fi ușor montate în electrofiltru și să aibă o tehnologie de execuție cât mai simplă. Suprafețele colectoare dintr-un câmp pot ajunge la 5000 m², iar înălțimea suprafețelor colectoare de 12 -18 m.

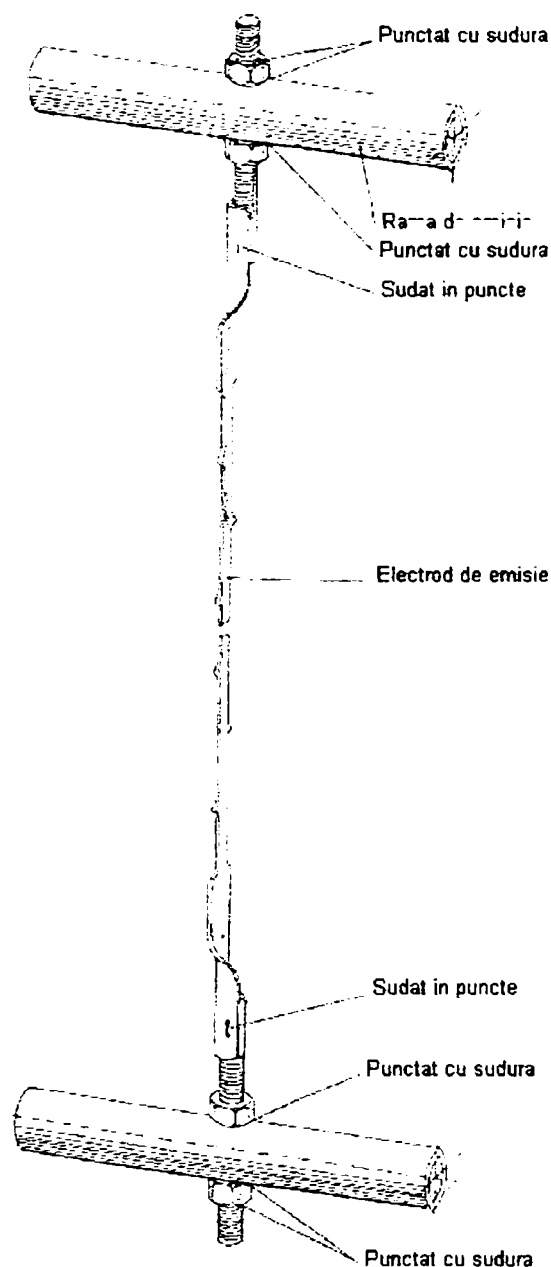


Fig.2.6. Electrod de emisie tip Isodyn B5 de la electrofiltrele S.C. Electrocentrale Deva S.A.

Electrozii de depunere dintr-un panou sunt fixați puternic la partea lor inferioară de o bară de scuturare, care are sudată la capătul de scuturare o nicovală, iar la celălalt capăt o piesă distanțoare. Barele de scuturare au rolul de a prelua șocurile primite de către nicovala sudată la capătul lor și sunt ghidate la partea inferioară de niște "piepteni" de dirijare a gazului la nivelul platformelor inferioare în care barele de scuturare se pot mișca liber. Șocurile sunt transmise ramelor de susținere și astfel, prin accelerațiile care se imprimă acestora, praful este scuturat de pe panoul de electrozi [134,167].

Fiecare câmp dispune de un dispozitiv de scuturare având ciocănele de scuturare în dreptul fiecărui panou de electrozi de depunere. Aceste ciocănele pot cădea liber, fiind antrenate de un arbore astfel încât ele cad succesiv pe nicovalele barelor de scuturare realizându-se în acest fel scuturarea succesivă a panourilor de depunere. Sistemul de scuturare al electrozilor de emisie constă dintr-un dispozitiv cu camă, amplasat în afara fluxului de gaze, pe acoperișul grinzii și care este antrenat de un motoreductor, printr-un cuplaj elastic. Cama în rotație, ridică un bloc culisant pe role, iar în punctul mort superior acesta este eliberat. Arborele cu ciocănele acționat cu o tijă, prin intermediul unui izolator și alte piese de legătură, ridică ciocănele și la căderea blocului culisant ele sunt eliberate, căzând pe nicovalele fixe a ramelor de emisie. Acționarea fiecărui arbore este realizată cu ajutorul unui motoreductor, echipat cu o frână la mersul înapoi care transmite mișcarea la arbore prin intermediul unui cuplaj [167].

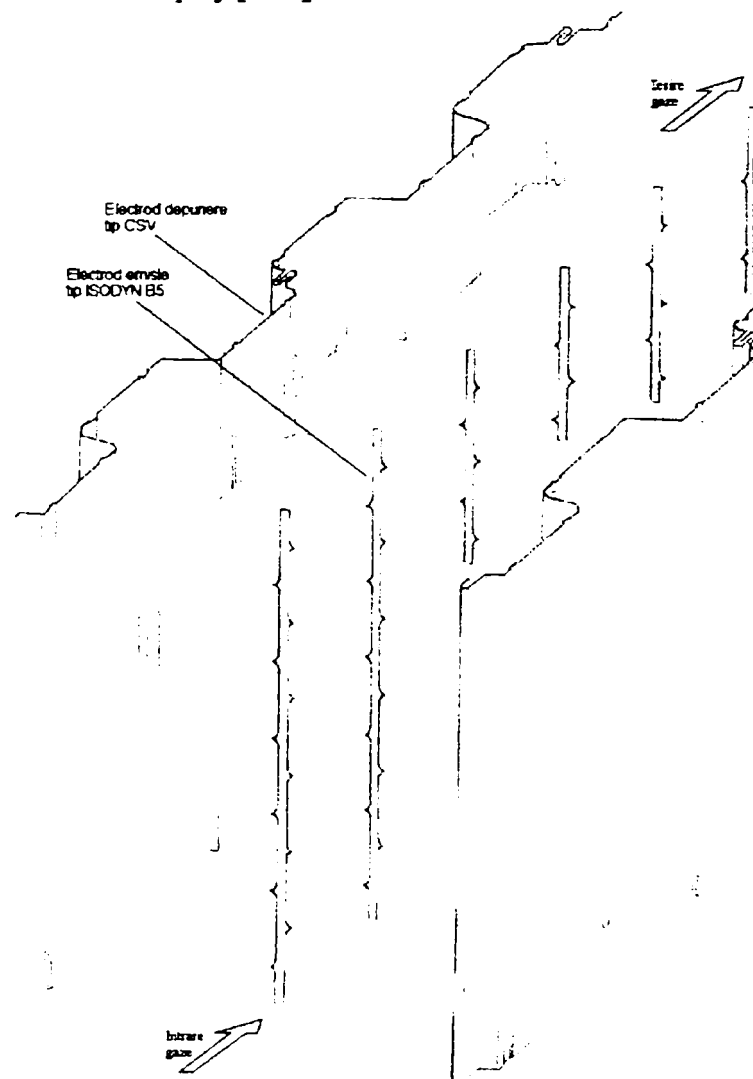


Fig.2.7. Sistemul de electrozi de depunere tip CSV și electrozi de emisie Isodyn B5 de la electrofiltrele S.C. Electrocentrale Deva S.A.

În fig.2.8 se prezintă structura constructivă de susținere și de scuturare a electrozilor de emisie de la electrofiltrele S.C. Electrocentrale Deva S.A.

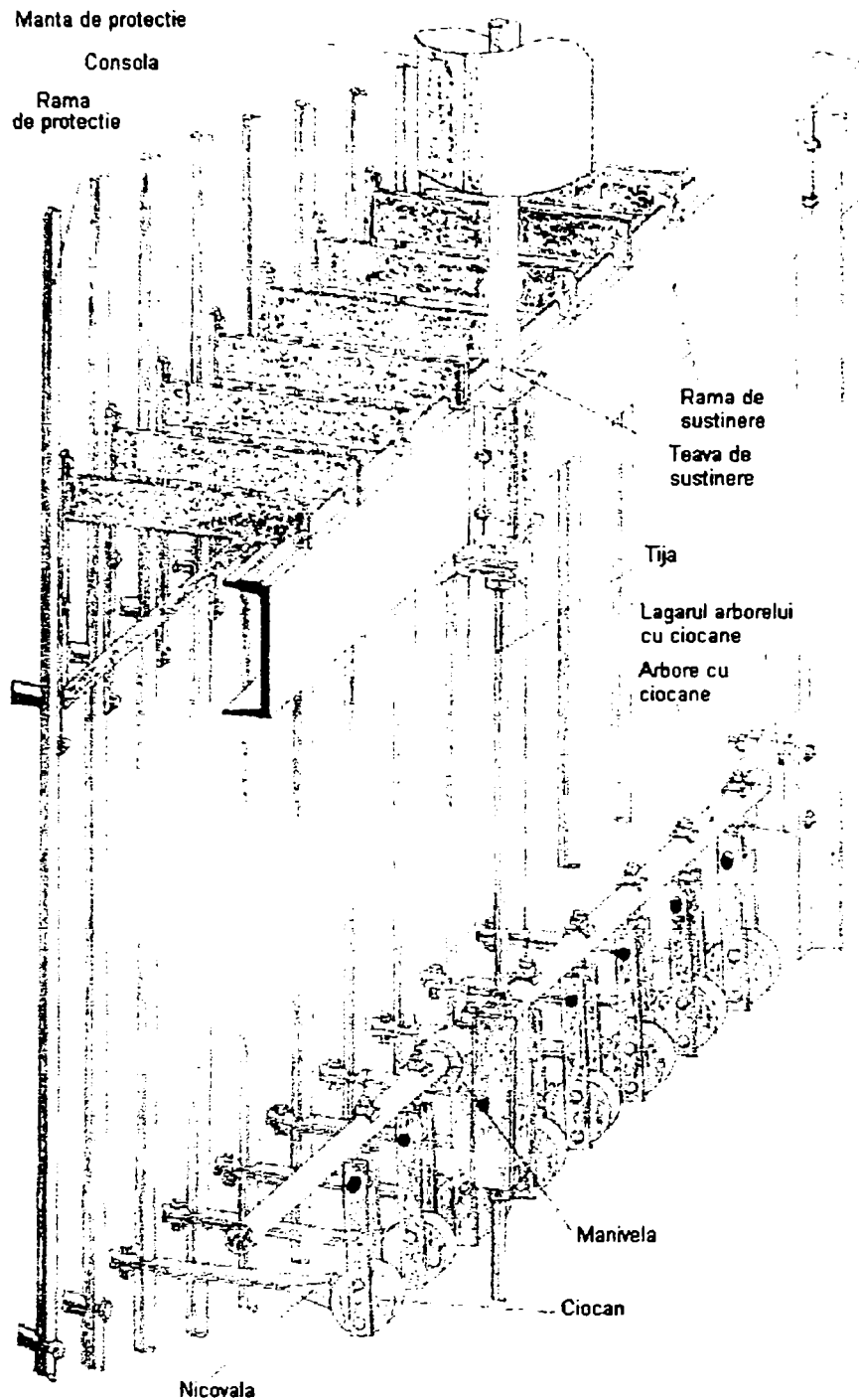


Fig.2.8. Structura constructivă de susținere și de scuturare a electrozilor de emisie

În fig.2.9 este prezentată structura constructivă de susținere și de scuturare a electrozilor de depunere de la electrofiltrele S.C. Electrocentrale Deva S.A.

La S.C. Electrocentrale Deva S.A. există un număr de 12 electrofiltre, notate simbolic cu 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 4B, 5A, 5B, 6A, 6B. Principalele caracteristici ale electrofiltrelor (caracteristici mecanice, puterea electrică, pierderi de presiune, debitul nominal de gaze, conținutul de praf de la intrare și de la ieșire, gradul nominal de separare, temperatura gazelor, debitul de cenușă evacuată, tensiunea înaltă redresată în gol și în sarcină) sunt prezentate în anexa nr. 1.

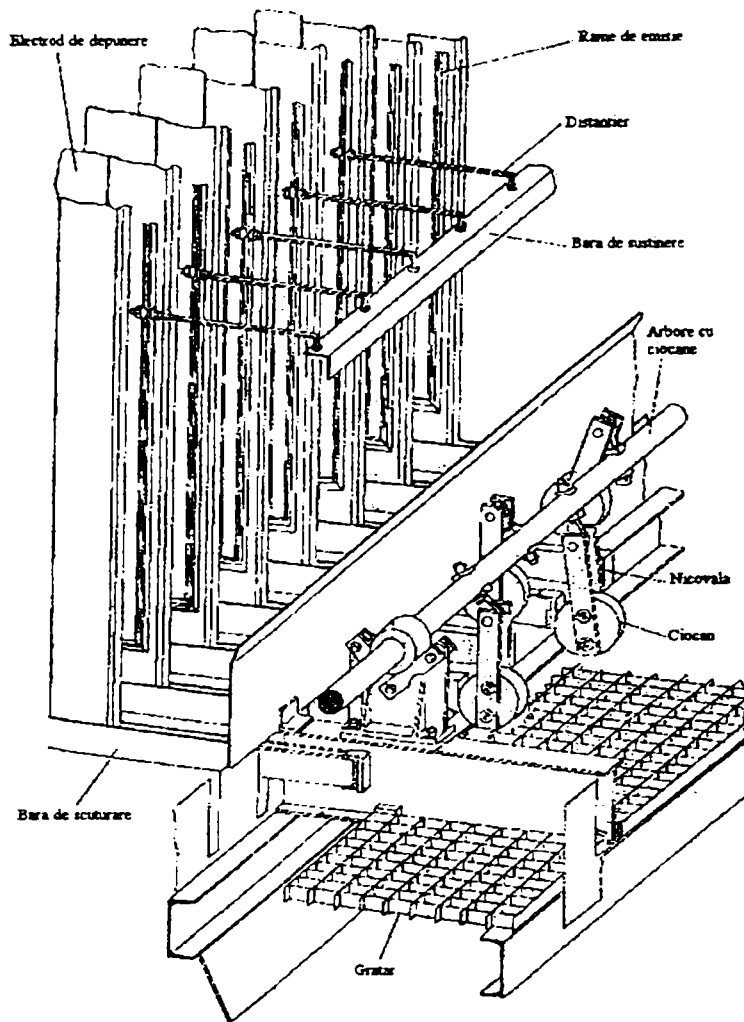


Fig.2.9. Structura constructivă de susținere și de scuturare a electrozilor de depunere

În fig.2.10 este prezentată secțiunea longitudinală printr-un electrofiltru cu trei câmpuri (de exemplu electrofiltrele 2, 3, 4, 5, 6 de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.).

Buncărele sunt construcții metalice în care se adună praful colectat în urma scuturării. Există două tipuri constructive de buncăre:

- buncăre de tip jgheab;
- buncăre piramidale.

Alegerea unui tip sau altul de buncăre se face în funcție de abrazivitatea prafului colectat și de modul cum se realizează evacuarea prafului din filtru. Astfel pentru prafuri puternic abrazive și în cazul în care evacuarea este pneumatică sau hidraulică se folosesc buncăre piramidale. Dacă praful este mai puțin abraziv și se utilizează transportoare elicoidale sau cu raclete se utilizează buncăre tip jgheab.

Există două tipuri de racorduri de intrare în electrofiltre:

- racorduri de intrare la care admisia gazelor se face orizontal, la care direcția fluxului de gaze nu se schimbă;
- racorduri de intrare la care admisia gazelor se face vertical, la care direcția fluxului de gaze se schimbă.

În general, se evită utilizarea celui de-al doilea tip de racord pentru a nu înrăutăți distribuția gazelor. Pentru uniformizarea distribuției gazelor se utilizează dispozitive de uniformizare [88].

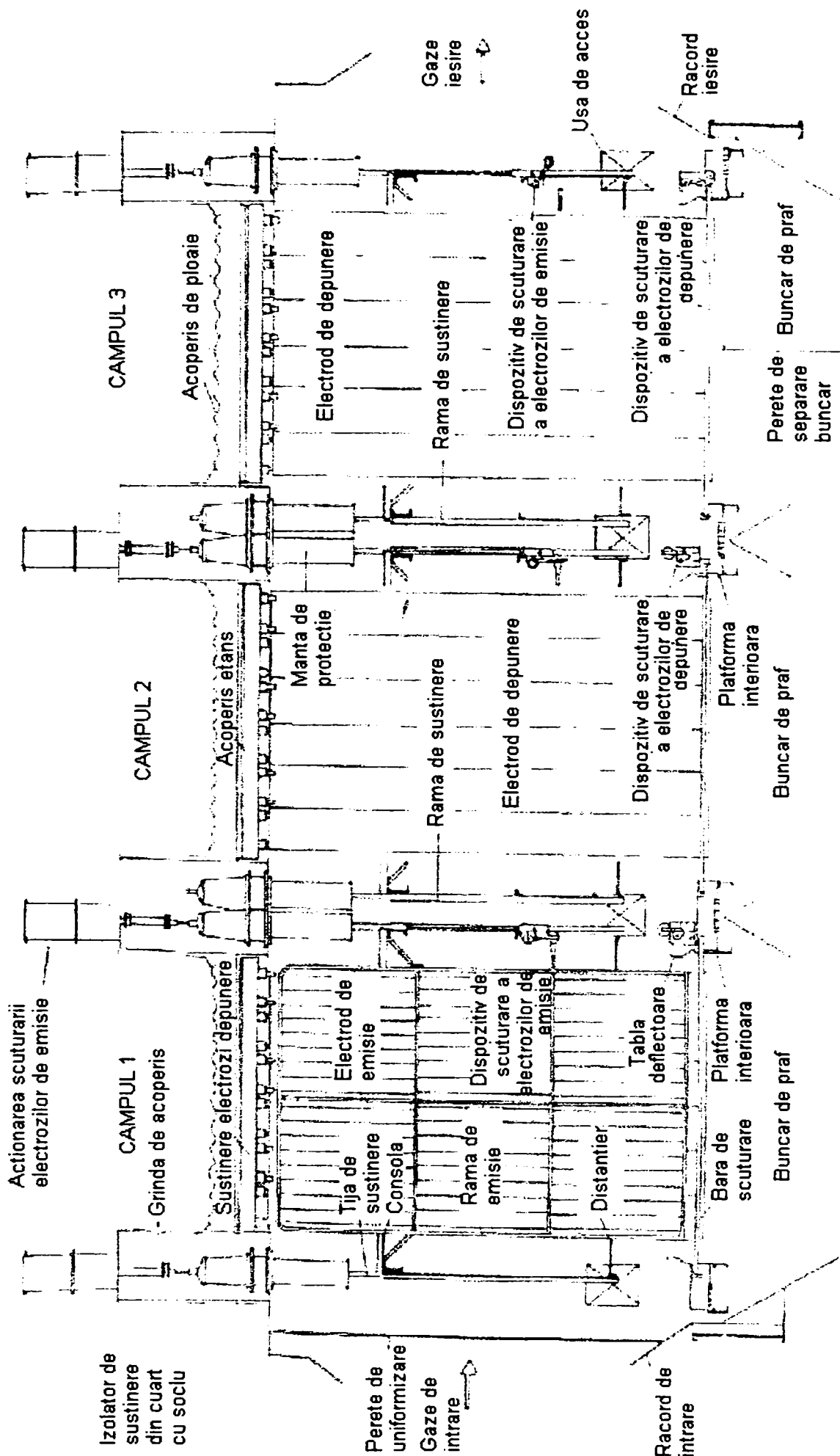


Fig.2.10. Secțiunea longitudinală printr-un electrofiltru cu trei câmpuri

2.2.2. Alte variante constructive

Se fac cercetări asupra unor construcții optime ale electrofiltrelor pentru a putea colecta particule de praf provenite din diferite procese industriale. Construirea unor electrofiltre experimentale necesită investiții mari, pentru că acestea trebuie să aibă cel puțin 1/5 din gabaritul electrofiltrului [88] care trebuie introdus în fabricație pentru a putea modela cât mai bine fenomenele de curgere a gazelor prin corpul electrofiltrului.

În fig.2.11 este prezentată schema de principiu a unui electrofiltru pilot utilizat la Ontario Hydro Technology, Toronto, Canada [45] care are suprafața specifică de $55 \text{ m}^2/\text{m}^3/\text{s}$ și este format din trei câmpuri, primul câmp fiind utilizat la preîncărcarea electrică a particulelor de praf, celelalte două câmpuri fiind alimentate în curent continuu sau în curent continuu peste care se suprapun pulsuri de tensiune. Fiecare câmp este format din două seturi de electrozi de colectare. Câmpul de preîncărcare este format din șase celule formate din electrozi de descărcare și conducte prin care circulă apă rece. Diametrul electrozilor de descărcare este de 1,6 mm, iar cel al conductelor prin care circulă apa este de 7,1 mm (în exterior). Apa este în legătură cu electrozii de colectare care sunt conectați la pământ. Cu ajutorul electrozilor de descărcare se obține efectul Corona, iar conductele funcționează ca un regulator de temperatură, care are influență directă asupra rezistivității prafului. Utilizarea câmpului de preîncărcare se face pentru micșorarea rezistivității și în scopul prevenirii efectului Corona invers, obținându-se o încărcare electrică mai bună a particulelor de praf.

În principiu, există două cazuri care determină o eficiență scăzută a electrofiltrelor. Primul caz este atunci când trebuie filtrat un gaz care conține particule ultrafine, fiind deosebit de periculoase pentru sănătate. Un alt caz, este acela când se dorește filtrarea unui gaz cu rezistivitate ridicată. Curentul ionic determină apariția efectului Corona invers care generează ioni de polaritate opusă și se reduce eficiența de colectare.

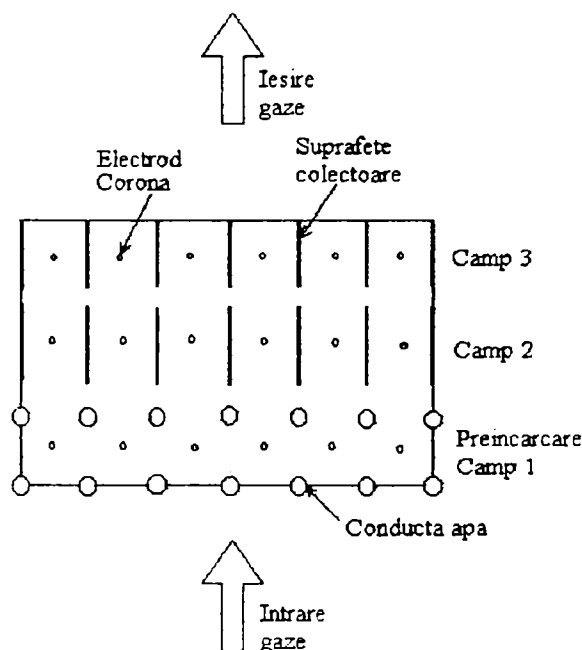


Fig.2.11. Vedere asupra electrofiltrului cu trei câmpuri

O alternativă pentru evitarea acestor fenomene este utilizarea electrofiltrelor cu două zone: o zonă de preîncărcare și alta de colectare. Pentru prevenirea colectării prafului în zona de preîncărcare se utilizează încărcarea tip "boxer", dispunerea electrozilor alimentați în curent

continuu (T.I. c.c.) și în curent alternativ (T.I. c.a.) prezentându-se în fig.2.12 [1]. Particulele de praf sunt supuse atât unei încărcări în curent continuu cât și uneia în curent alternativ (s-au experimentat alimentări în curent alternativ cu frecvențe cuprinse între 50 și 400 Hz). Ca urmare particulele de praf vor avea o traiectorie oscilatorie care nu permite precipitarea lor în zona de preîncărcare. Acest principiu se poate utiliza și la electrofiltrele umede care colectează particule de praf ultrafine. Maximul încărcării electrice este proporțional cu amplitudinea câmpului electric, iar particulele de praf au timp suficient pentru a ajunge la saturație.

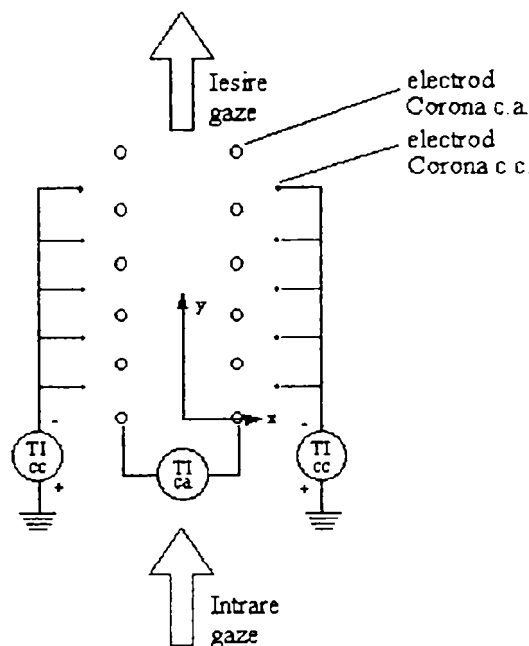


Fig.2.12. Dispunerea tip "boxer" a electrozilor de descărcare

Dacă zona de preîncărcare, ca cea din fig.2.11, este alimentată în curent alternativ cu frecvența de 50 Hz, iar zona de colectare a prafului în curent continuu, se obține un alt tip de electrofiltru [49]. Acest electrofiltru poate fi folosit atât la epurarea gazelor din industrie cât și a aerului din instalațiile de climatizare ale clădirilor (pentru epurarea NO_x și a particulelor de carbon), a particulelor cu diametre mai mari.

S-a constatat experimental că electrofiltrele uscate nu sunt adecvate pentru colectarea particulelor fine de praf cu diametre sub $2,5\mu\text{m}$. Aceasta se datorează și acumulării de praf cu rezistivitate ridicată pe suprafețele colectoare [18]. Deși cu ultimul câmp se colectează cel mai puțin praf, acesta este și cel mai fin și cu rezistivitatea ridicată, iar prin scuturarea lui praful va fi evacuat spre coș. Electrofiltrele umede au început să dețină un rol important în colectarea particulelor fine, a nitraților și sulfatilor. La acestea, pe suprafețele colectoare, care sunt conectate la pământ, curge continuu un film subțire de apă. Nu există posibilitatea reantrenării particulelor în momentul scuturării datorită contactului dintre apă și praf. Există dificultăți însă în a implementa electrofiltre de capacitate mare (cum ar fi de exemplu pentru termocentrale). Mediul creat de lichid este coroziv, în special când lichidul (de obicei apa) interacționează cu acizii din gaz, determinând deteriorarea rapidă a suprafețelor colectoare. De aceea se utilizează pentru suprafețele colectoare oțeluri speciale inoxidabile. Astfel, electrofiltrele umede devin foarte costisitoare. Pentru a evita investiții foarte mari, se utilizează modele hibride de electrofiltre la care ultimul câmp este umed. Au apărut noi soluții care înlocuiesc suprafețele colectoare scumpe cu membrane sintetice construite în așa fel

încât filmul de lichid să fie distribuit uniform pe toată suprafața [7]. Acțiunea capilară a materialului determină o distribuție uniformă atât pe orizontală cât și pe verticală, colectarea prafului realizându-se pe toată suprafața. Suprafața colectoare formează o buclă asemănătoare benzilor transportoare, ea fiind acționată continuu formând o suprafață de colectare continuă.

S-au experimentat și electrofiltre la care electrozii de emisie și de depunere au aceeași formă. Electrocul principal are în secțiune forma unui electrod de depunere la care sunt adăugate sârme cât mai neregulate sub diferite forme, iar electrozii alăturați sunt conectați la potențiale diferite [54]. Aceasta este o soluție avantajoasă din punct de vedere a duratei de viață a electrofiltrului. Electrofiltrele tradiționale de capacitate mare (sute de mii de m³/h) au mii de electrozi de emisie, care sunt elementele cele mai sensibile ale electrofiltrului. La ruperea unui electrod de emisie, acesta scoate din funcțiune câmpul respectiv.

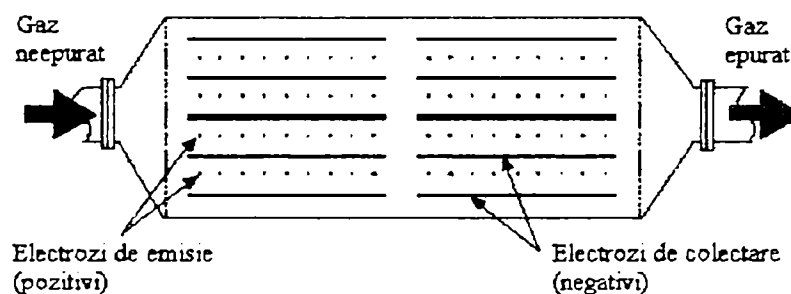


Fig.2.13. Reactor de plasmă netermică

O altă instalație de epurare are aceeași construcție ca un electrofiltru (fig.2.13), dar modul de alimentare a electrozilor cu energie electrică este altul și poartă denumirea de reactor de plasmă netermică [43]. Se utilizează descărcări Corona prin pulsuri de înaltă tensiune și de scurtă durată pentru a produce plasmă netermică. Acest procedeu ajută la epurarea gazelor de sulfați și de nitrați care apar în urma procesului de ardere. S-a constatat că polaritatea pozitivă a electrozilor de descărcare conduce la o eficiență sporită.

2.3. Analiza variantelor de alimentare cu energie electrică

2.3.1. Alimentarea tradițională cu energie electrică a electrofiltrului cu plăci

Echipamentul electric al electrofiltrului este partea cea mai importantă, care în funcție de realizarea constructivă, schema funcțională și regimul de reglare al tensiunii, determină siguranța și o eficiență crescută de colectare a prafului [18,32,51,168].

În prezent, se utilizează reglatoare cu microprocesoare care comandă două tiristoare conectate în antiparalel în circuitul primar al transformatorului ridicător de tensiune, principiul de funcționare fiind același cu al variatoarelor de tensiune alternativă [168]. În fig.2.14 este prezentată schema de principiu de alimentare cu energie electrică a unui câmp pentru electrofiltrele 1A și 1B de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.

Deoarece puterea absorbită este mare (uneori chiar sute de kVA), un agregat de alimentare a unui câmp se alimentează de obicei de la două faze a sistemului trifazat (380V). Agregatul utilizează un separator Q și un sistem de protecție cu siguranțe fuzibile F₁ și F₂ (pentru partea de forță),

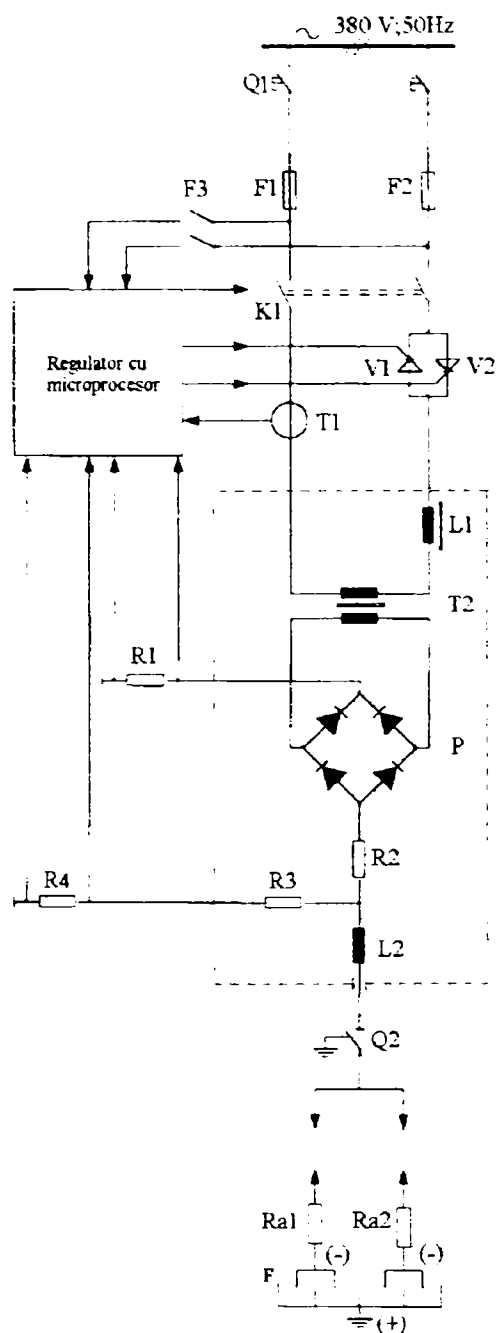


Fig.2.14. Schema de alimentare cu energie electrică a unui câmp a electrofiltrului

Echipamentele electrice de înaltă tensiune, care alimentează câmpurile electrofiltrului cu tensiune înaltă redresată, includ:

- agregate de înaltă tensiune;
- separatoare de înaltă tensiune;
- cablurile de înaltă tensiune;
- rezistențe de amortizare.

Funcțional, fiecare câmp de electrofiltru este alimentat cu tensiune înaltă continuă, redresată de la câte un agregat de înaltă tensiune (în componența unui electrofiltru cu patru câmpuri întră patru asemenea agregate de înaltă tensiune).

Constructiv, agregatul de înaltă tensiune propriu-zis este realizat într-o cuvă din oțel, umplută cu ulei de transformator și apoi închisă ermetic; cuva dispune de elemente (aripioare) de răcire prin

curenții absorbiți sunt de sute de amperi. Pe una dintre faze sunt montate două tiristoare în antiparalel V_1 și V_2 pentru a regla valoarea medie a tensiunii aplicate primarului transformatorului ridicător de tensiune T_2 (380 V/62 kV, 50 Hz, $S=166$ kVA). După ce tensiunea a fost ridicată cu transformatorul ridicător de tensiune, tensiunea alternativă este redresată cu o punte redresoare P, iar potențialul negativ este aplicat electrozilor de emisie, iar cel pozitiv la electrozii de depunere care sunt și conectați la pământ. Controlul automat este asigurat de către un regulator cu microprocesor care primește informații de la transformatorul T_1 despre curentul din circuitul primar, de la rezistența R_1 (șunt) despre curentul din circuitul secundar și de la divizorul rezistiv R_2-R_3 (la o tensiune de 150 kV corespunde 10 V c.c.) despre tensiunea secundară.

Semnalele sunt transmise spre dispozitivele de comandă sub formă de curent între 4 – 20 mA. Cu ajutorul unor programe implementate în memoria regulatorului se comandă unghiul de deschidere al tiristoarelor V_1 și V_2 sau mai nou se realizează comanda în semipuls (un anumit puls de tensiune este lăsat să treacă, de obicei impar 3, 5, ..., 25). Pentru limitarea curenților de scurtcircuit se utilizează un reactor primar de limitare L_1 ($L_1 = 0,9$ mH la un curent de 274 A), iar pentru evitarea pătrunderii armonicilor datorate descărcărilor ce au loc în electrofiltru, în rețeaua de alimentare se utilizează o reactanță de blocare de înaltă frecvență (fără miez magnetic) L_2 ($L_2 = 60$ mH cu $R=7$ Ω) [155,168].

641.504
369

convecție naturală [155]. În cuvă sunt următoarele părți ale agregatului (fig.2.14. reprezentat cu linie punctată):

- transformatorul de înaltă tensiune;
- reactorul primar (L_1 limitează curentul de scurtcircuit din circuitul de putere în timpul stărilor de tranziție din camera electrofiltrului);
- puntea de redresare monofazată;
- reactanța de blocare de înaltă frecvență (L_2);
- circuitele auxiliare și de protecție necesare;
- trecerea izolantă la care este legat polul negativ al sursei.

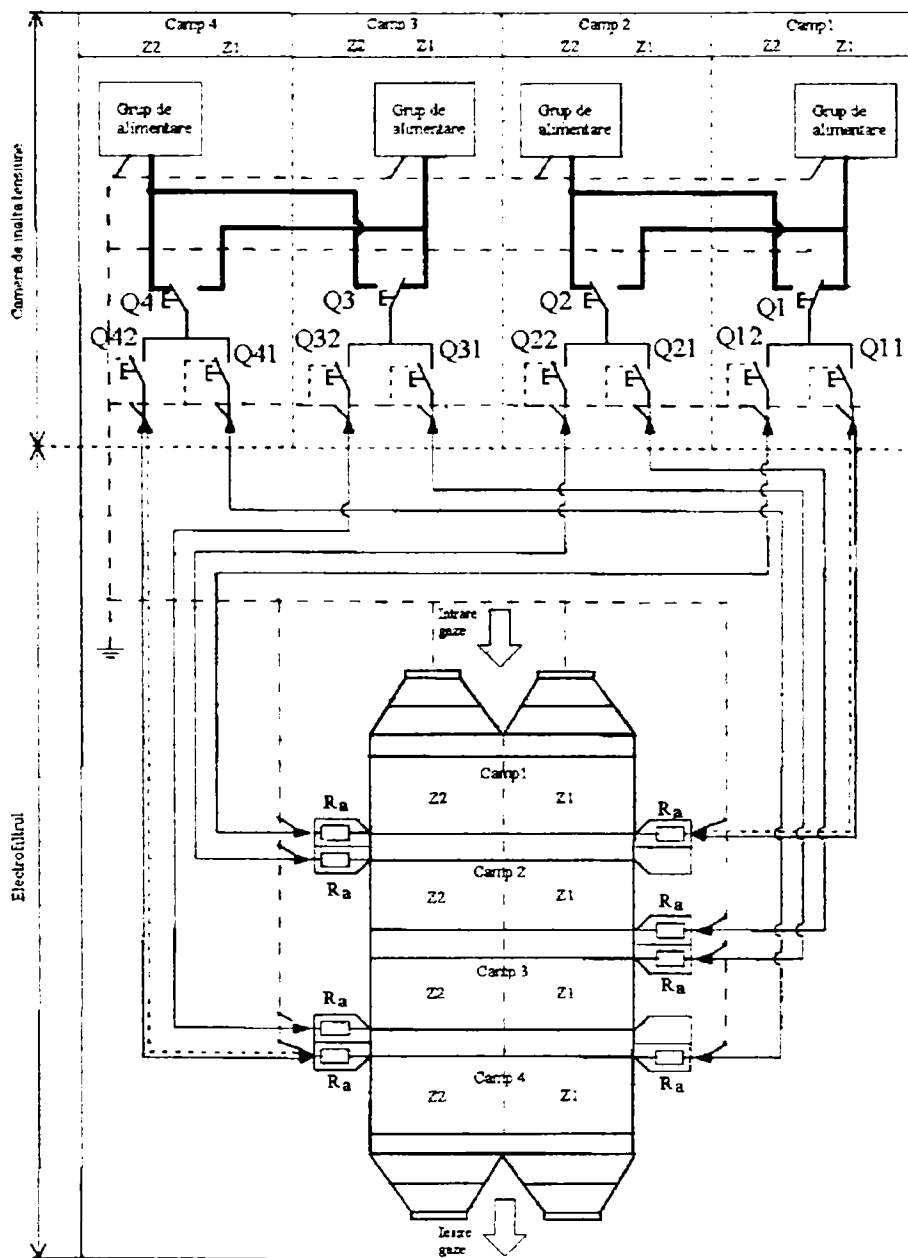


Fig.2.15. Schema instalației electrice de alimentare a câmpurilor electrofiltrului

Separatoarele de înaltă tensiune (Q_{11} , Q_{12} , Q_{21} , Q_{22} , Q_{31} , Q_{32} , Q_{41} , Q_{42} fig.2.15) sunt destinate întreruperii (comutării) curentului de mers în gol sau curentului capacitiv al cablului de înaltă tensiune, precum și pentru alegerea schemei de funcționare dorită, sau a separărilor vizibile ale căilor de curent.

Prin manevrarea adecvată a separatoarelor principale (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 fig.2.15) este posibilă alimentarea dintr-un agregat de înaltă tensiune, fie numai a câmpului aferent, fie a două câmpuri simultan. Deasemenea este posibilă izolarea fiecărui semicâmp (zone) ale celor patru câmpuri ale electrofiltrului, în caz de defect. Distribuția înaltei tensiuni include și echipamentul de fixare (format din trecerea izolată, suporti izolanti și cleme de legătură a barelor) și bornele de distribuție. Joncțiunea dintre agregatele de înaltă tensiune și electrozii de emisie ai camerei electrofiltrului se realizează fizic, de la separatorul de înaltă tensiune, prin cabluri monofilare de fabricație specială. Practic, fiecare semicâmp (secțiune) este alimentat prin câte un cablu distinct, astfel că la fiecare separator de înaltă tensiune sunt racordate două cabluri de înaltă tensiune, fapt ce permite depistarea și (la nevoie) izolarea unor defecțiuni din câmpuri.

În final, terminalele cablurilor de înaltă tensiune se racordează la electrozii de emisie ai câmpurilor electrofiltrului prin câte o rezistență electrică (R_a fig.2.15) având un dublu rol, pe de o parte de a limita curenții în caz de scurtcircuit în câmp (atingere de electrozi), iar pe de altă parte, ca împreună cu capacitatea cablului de înaltă tensiune și cu bobina de reactanță din cuva agregatului, să formeze un filtru trece-jos, care să atenueze armonicile superioare ale curentului ce sunt determinate de efectul Corona la nivelul electrozilor de emisie și de descărcările electrice din câmpurile electrofiltrului.

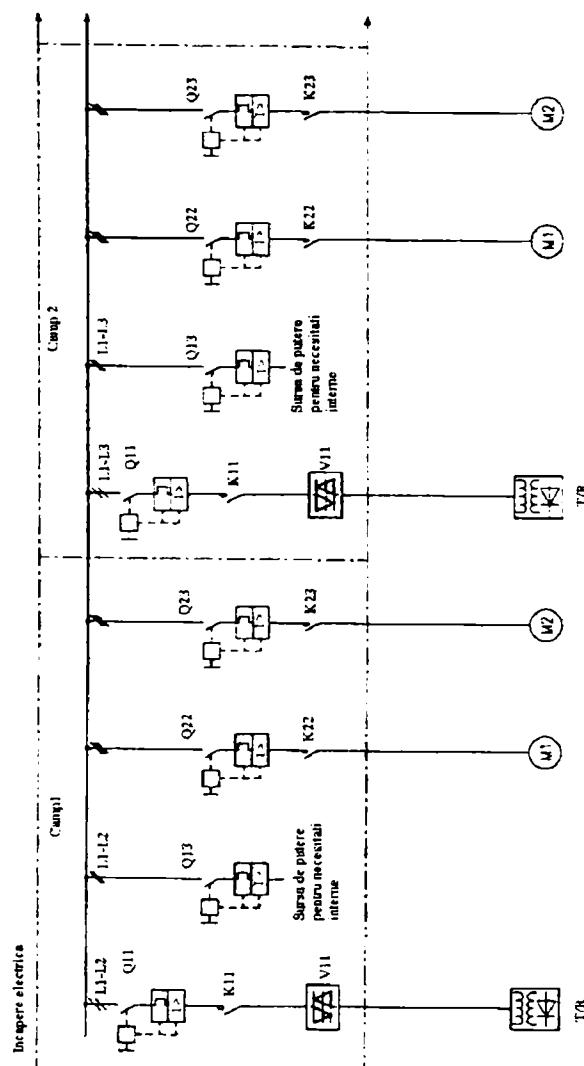


Fig.2.16. Instalația de forță pentru alimentarea grupurilor transformator-redresor și a motoarelor scuturătoarelor, pentru două câmpuri

În fig.2.16 [159] este prezentată instalația de forță, în cazul alimentării a două câmpuri, pentru grupurile transformator-redresor T/R prin intermediul tiristoarelor legate în antiparalel V_{11} . Schema mai cuprinde și instalațiile de alimentare a motoarelor scuturătoarelor M_1 și M_2 ; fiecare câmp are două secțiuni care sunt scuturate separat prin intermediul celor două motoare. Momentele când trebuie scuturate secțiunile sunt date de microprocesor prin transmiterea comenzilor de anclășare a contactoarele Q_{22} și Q_{23} . Atât grupurile de alimentare ale electrofiltrului, cât și motoarele scuturătoarelor, sunt protejate la scurtcircuit (prin relee maximale de curent) și suprasarcină (prin relee termice). Alimentarea diferiților consumatori interni se realizează prin contactorul Q_{13} . Pentru o încărcare uniformă a rețelei trifazate, se utilizează alimentarea grupurilor transformator-redresor ale câmpurilor, de la faze diferite (L_1-L_2 respectiv L_1-L_3). Temperatura de funcționare în încăperea electrică este de 40°C .

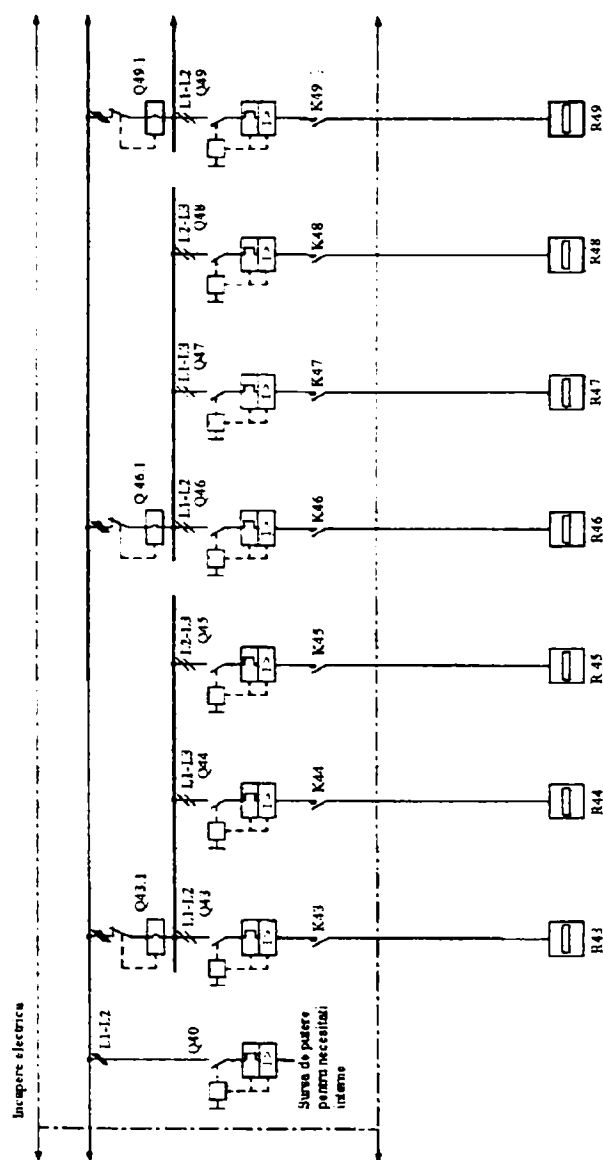


Fig.2.17. Instalația de forță pentru alimentarea rezistențelor de încălzire a izolatoarelor

Deoarece izolatoarele ramelor cu electrozii de emisie funcționează în condiții grele (umiditate ridicată, temperaturi scăzute sau ridicate, mediu acid, tensiune înaltă), acestea sunt prevăzute cu rezistențe de încălzire, pentru a preveni conturnarea. Înainte de pornirea electrofiltrului cu câteva zeci de minute, rezistențele sunt alimentate cu tensiune. Temperatura la care trebuie să ajungă izolatoarele, în timpul funcționării electrofiltrului, trebuie să fie cuprinsă între $90-120^{\circ}\text{C}$, în funcție de tipul gazului care trebuie epurat. În fig.2.17 este prezentată instalația de alimentare a

rezistențelor izolatoarelor, pentru două câmpuri, instalația fiind protejată la scurtcircuit și suprasarcină [159].

2.3.2. Alimentări speciale cu energie electrică ale electrofiltrelor

Sursa de putere de înaltă tensiune, pentru electrofiltre, este caracterizată de raportul de transformare n și de impedanța de scurtcircuit, din circuitul principal X_{LSC} . Această impedanță este preponderent inductivă și este compusă din reactanța de dispersie a transformatorului și reactanța bobinei liniare L_1 , conform fig.2.14. Bobina liniară L_1 este montată pentru a crește reactanța echivalentă cu 5 până la 10% din valoarea reactanței de dispersie a transformatorului de înaltă tensiune [93]. Scopul este de a limita curentul în timpul descărcărilor în electrofiltru și de aceea:

- mărește durata de viață a componentelor interne a electrofiltrului;
- protejează echipamentul electric;
- se obține o mai bună stabilitate electrică.

Următorii parametrii electrici caracterizează o sursă de alimentare cu energie electrică a unui electrofiltru [143]:

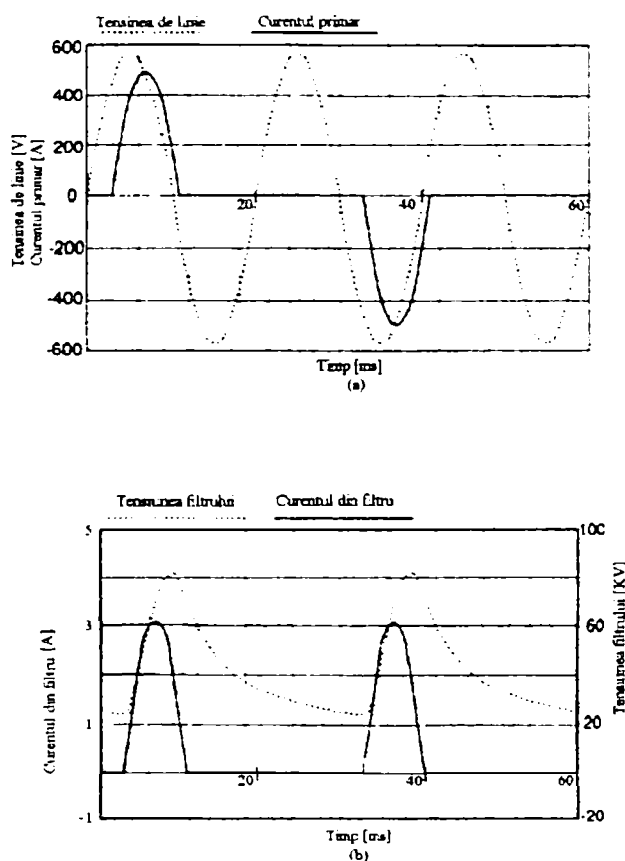
- curentul mediu prin electrofiltru I_{0med} [mA];
- tensiunea de vârf din electrofiltru fără sarcină U_{0v} [kV];
- valoarea efectivă a curentului primar I_{pef} [A];
- tensiunea de linie U_{lef} [V];
- frecvența f [Hz];
- puterea aparentă S [kVA].

Curentul mediu prin electrofiltru, este curentul mediu maxim dat de sursa de alimentare, fără a se depăși valoarea factorului de formă al curentului pentru o anumită sarcină. Unii producători efectuează teste asupra sursei de alimentare, cu sarcini R-C pentru a simula sarcina electrofiltrelor. Alții utilizează sarcină pur rezistivă care determină factorul de formă pentru un curent mic. Aceasta înseamnă că, valorile efective ale curenților secundari și primari, și curentul de sarcină mediu au valoarea cea mai mică, comparativ cu valorile corespunzătoare sarcinii electrofiltrelor. Inductanța liniară L_1 este constituită dintr-o bobină cu miez magnetic cu întrefier aer, obținând astfel o caracteristică liniară. În ultimii ani s-a introdus inductanța variabilă a cărei valoare se modifică invers cu valoarea curentului primar într-un anumit domeniu. O buclă de control automat crește valoarea inductanței când curentul primar scade, pentru a menține un factor de formă constant [93].

A. Alimentarea intermitentă, este o metodă introdusă la începutul anilor 1980, cu scopul de a economisi energia electrică și de a îmbunătăți eficiența de colectare a prafului cu rezistivitate ridicată. Acest tip de alimentare este cunoscut și sub alte nume: controlul energiei, semi-puls, modificarea pulsului, etc. Alimentarea intermitentă este cea mai ieftină metodă alternativă care a fost dezvoltată și comercializată pentru praful de rezistivitate ridicată [164].

Alimentarea intermitentă este obținută cu același echipament electric ca la alimentarea tradițională de curent continuu (fig.2.14). Diferența constă în echipamentul de control automat al tensiunii, care trebuie să suprimă un număr de pulsuri din curentul primar al transformatorului de înaltă tensiune. Această suprimare se realizează prin neamorsarea tiristoarelor, în respectivele jumătăți de perioadă. Principiul este prezentat prin formele de undă din fig.2.18, pentru frecvența

tensiunii de linie (frecvența 50Hz). Exemplul prezintă șase jumătăți de perioadă a tensiunii de linie, în care două din trei pulsuri de curent sunt suprimate. Unghiul de amorsare corespunde unui timp de 3ms după trecerea prin zero a tensiunii de linie.



Valoarea medie a curentului din electrofiltru în cazul alimentării intermitente este redusă comparativ cu alimentarea tradițională datorită suprimării unor pulsuri de curent. Această suprimare a pulsurilor de curent este denumită gradul intermitenței D , definit ca un număr de jumătăți de perioadă date de numărul de pulsuri de curent în acest interval de timp. În exemplul din fig.2.18 gradul intermitenței este de $D=3$. Gradul de intermitență mai este cunoscut ca și rată de încărcare [93]. Considerând că suprafața de sub pulsul de curent este aceeași pentru alimentarea intermitentă și pentru alimentarea tradițională în curent continuu, și dacă curentul mediu obținut cu alimentarea în curent continuu este I_{cc} , teoretic, curentul obținut la alimentarea intermitentă I_{EI} poate fi definit:

Fig.2.18. Formele de undă ale tensiunii și curentului la alimentare intermitentă

$$I_{EI} = \frac{I_{cc}}{D} \quad (2.1)$$

Așa cum se prezintă în fig.2.18 suprafața de sub pulsurile de curent poate fi uneori mai mare de K ori la alimentarea intermitentă. În acest caz, curentul mediu este:

$$I_{EI} = K \cdot \frac{I_{cc}}{D} \quad (2.2)$$

unde K poate lua valori între 1 și 1,5. Factorul K prezentat în exemplul din fig.2.18 este de 1,39 [93]. Astfel, curentul mediu este redus cu un factor K/D . Valoarea efectivă este redusă cu un factor K/D^2 .

Saturarea miezului magnetic poate fi evitată pe mai multe căi și anume:

- prin utilizarea unui miez mai mare al transformatorului;
- prin utilizarea unui puls de curent auxiliar de polaritate inversă înaintea pulsului de curent principal;
- prin utilizarea unei inductanțe liniare L_1 mai mare;
- prin utilizarea unui miez cu remanență mare și cu pierderi datorate curenților turbionari mai mici.

Alimentarea intermitentă reduce puterea Corona și în consecință se economisește energie electrică. Călea obișnuită de a evalua eficiența de colectare obținută cu alimentare intermitentă este

compararea cu eficiența obținută la alimentare în curent continuu. O cale practică este de a compara vitezele de migrație în cele două cazuri și apoi de a determina factorul de creștere H:

$$H = \frac{w_{EI}}{w_{cc}} \quad (2.3)$$

unde w_{EI} este viteza de migrație obținută la alimentarea intermitentă și w_{cc} este viteza de migrație obținută la alimentarea în c.c.

Alimentarea intermitentă determină o valoare scăzută a tensiunii medii și a curentului mediu din electrofiltru. În cazul prafului de rezistivitate mică reducerea puterii Corona are ca efect scăderea vitezei de migrație și a eficienței colectării, iar performanțele sunt scăzute pentru acest caz ($H < 1$). Pentru praful de rezistivitate medie se observă că pentru ambele cazuri de alimentare se produce aceeași emisie minimă de praf ($H = 1$), dar pentru concentrații mai mari de praf, alimentarea intermitentă este mai bună pentru aceeași densitate de putere. În cazul unui praf de rezistivitate ridicată alimentarea intermitentă este mai bună decât alimentarea în curent continuu ($H > 1$), efectul fiind emisie scăzută de praf și putere consumată mai redusă [75,91,96].

B. Alimentarea prin pulsuri a electrofiltrelor s-a făcut la sfârșitul anilor 1980, fiind o dezvoltare tehnică majoră. Această metodă a fost descoperită pentru a îmbunătăți colectarea prafului de rezistivitate ridicată, care este greu de colectat, constituind unul dintre neajunsurile majore ale electrofiltrelor. Alimentarea prin pulsuri constă dintr-un puls de tensiune de foarte scurtă durată suprapus peste tensiunea de bază; lățimile de puls variază între $1\mu s$ și $100\mu s$ [43,45,51,93,124].

Pulsurile de înaltă tensiune sunt repetate cu o frecvență în domeniul 1 la 400 pulsuri pe secundă (pps). În fig.2.19 se prezintă formele de undă ale tensiunii pe electrofiltru în cazul alimentării în curent continuu și în cazul alimentării prin pulsuri, pentru o frecvență a pulsurilor de 100 pulsuri pe secundă. Diferențele sunt următoarele:

- pulsurile de înaltă tensiune au o amplitudine mai mare;
- tensiunea de bază este menținută aproape de tensiunea Corona;

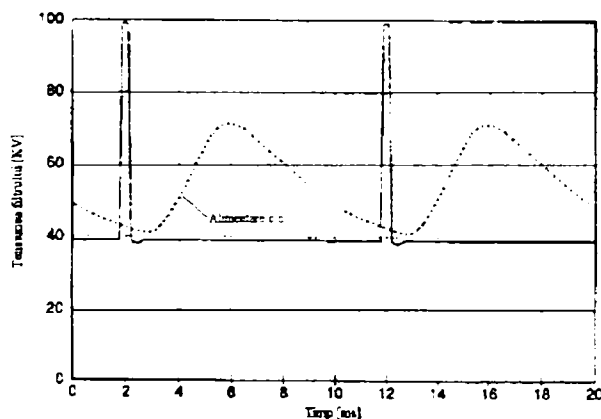


Fig.2.19. Formele de undă ale tensiunii pe electrofiltru la alimentarea prin pulsuri și în curent continuu

- valoarea de vârf a tensiunii electrofiltrului este egală cu tensiunea de bază la care se adaugă pulsul de tensiune, deci valoarea totală este mai mare decât în cazul alimentării tradiționale în c.c.

Schema electrică de alimentare prin pulsuri diferă față de schema de alimentare în curent continuu. Noua schemă trebuie să conțină un circuit de generare a pulsurilor și o sursă de putere a tensiunii de bază.

Amplitudinea pulsurilor, tensiunea de bază și frecvența de repetare a pulsurilor trebuie modificate în acord cu o strategie de control, această funcție fiind îndeplinită de o unitate de control specială. Producătorii de astfel de surse au conceput în principiu două arhitecturi de bază: una

bazată pe comutația la potențial scăzut (fig.2.20) și alta bazată pe comutația la nivel ridicat (fig.2.21).

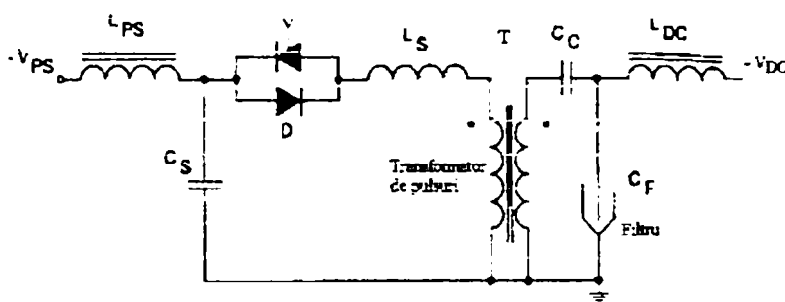


Fig.2.20. Alimentare prin pulsuri cu comutația la potențial scăzut

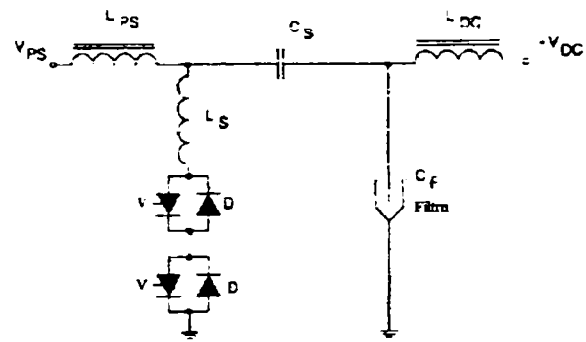


Fig.2.21. Alimentare prin pulsuri cu comutația la potențial ridicat

Primul tip (fig.2.20) utilizează în mod normal două grupuri: un generator de pulsuri și unul pentru tensiunea de bază. Sunt utilizate camere separate pentru unitatea de control automat și pentru dispozitivele de putere. Al doilea tip (fig.2.21) utilizează o singură cameră de control și un grup de înaltă tensiune cu o sursă de putere tradițională. Amândouă tipurile utilizează principiul recuperării energiei de la un circuit LC serie rezonant, unde capacitatea electrofiltrului (capacitatea proprie) este una dintre componentele circuitului.

Energia de recuperare, care este fundamentală pentru funcționarea energizării prin pulsuri, ocupă jumătate din perioada negativă a pulsului de curent (fig.2.20). Energia transferată la C_F care nu a fost folosită la generarea Corona este transferată către C_S și păstrată în intervalul de timp dintre pulsuri și este utilizată în generarea unui nou puls. Capacitatea de cuplare C_C evită scurtcircuitul sursei de putere V_{DC} prin înfășurarea secundară a transformatorului de pulsuri. Transformatorul de pulsuri permite conectarea la potențial scăzut, dar are dezavantajul unui preț ridicat, greutate și volum mare. Considerând un transformator de pulsuri ideal, fără pierderi, și un condensator de stocare mare, pulsul de curent poate fi determinat cu:

$$i_p(t) = I_p \sin(\omega_0 \cdot t) \tag{2.4}$$

unde I_p este valoarea de vârf a pulsului de curent și ω_0 este pulsația oscilației. Pulsul de tensiune al electrofiltrului este:

$$u_p(t) = \frac{1}{C_F} \int i_p(t) dt = \frac{U_p}{2} (1 - \cos \omega_0 \cdot t) \tag{2.5}$$

unde U_p este amplitudinea pulsului de tensiune.

Inductanța L_S raportată la secundar este:

$$L_S^1 = n^2 \cdot L_S \tag{2.6}$$

Capacitatea echivalentă în secundar se determină cu:

$$C_e = \frac{C_F \cdot C_C}{C_F + C_C} \tag{2.7}$$

Perioada pulsurilor are valoarea:

$$T_0 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_S^1 \cdot C_e} \tag{2.8}$$

În fig.2.21 este prezentat sistemul de alimentare cu pulsuri fără transformator de pulsuri. Tensiunea de bază este dată de sursa de putere V_{DC} . Circuitul de generare a pulsurilor include sursa de putere V_{PS} și un circuit serie oscilant constând dintr-o capacitate de stocare C_s , de inductanța L_s și de capacitatea electrofiltrului C_F . În această configurație, tiristoarele sunt situate pe înalta tensiune, fiind conectate în serie. Înaintea generării unui puls, C_s este încărcat la o tensiune $V_{PS}+V_{DC}$ și electrofiltrul la $-V_{DC}$, iar când tiristoarele sunt amorstate este inițiată oscilația. Expresiile de determinare a pulsului de curent și de tensiune sunt aceleași ca (2.4) și (2.5).

$$C_e = \frac{C_F \cdot C_S}{C_F + C_S} \tag{2.9}$$

$$T_0 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_S \cdot C_e} \tag{2.10}$$

În fig.2.22 [45] se prezintă un montaj practic utilizat cu comutație pe joasă tensiune, iar în fig.2.23 [43] este arătat o schemă cu comutație pe înaltă tensiune, aceste montaje având ca element comun tiratronul.

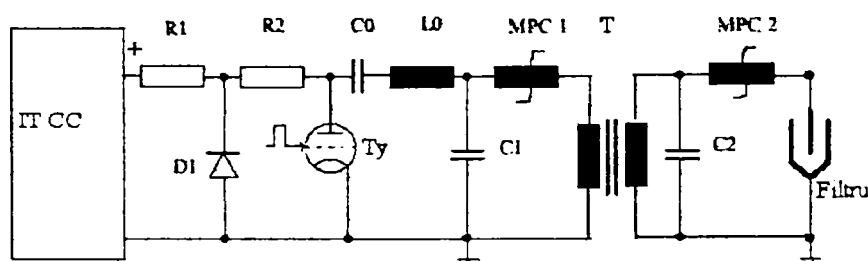


Fig.2.22.Exemplu de alimentare prin pulsuri cu comutația la potențial scăzut

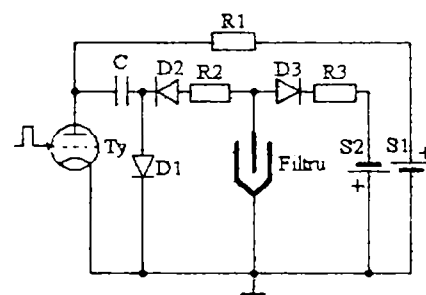


Fig.2.23.Exemplu de alimentare prin pulsuri cu comutația la potențial ridicat

Schema din fig. 2.22 crează pulsuri care se aplică unui transformator de pulsuri, fără a se mai utiliza o tensiune continuă peste care să se suprapună pulsurile. Condensatorul C_0 este încărcat de la sursa IT CC. Energia de pe condensatorul C_0 este transferată pe condensatorul C_1 prin inductanța L_0 și prin tiratronul T_y într-un timp de ordinul μs . Bobina MPC1 este saturată și energia înmagazinată în C_1 este transferată la C_2 prin transformatorul de pulsuri. Pentru a proteja sursa de înaltă tensiune de întoarcerea tensiunii, s-a introdus grupul format din rezistențele R_1 , R_2 și dioda D_1 .

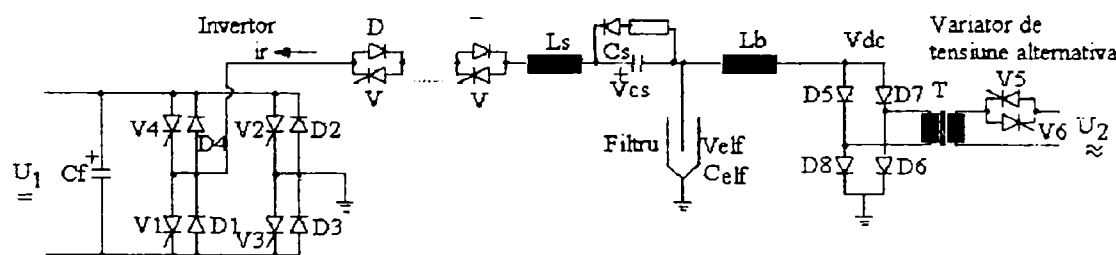


Fig.2.24. Exemplu de alimentare prin pulsuri cu comutația la potențial ridicat, cu tiristoare și diode

În fig.2.23 pulsurile sunt create prin comutația tiratronului T_y cu deuteriu. Pulsurile se formează la încărcarea condensatorului C prin rezistența R_1 și dioda D_1 de la sursa S_1 . Energia acumulată în condensatorul C este transferată spre electrofiltrul prin comutația tiratronului la care se

aplică un impuls de comandă. Tensiunea continuă pe electrofiltru este furnizată de S_2 . Diodele D_2 și D_3 previn transmiterea pulsurilor spre sursa S_2 .

O schemă care utilizează grupuri de diode și tiristoare conectate în serie (pentru a comuta la tensiuni ridicate) este prezentată în fig.2.24 [51]. Tensiunea continuă de bază este furnizată de o schemă clasică cu variator de tensiune alternativă, iar pulsurile de tensiune sunt create de un invertor. În grupul $L_s - C_s$ este acumulată energia electrică care este transferată prin comutația tiristoarelor, iar L_b este o inductanță de blocare a pulsurilor de tensiune spre alimentarea de curent continuu.

În timpul funcționării normale, tensiunea de bază continuă este ținută la nivelul Corona și amplitudinea și frecvența pulsurilor de tensiune sunt modificate după o anumită strategie.

Față de alimentarea în curent continuu, descărcarea Corona tinde să se localizeze în zone discrete ale electrozilor de descărcare. Prin aplicarea pulsurilor de tensiune de amplitudine ridicată peste tensiunea de bază în jurul tensiunii Corona, vârful de tensiune crește semnificativ nivelul Corona. Prin această metodă, are loc o distribuție mai bună de curent de-a lungul electrozilor de emisie. O bună distribuție de curent pe suprafețele colectoare este importantă pentru a evita apariția efectului Corona invers, determinat de localizarea în diferite zone ale electrozilor a unei densități mai mari de curent.

La fel ca la alimentarea intermitentă, îmbunătățirea performanțelor electrofiltrelor este strâns legată de rezistivitatea prafului colectat. Această îmbunătățire este exprimată în mod normal cu ajutorul factorului de creștere H :

$$H = \frac{w_p}{w_{cc}} \quad (2.11)$$

unde w_p este viteza de migrație la alimentare prin pulsuri, iar w_{cc} este viteza de migrație la alimentarea tradițională în c.c. În comparație cu alimentarea în curent continuu la rezistivitate mică a prafului, amândouă formele de alimentare produc aceleași rezultate din punct de vedere al eficienței, iar la rezistivitate ridicată a prafului, alimentarea prin pulsuri este mult mai eficace [93].

C. Alimentarea cu convertoare statice la înaltă frecvență

Pentru o eficiență maximă de colectare este importantă funcționarea electrofiltrului cât mai aproape posibil de descărcarea electrică în electrofiltru. Această condiție are nevoie de o tensiune reglabilă continuu în domeniul care cuprinde valoarea tensiunii Corona. Din păcate, chiar pentru procese bine reglate, modificările gazului de la intrarea în electrofiltru conduc la descărcări care compromit performanțele electrofiltrului.

La alimentarea tradițională în curent continuu, atât timp cât are loc creșterea tensiunii spre limita de descărcare, există o oscilație semnificativă a tensiunii datorită sarcinii rezistiv capacitive care reduce intensitatea maximă a câmpului electric. În condiții de descărcare, timpul minim de blocare a tiristoarelor este de jumătate de perioadă sau 10ms pentru frecvența de 50Hz a tensiunii de alimentare. În electrofiltrele cu multiple descărcări timpul total pierdut poate fi semnificativ, iar eficiența electrofiltrului este scăzută.

În ultimele două decenii, au apărut dispozitive de comutare rapidă performante care sunt frecvent utilizate la calculatoare personale, mașini electrice și diferite procese electrice, împreună cu materiale de ferită care au pierderi scăzute, ceea ce a permis conceperea și realizarea unui nou tip de

alimentare a electrofiltrelor prin conversia de putere la înaltă frecvență. Cu ajutorul acestui mod de alimentare s-au făcut experimentări cu schema de principiu din fig.2.25 [32].

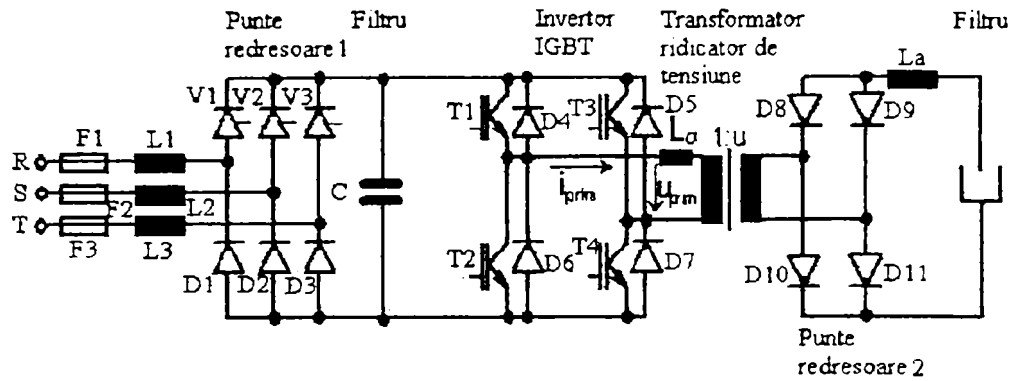


Fig.2.25. Schema de principiu a unui convertor c.a.-c.c. la înaltă frecvență

Convertorul de putere este alimentat la 380Vc.a. (50Hz), rețeaua de comutare fiind realizată cu tranzistoare IGBT care funcționează la o frecvență de aproximativ 10kHz. Această tensiune modulată se aplică unui transformator de înaltă tensiune cu miez de ferită a cărui ieșire este redresată cu o punte redresoare. Tensiunea de ieșire a transformatorului de înaltă tensiune este controlată prin modificarea timpilor de intrare în conducție sau blocare a comutatoarelor de putere utilizând o reacție care monitorizează continuu tensiunea de ieșire și nivelul de curent, pentru a obține condiții optime în electrofiltru. La alimentarea electrofiltrelor, problemele de comutație la înaltă frecvență sunt considerabil reduse față de celelalte moduri. De exemplu la 10kHz timpul minim de comutare este 0,05ms, comparat cu 10ms la 50Hz, iar timpul de revenire pentru reîncărcarea electrofiltrului poate fi controlat mai bine cu pași mai mici în așa fel încât se face o restabilire mai rapidă a performanțelor electrofiltrului.

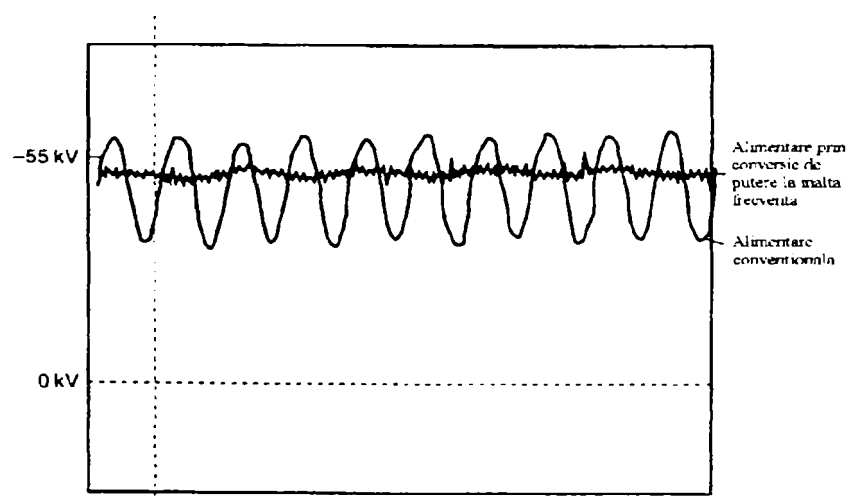


Fig.2.26. Tensiunea în electrofiltru la alimentarea convențională și la alimentarea cu convertoare de înaltă frecvență, la același curent

În fig 2.26 se prezintă diagramele tensiunilor, în cazul celor două alimentări, la același curent de alimentare de 200mA [93]. În aceste condiții, sursa de putere convențională produce o tensiune de vârf cu 10kV mai mare decât sursa de comutație la înaltă frecvență, dar la o tensiune medie mai scăzută.

Rezultatele de mai sus indică faptul că alimentarea cu convertoare de putere cu comutare la înaltă frecvență este capabilă de operare la o tensiune medie mai mare pentru același curent secundar, de aceea este necesară creșterea puterii de intrare în convertor care conduce la îmbunătățirea performanțelor pentru aceleași dimensiuni ale electrofiltrului.

2.4. Strategii de control ale surselor de alimentare ale electrofiltrelor

2.4.1. Principii de bază ale controlului

Pentru a obține o eficiență maximă trebuie ca să existe o bună compatibilitate între sursa de putere (transformator-redresor) și secțiunea electrofiltrului care este alimentată cu tensiune. O altă condiție este utilizarea unei unități de control automat a tensiunii [50].

De-a lungul exploatării electrofiltrelor au fost utilizate mai multe procedee de reglare [88]: pe baza curentului și tensiunii date; pe baza străpungerii în arc electric în electrofiltru; pe baza numărului de descărcări electrice în electrofiltru; pe baza valorii maxime a puterii consumate la descărcarea Corona; pe baza valorii medii maxime de tensiune. Nu se utilizează în general numai un anumit procedeu de reglare, ci combinații ale acestora.

Prin menținerea automată a tensiunii în limite imediat apropiate de cele de străpungeri se realizează în mod automat ridicarea tensiunii în electrofiltru până la apariția străpungerii între electrozi, tensiune care se memorează. Când apare străpungera tensiunea scade la zero sau la o tensiune necesară stingerii arcului, după care tensiunea crește din nou după un interval de 0,3-0,5 s. Un dezavantaj al acestei metode este acela că prin scăderea periodică a tensiunii valoarea medie a tensiunii aplicată pe câmpul electrofiltrului este mai mică, iar eficiența este scăzută. Se utilizează această metodă la procesele în care nu apar modificări prea mari ale caracteristicilor gazului, când sunt mai puține descărcări în electrofiltru.

Reglarea automată a tensiunii pe baza frecvenței descărcărilor în electrofiltru are ca principiu producerea cu o anumită frecvență a unor străpungeri incomplete în electrofiltru care să asigure o epurare cât mai mare a gazelor. Cele mai multe electrofiltre construite în ultimii 20 de ani au acest principiu de funcționare. S-a constatat experimental că se obține un maxim de desprăfuire la o frecvență a descărcărilor de 40-70 descărcări/minut. Dacă rezistivitatea prafului este ridicată, frecvența descărcărilor poate ajunge la 50-120 descărcări/minut [88]. Acest tip de reglare poate fi utilizat la prafurile înalt rezistive și cu concentrații mari de praf.

Un alt sistem de reglare se bazează pe folosirea legăturii dintre tensiunea primară a transformatorului de înaltă tensiune și valoarea medie a tensiunii pe electrofiltru. Tensiunea medie maximă corespunde numărului optim de descărcări în electrofiltru. Se iau în considerare puterea și durata descărcărilor, iar frecvența descărcărilor se determină în funcție de eficiența electrofiltrului. Acest sistem de reglare se pretează pentru prafurile cu rezistivitate foarte ridicată și concentrații foarte mari de praf.

Semnalele achiziționate din proces, pentru a fi folosite de unitățile de control, nu sunt întotdeauna aceleași. Europeanii au o lungă tradiție în a utiliza curentul și tensiunea electrofiltrului, așa numitele valori secundare, în timp ce americanii utilizează valorile primare ale curentului și tensiunii [73,93], dar în ultimii ani există tendința de a regla procesul în funcție de valorile

secundare. Instalațiile cu opacimetre în coșuri sunt din ce în ce mai utilizate în special în noile instalații. Semnalele obținute de la opacimetre sunt folosite pentru monitorizarea continuă a prafului emis prin coș, dar uneori și la controlul tensiunii. Utilizarea semnalului de la opacimetru în unitățile de control automat a tensiunii are următoarele scopuri:

- optimizarea procesului tehnologic caracteristic electrofiltrelor;
- economisirea energiei în condiții de operare ușoare.

În fig.2.27 este prezentată schema de reglare automată a tensiunii și semnalele achiziționate din proces.

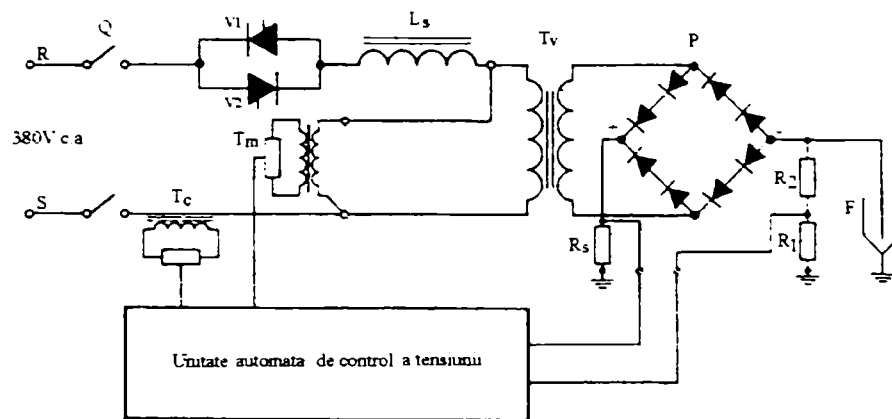
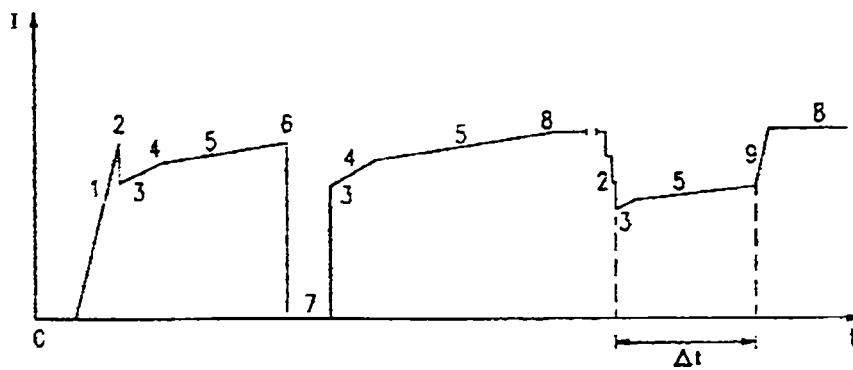


Fig.2.27. Schema electrică utilizată la reglarea automată a tensiunii

Valorile minime ale curentului și tensiunii sunt de importanță vitală în evaluarea operațiilor de colectare a prafului de înaltă rezistivitate, la detectarea efectului Corona invers și în controlul



automat al gradului de intermitență. Valorile de vârf sunt importante în determinarea nivelului de descărcare în electrofiltru, în optimizarea operațiilor electrice în timpul tensiunii de revenire după o descărcare și la calculul puterii C_{max} în mod automat.

Fig.2.28. Controlul curentului în timpul evenimentelor tipice la funcționarea electrofiltrului

În fig.2.28 se prezintă modul cum se realizează controlul automat al curentului continuu care trece prin electrofiltru în acord cu evenimentele variabile ce apar în timpul funcționării [51,159,174]. În această figură s-au făcut următoarele notații: 1 – punerea în funcțiune; 2 – tipul I de descărcare (când arcul electric se stinge ușor, revenirea tensiunii pe electrofiltru realizându-se rapid); 3 – timp de restabilire; 4 – curent de revenire; 5 – evoluția normală a curentului; 6 – tipul II de descărcare (când arcul electric se stinge greu, revenirea tensiunii pe electrofiltru realizându-se după un timp); 7 – timp de stingere; 8 – limita superioară a curentului; 9 – creșterea rapidă a curentului. Alimentarea electrofiltrului se realizează când se anclanșază contactorul principal care alimentează electrofiltrul

cu energie electrică. În timpul primelor două secunde pulsurile de amorsare a tiristoarelor sunt blocate; după aceea, tensiunea electrofiltrului este crescută la o valoare de pornire ajustabilă. Curentul continuu este crescut cu o rată de 200 %/minut. Secvența de pornire se termină când este atinsă limita de curent (8) (curentul limită este un parametru ajustabil) sau când apar descărcări de tipul I (2, fig.2.28) sau de tipul II (6, fig.2.28). O descărcare cauzează o reducere a curentului continuu 4 la o valoare ajustabilă. Din momentul descărcării 2, până când curentul atinge valoarea 4, trece un timp de revenire 3, tensiunea electrofiltrului este reglată într-un mod special, pentru a evita o nouă descărcare. Curentul este crescut cu o rată 5 corespunzând cu rata de descărcare cerută. Rata creșterii 5 este calculată și este în funcție de valorile setate ale curentului și a ratei de descărcare.

În cazul tipului II de descărcare (6, fig.2.28), impulsurile de amorsare a tiristoarelor sunt blocate pe o perioadă dată de un timp ajustabil; după aceea, reacția este la fel ca și în cazul tipului I (2, fig.2.28) de descărcare. După timpul de revenire 3, curentul este crescut cu o rată de creștere calculată intern 5. Dacă nu mai apar descărcări, curentul este limitat la o valoare superioară 8. Dacă se produc schimbări rapide în condițiile de operare a electrofiltrului, multe descărcări pot avea loc într-un timp scurt, reducând curentul la o valoare mică. Când deranjul dispăre, după un interval relativ mare de timp, curentul ajunge la valoare normală dacă este selectată o rată mică de creștere.

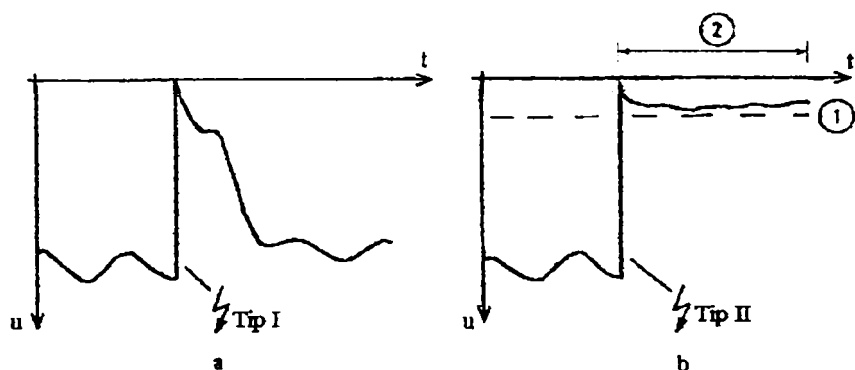


Fig.2.29. Clasificarea descărcărilor în electrofiltre

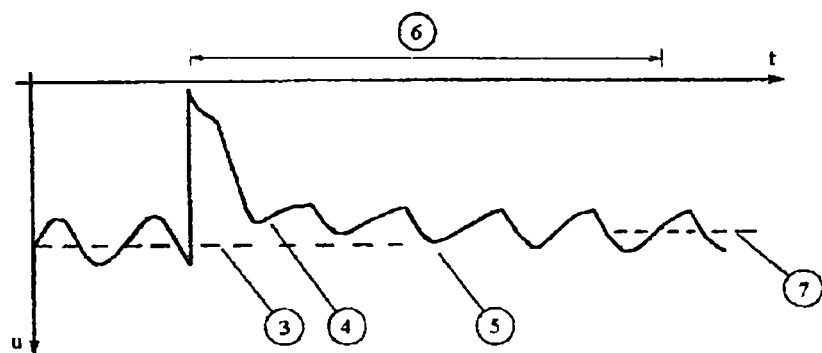


Fig.2.30. Tensiunea electrofiltrului la descărcare

De aceea, controlul automat include o funcție de creștere rapidă a curentului (ramnă rapidă), care măește curentul continuu cu rată corespunzătoare la 200%/minut. Funcția de creștere rapidă a curentului este activată, dacă nu apar descărcări în perioada timpului de uscare care este o mărime ajustabilă.

Descărcările sunt clasificate în tipul I (fig.2.29.a) și tipul II (fig.2.29.b) în acord cu intensitățile lor. Descărcarea tip I se detectează când tensiunea electrofiltrului scade sub o anumită valoare ajustabilă (de regulă între 8 și 40 kV) și dacă ultimul curent atinge valoarea limită într-un timp maxim de 1 ms.

Dacă valoarea tensiunii electrofiltrului u scade sau atinge limita de subtensiune 1 ca în fig.2.29.b, un numărător de 20 ms este pornit (2, fig.2.29.b). Limita de subtensiune este determinată automat la $0,5 \times$ valoarea minimă a tensiunii (valoare ajustabilă). Dacă tensiunea electrofiltrului nu depășește valoarea de subtensiune 1 înainte de trecerea intervalului 2, tipul II de descărcare este detectat. Este inițiată o perioadă de blocare a impulsurilor de amorsare a tiristoarelor determinată de

un parametru ajustabil. După descărcări, curentul continuu este crescut la o valoare redusă în timpul așa numitului timp de revenire. În timpul acestei perioade, tensiunea electrofiltrului este reglată ca în fig.2.30 [159].

După o descărcare, tensiunea electrofiltrului este crescută la o valoare corespunzând cu valoarea tensiunii dinaintea descărcării 3 (fig.2.30) sau la 80 % din valoarea tensiunii de vârf dinaintea descărcării, în timpul a maximum unei perioade și jumătate a frecvenței tensiunii de alimentare.

După aceasta, se trece de la controlul tensiunii la controlul curentului 5 (fig.2.30). Creșterea tensiunii medii la valoarea 7, corespunzând valorii reduse a curentului, ia loc în timpul de recuperare (ajustabil). În fig.2.30 aceasta corespunde după cinci jumătăți de perioadă a frecvenței rețelei. În primele trei jumătăți de perioadă când are loc creșterea tensiunii, nivelul de tensiune 4 poate fi ajustat printr-un parametru. În cazul unei noi descărcări în perioada de revenire a tensiunii, controlul automat va considera ca aceasta este de tipul II de descărcare. După ce timpul de stingere a fost atins, scopul în următoarele trei jumătăți de perioadă este de a crește tensiunea electrofiltrului la un nivel de aproximativ 75% din cel inițial (3, fig.2.30).

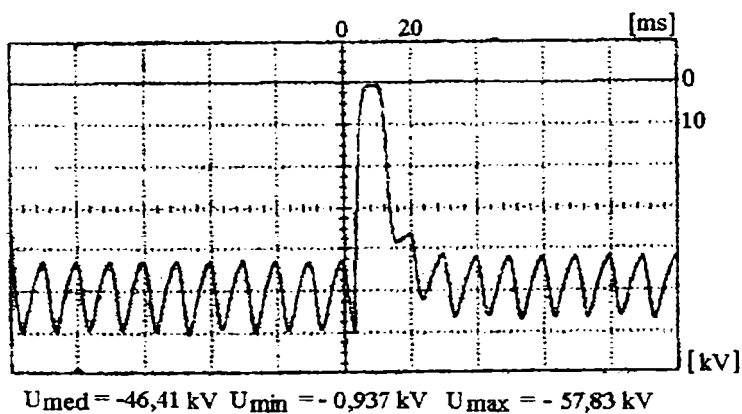


Fig.2.31. Tensiunea măsurată pe electrofiltru în timpul unei descărcări (20ms/div, 10kV/div) [165]

Rata de descărcare poate fi mărită până la 1000 descărcări pe minut (parametru setabil). Ca siguranță că această valoare nu este depășită, s-a introdus o reducere progresivă a curentului care este activată de rata ridicată a descărcării. Această reducere specială este adăugată curentului normal de setare, dacă intervalul între două descărcări este mai mare de 0,5 s, curentul este redus de valoarea normală setată.

Efectul Corona invers apare la o anumită tensiune de alimentare și se caracterizează prin descărcări de la electrozii de depunere la cei de emisie, care perturbă și pot împiedica o funcționare corespunzătoare a electrofiltrului. Prezența acestui efect se caracterizează printr-o scădere accentuată a tensiunii între electrozi și o creștere a curentului.

2.4.2. Noi metode de control

La alimentarea intermitentă cu tensiune a electrofiltrelor, tiristoarele sunt amorsate normal într-o jumătate de perioadă a tensiunii de alimentare, și apoi sunt păstrate blocate în timpul unui număr de jumătăți de perioadă. În fig.2.32 [159] se prezintă curentul primar i_p , tensiunea u pe electrofiltru și tensiunea alternativă de alimentare u_N . Curentul primar este constituit dintr-un puls principal și unul auxiliar de curent. Curentul este blocat în timpul unei jumătăți de perioadă ($T/2$). Când pulsul auxiliar este necesar pentru prevenirea saturației bobinelor transformatorului de înaltă tensiune, pulsul principal de curent este de 120° . O altă metodă de evitare a saturării bobinelor este limitarea unghiului de amorsare folosit la pulsul principal de curent.

Formele de undă sunt periodice și sunt repetate cu un timp corespunzător intervalului dintre două pulsuri de curent principale egale cu $k \times T/2$ (k număr întreg), k este întotdeauna un număr impar de jumătăți de perioadă. Parametrul k este ajustabil, fiind limitat la o valoare superioară (de obicei 25). Dacă $k=1$ funcționarea electrofiltrului corespunde alimentării cu energie în curent continuu, iar pentru $k>1$ aceasta corespunde alimentării intermitente cu tensiune. Parametrul k este deseori exprimat ca o mărime a intermitenței, deci o valoare mare a lui k este considerată ca fiind o valoare ridicată a intermitenței.

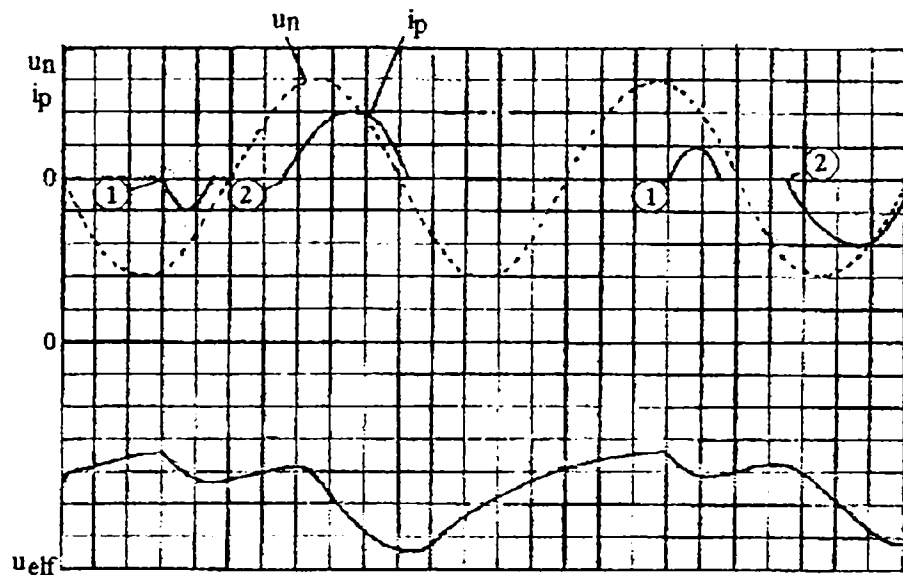


Fig. 2.32. Formele de undă în timpul funcționării cu alimentare intermitentă

În timpul alimentării intermitente, valoarea maximă a curentului atins este curentul multiplicat cu un factor $\alpha=1,5/k$. Limita de curent ajustabilă și setarea curentului sunt deasemenea corectate automat de același factor când se face schimbarea de la alimentarea normală în curent continuu la alimentarea intermitentă, și invers.

Durata între amorsarea auxiliară (1) și amorsarea principală (2) (fig.2.32) este ajustabilă prin intermediul unui parametru α_{aux} , existând o valoare limită inferioară pentru amorsarea auxiliară. O valoare mai mare de 175° dezactivează amorsarea auxiliară, făcând posibilă activarea detectorului fenomenului Corona invers. Când se face schimbarea la o valoare scăzută a intermitenței, unghiul de amorsare este crescut instantaneu

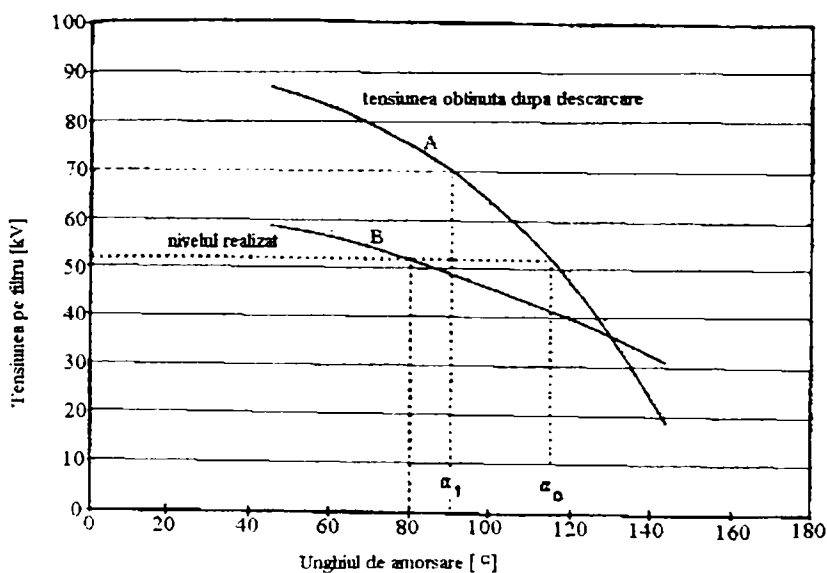


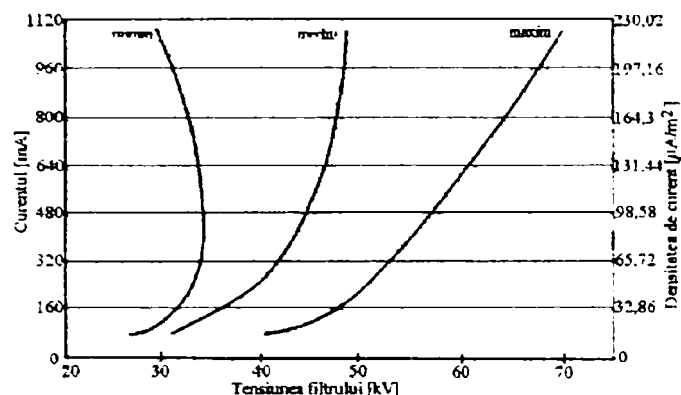
Fig. 2.33. Principiul de control pentru revenirea rapidă a tensiunii după descărcare

pentru a preveni descărcările. După o descărcare, tensiunea electrofiltrului este crescută utilizând un singur puls de curent la un nivel determinat de un parametru, în același fel ca și în cazul alimentării în curent continuu. După aceea, tiristoarele sunt blocate în timpul unui număr de jumătăți de perioadă corespunzător valorii intermitenței curentului.

Problema revenirii tensiunii electrofiltrului în câteva jumătăți de perioadă a tensiunii de linie nu este o soluție simplă. Una dintre dificultăți este de a cunoaște dacă tensiunea instantanee poate fi crescută fără apariția unei noi descărcări. Următoarea problemă este de a găsi valoarea unghiului de

amorsare care va determina nivelul de tensiune cerut. În fig.2.33 este prezentat principiul de control pentru revenirea rapidă a tensiunii după descărcare. Curba B prezintă variația tipică a tensiunii medii în electrofiltru în timpul funcționării normale în curent continuu, iar curba A prezintă tensiunea maximă (de vârf) obținută în prima jumătate de perioadă după descărcare.

Apariția efectului Corona invers într-una sau mai multe secțiuni ale electrofiltrului poate fi determinată în mod normal prin examinarea curbei curent-tensiune. În trecut, această caracteristică



era determinată în funcție de valorile medii. În prezent se analizează posibilitatea folosirea caracteristicii curent mediu-tensiune minimă pentru a indica efectul Corona invers (fig.2.34-câmpul, electrofiltru 1A, Centrala Termoelectrică Mintia-Deva) [168]. Dacă prin creșterea curentului tensiunea scade în câmpul electrofiltrului, atunci se detectează efectul Corona invers.

Fig.2.34. Detectarea fenomenului Corona invers cu ajutorul caracteristicii curent-tensiune

Fenomenul Corona invers constă în încărcarea pozitivă a particulelor și deplasarea lor către electrozii de emisie. Aceștia neavând o suprafață mare, nu vor putea colecta particulele care astfel vor fi antrenate spre ieșirea electrofiltrului, fără a fi colectate, determinând emisii masive de praf la coș.

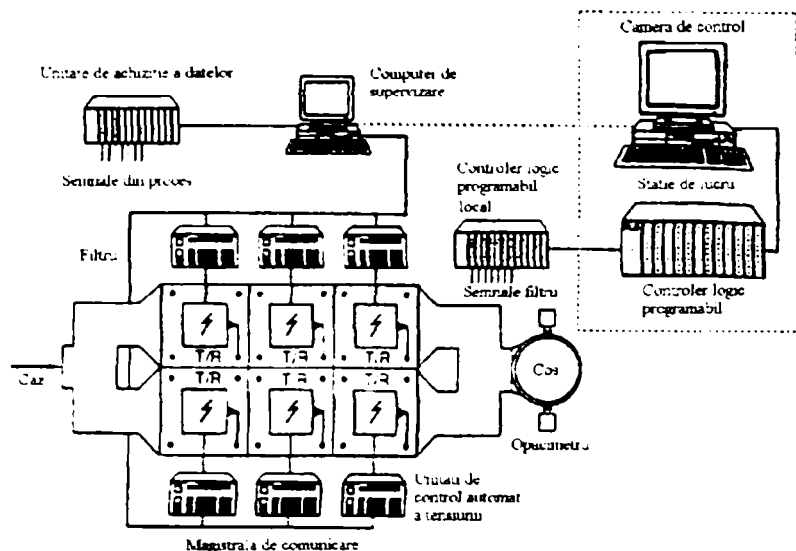
Logica fuzzy oferă avantajul adaptării punctului de funcționare (în funcție de frecvența descărcării, de concentrația de praf de la ieșire, porniri și opriri repetate, etc.). Această logică este utilizată în special pentru fenomenele foarte greu de descris matematic, cum sunt și cele din electrofiltre care au foarte mulți parametri. Datorită dezvoltării tehnicii de calcul pot fi implementate metode numerice. Metodele numerice sunt greu de implementat pentru electrofiltrele reale din cauza intrărilor și a parametrilor care sunt foarte greu sau uneori imposibil de măsurat. Prin utilizarea unor instrucțiuni de tip "if...then...else", care pot fi implementate atât pe controlere specializate cât și pe cele uzuale se poate controla funcționarea unui electrofiltru. Controlul funcționării și a energiei consumate de electrofiltru poate fi realizat folosind astfel de instrucțiuni. Prin utilizarea logicii fuzzy se poate crește eficiența electrofiltrelor utilizând diferite optimizări:

- maximizarea puterii de descărcare Corona pentru prafuri de rezistivitate mică și medie cu frecvențe de descărcare ridicate;

- economisirea energiei electrice cu condiția menținerii emisie de praf sub o limită stabilită.

Un astfel de control cu logică fuzzy s-a implementat pentru un electrofiltru alimentat printr-un invertor cu tranzistoare IGBT (cu frecvență de 10kHz) [32] și s-a dovedit a fi stabil în funcționare, emisiile de praf reducându-se cu 50% față de comanda obișnuită.

Logica fuzzy a fost experimentată și asupra optimizării scuturării electrozilor din secțiunile electrofiltrului, condiția impusă fiind de a obține emisii minime de praf la ieșire [119]. Problema acestui control este de a alege optim timpul de pauză a scuturării pentru a obține eficiența maximă folosind funcții uzuale: triunghiulară, rectangulară și trapezoidală.



O arhitectură tipică este ilustrată în fig.2.35 care prezintă funcții de control a tensiunii, fiecare controlată de o unitate de control a tensiunii. Calculatorul de supervizare primește date din proces și e a opacimetru printr-o unitate de achiziție (uzual controler logic programabil). În această configurație a funcțiilor de control avansat sunt concentrate în calculatorul de supervizare.

Fig.2.35. Sistem de supervizare cu calculator a unui electrofiltru

Printre aceste funcții se enumeră: meniu bazat pe interfață grafică; afișarea condițiilor de operare a electrofiltrului; afișarea funcționării sursei de putere de înaltă tensiune și a sistemului de scuturare (tensiuni, curenți, putere Corona); afișarea și setarea parametrilor; oprirea/pornirea instalației; analiza în timp a funcționării electrofiltrului; optimizarea puterii Corona în acord cu condițiile existente; optimizarea secvențelor de scuturare; măsurarea automată și afișarea caracteristicii curent-tensiune; pornirea/oprirea automată prin subrutinele programului principal; alarme și posibilitate de diagnoză.

În țara noastră sunt implementate arhitecturi de comandă și de supervizare a funcționării electrofiltrelor cu ajutorul PC-XT, 286 sau 386 cum este softul ZEOKOM [155] care funcționează sub sistemul de operare DOS. Un astfel de soft poate regla și supraveghea maximum 20 de câmpuri (surse de alimentare) ale electrofiltrelor, printr-o interfață RS-232/RS-485. De la fiecare sursă de înaltă tensiune sunt transmise valorile actuale ale curentului și tensiunii despre care se obțin informații în legătură cu starea surselor de înaltă tensiune și se achiziționează la 30s valorile acestora pentru a se putea obține optimizarea funcționării. Se pot trasa caracteristicile tensiune-curent pentru fiecare secțiune în parte și acestea se păstrează în memorie pentru o perioadă lungă de timp, după care sunt șterse automat. Softul are posibilitatea de a avertiza operatorul despre defectele sau erorile care apar și anume: contactorul nu poate fi anclanșat, scurtcircuit în secundarul transformatorului de înaltă tensiune, tensiune minimă, arc permanent, avertizare funcționare în gol a transformatorului de înaltă tensiune, defecte la traductoare, creștere peste limită a curentului primar, sursa de înaltă tensiune blocată de protecții externe, temperatura depășită în cuva cu ulei a transformatorului, curent prea mic între electrozi, regim de scuturare nesincronizat, conducție între electrozi.

Recent, au fost concepute alte softuri mai performante, cum este de exemplu WinDAC Data Acquisition & Archiving Software [156,174], utilizat la achiziția datelor, la monitorizarea și controlul electrofiltrelor care pot fi utilizate pe PC cu configurația minimă 486 și care funcționează

sub sistemul de operare Windows 95 sau Windows NT. Cu acest soft, pe lângă intrările uzuale utilizate la comandă și la reglare, se pot utiliza intrări speciale de la opacimetru, încărcarea cazanului cu combustibil, etc. Datele pot fi arhivate pe o perioadă lungă de timp și pot fi exportate în forme tipizate spre baze de date. Se utilizează protocolul Dynamic Data Exchange pentru a putea lucra cu alte rețele de calculatoare. Poate controla până la 256 de câmpuri (surse de alimentare) ale electrofiltre, are 32 de intrări care sunt configurate de către utilizator de la un calculator central și utilizează ultimile năutăți în interfețe grafice.

S-au construit controlere specializate comandate prin calculator cum ar fi PRC-100 care utilizează softul WinRAP [174]. Un astfel de controler asigură completa izolație față de tensiunile înalte și conține un circuit analogic de măsurare a tensiunii de comandă a electrofiltrului. Are izolări optice și transformatoare de izolare. Poate număra scuturările pentru fiecare secțiune în parte. Poate alimenta maxim 16 scuturătoare atât în curent continuu cât și în curent alternativ, în cele mai extreme condiții.

2.5. Factorii care influențează eficiența electrofiltrelor

Există mai mulți factori care determină o eficiență mai bună în colectarea prafului.

Uneori, o schimbare minoră în proces afectează proprietățile fizico-chimice ale particulelor, a dimensiunii și/sau rezistivității prafului aducând îmbunătățiri importante asupra eficienței electrofiltrelor. Păstrarea curată a tuburilor din cazanul în care are loc arderea și în care are loc schimbul de căldură, poate îmbunătăți transferul de căldură și au ca rezultat micșorarea temperaturii gazului. Micșorarea temperaturii determină o rezistivitate mai mică, iar eficiența va crește. Utilizând O_2 se îmbunătățește arderea, reducându-se debitul de gaz purtător de praf. Prin modificarea rezistivității prafului tensiunea de alimentare a electrofiltrului se poate modifica [18,42,50]. În teoria tradițională, eficiența electrofiltrului este considerată maximă dacă distribuția câmpului de viteze a gazului este uniformă. În realitate o distribuție uniformă a gazului nu este posibilă în electrofiltrele industriale [92]. Zonele cu localizări mari ale vitezelor gazelor și zonele turbulente trebuie reduse [168]. Îmbunătățind distribuția gazelor la intrarea în electrofiltru vor fi afectate debitul de gaze și viteza de migrație a particulelor [150].

Infiltrarea aerului este o altă sursă care determină scăderea eficienței electrofiltrelor. Identificarea și eliminarea surselor de infiltrare poate avea efecte pozitive asupra performanțelor electrofiltrului. Infiltrările de aer determină pe lângă coroziunea carcasi electrofiltrului și a componentelor interne, pot conduce la creșterea volumului de gaz și a vitezei, la distorsionarea distribuției de gaz, reducerea timpului de tratare, la afectarea temperaturii gazelor (ceea ce modifică rezistivitatea particulelor) și poate determina reantrenarea particulelor [88].

La colectarea prafulor de rezistivitate ridicată prin umezirea (pulverizarea) cu particule foarte fine de apă și micșorarea temperaturii se micșorează rezistivitatea prafului și eficiența electrofiltrului se îmbunătățește. În acest caz apare coroziunea în electrofiltru și aglomerarea particulelor de praf pe suprafețele colectoare și în buncăre unde se cimentează și se înlătură foarte greu prin scuturare. Deci, cantitatea de apă trebuie foarte bine controlată. Această metodă este întâlnită în industria cimentului de mulți ani, în industria cuprului și în industriile care implică arderea cărbunilor [46].

Condiționarea gazelor este utilizată la arderea cărbunilor sulfuroși de calitate inferioară. Tratarea gazelor cu SO_3 este cea mai comună metodă pentru reducerea rezistivității particulelor și îmbunătățirea performanțelor electrofiltrului. Pentru filtrarea prafului de cărbune, combinația SO_3 cu amoniac au condus la performanțe mai bune decât tratarea numai cu SO_3 . Amoniacul a fost utilizat pentru îmbunătățirea aglomerării particulelor și reducerea reantrenării prafului cu conținut mare de carbon sau pentru aplicații în care viteza gazelor este foarte mare. Această metodă se utilizează mai ales în industria cimentului [8,50,70,95].

Cărbunii cu conținut scăzut de sulf prin ardere nu emană cantități mari de sulfați. Tipul combustibilului ars are un rol deosebit de important în eficiența electrofiltrelor. În cazul în care concentrațiile de praf sunt foarte mari electrofiltrele sunt asociate cu alte tipuri de desprăfuitoare (de exemplu filtrele cu saci) [142].

Controlul filtrării cu microprocesoare moderne după algoritmi bine stabiliți poate înlocui controlerele vechi analogice, iar variatoarele de tensiune alternativă de putere comandabile la frecvență industrială pot fi înlocuite cu invertoare de putere la frecvență ridicată [32]. Controlul cu microprocesor oferă un răspuns rapid la descărcările care au loc în electrofiltru. Ele pot asigura performanțe de genul alimentării intermitente sau prin pulsuri de tensiune și pot detecta efectul Corona invers numai prin măsurarea permanentă a tensiunii și a curentului absorbit. Autodiagnosticarea face din aceste tipuri de controlere niște dispozitive ușor de depanat și întreținut. Aceste tipuri de controlere bazate pe microprocesor pot proteja întregul echipament al electrofiltrului în timpul descărcărilor [16,50].

Majoritatea microprocesoarelor destinate controlului automat al tensiunii sunt mult mai sensibile la zgomot decât vechile echipamente. Orice zgomot poate deforma semnalul către controler și poate determina decizii eronate față de condițiile reale din zona de colectare a electrofiltrelor. Convertorul de alimentare, transformatorul de alimentare, puntea redresoare și echipamentul auxiliar trebuie bine puse la pământ. O punere bună la pământ ajută la disiparea descărcării și la eliminarea zgomotului care s-ar suprapune peste semnalele utile. Dacă electrofiltrul este format din mai multe câmpuri și fiecare câmp este alimentat separat printr-un transformator, fiecare transformator trebuie conectat separat la pământ. Scuturătoarele și echipamentul auxiliar pot fi puse la o pământare comună. Structura metalică a electrofiltrului trebuie pusă și ea la pământ [168].

Când electrofiltrul funcționează la nivele scăzute de tensiune controlul automat păstrează un unghi de amorțire a dispozitivelor comutabile de putere la valori mici, determinând reducerea câmpului electric aplicat particulelor. Pe de altă parte, nivelele de curent scăzute cauzate de curenți de conducție reduși, determină micșorarea timpului de ionizare și apar descărcări în gaz. Se reduce încărcarea electrică a particulelor și a forțelor de menținere a prafului pe suprafețele colectoare. Alegerea unui transformator cu prize intermediare în partea primară poate asigura o flexibilitate mărită între sursa de putere și sarcina variabilă. Un domeniu de +/- 20% al tensiunii asigură o flexibilitate mărită. Dimensionarea corespunzătoare a echipamentului electric determină costurile cu întreținerea și energia electrică, cât și durata de viață [173]. Alegerea optimă a modului de alimentare cu energie a electrofiltrelor determină costurile mai ales cu energia electrică. Pentru prafurile de rezistivitate ridicată alimentarea prin pulsuri constituie cea mai bună soluție [14].

Multe studii și evaluări au arătat că mărind secționalizarea câmpului electric cresc performanțele electrofiltrului. O secțiune electrică mică are un efect mai mic în ceea ce privește descărcările. Nu există un efect direct în ecuațiile de eficiență ale electrofiltrelor în ceea ce privește mărirea secționalizării, dar prin aceasta se mărește siguranța în funcționare.

Electrofiltrele de praf tradiționale utilizează scuturarea prin cădere mecanică sau prin ciocănire. Aceste tipuri de scuturări mecanice oferă flexibilitate scăzută sau chiar deloc în ceea ce privește frecvența și intensitatea scuturării. Utilizarea unui sistem de scuturare gravitațional poate fi mai flexibil și poate fi ajustat mai ușor.

În fig.2.36.a este prezentată curba cu perioada optimă de scuturare pentru praf de granulație grosieră și rezistivitate normală, iar în fig.2.36.b curba cu perioada optimă de scuturare pentru un praf de granulație fină și rezistivitate normală [88].

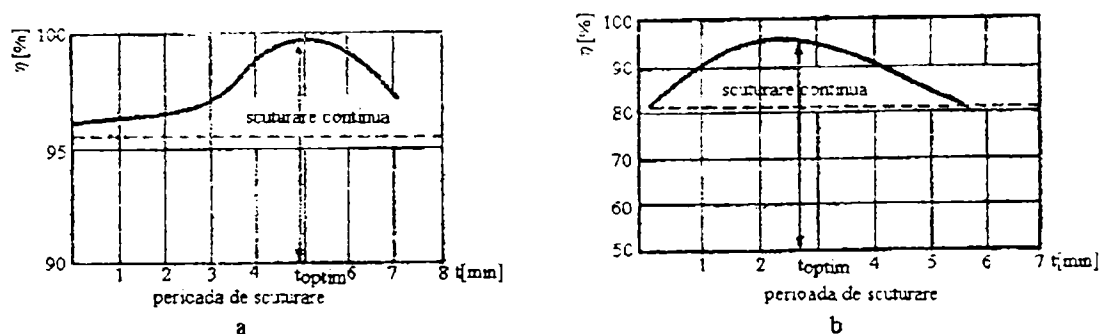


Fig.2.36. Dependenta între eficiența colectării și perioadele optime de scuturare pentru diferite granulații

Pentru un electrofiltru eficiența colectării poate fi crescută prin mărirea spațiului între electrozii de colectare. În prezent, cele mai multe electrofiltre cu plăci au distanța între electrozii de colectare de peste 300mm. Viteza de migrație a particulelor crește cu scăderea spațiului dintre electrozi. De-a lungul electrofiltrelor, distanța dintre electrozii electrofiltrului poate fi modificat: la intrare mai mic, spațiul mărindu-se spre ieșire. Pot fi utilizați mai mulți electrozi de emisie la intrare. Modificând spațiul dintre electrozi se influențează viteza de migrație, îmbunătățind performanțele electrofiltrului [50,100].

Rezistivitatea electrică este o caracteristică a prafului care depinde de granulație, compoziția chimică, umiditate și de temperatură. Există trei domenii de valori ale rezistivității prafului care influențează substanțial performanțele electrofiltrelor:

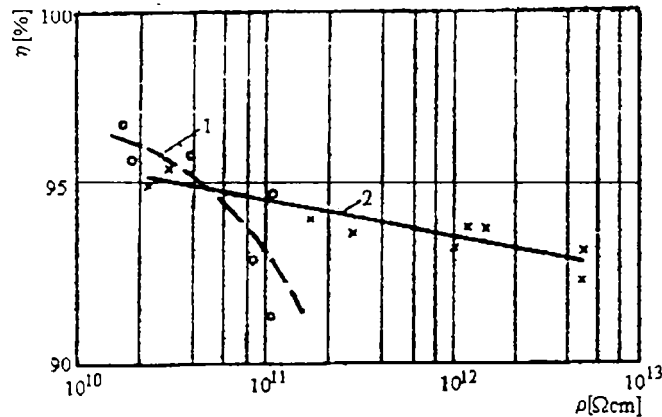
- când rezistivitatea este mai mică de $10^4 \Omega\text{cm}$ se consideră că stratul de praf este bun conducător. Particulele de praf se încarcă repede cu sarcină negativă, sunt atrase de anodi, se depun, după care se încarcă cu sarcină pozitivă fiind reantrenate de praful necolectat. Pentru colectarea acestui tip de praf sunt necesari electrozi speciali de depunere;

- dacă rezistivitatea este cuprinsă între $(10^4 \div 10^{11}) \Omega\text{cm}$, electrofiltrul funcționează cel mai bine. Fenomenul de reantrenare este mai mic, particulele colectându-se mai ușor (o parte cad în buncăre datorită gravitației, iar o parte sunt înlăturate de pe electrozii de depunere prin scuturare);

- pentru rezistivități mai mari de $10^{11} \Omega\text{cm}$, separarea particulelor de praf se face greu. În acest caz, în electrofiltrele alimentate în curent continuu apare fenomenul Corona invers care conduce la o funcționare necorespunzătoare. Electrofiltrele alimentate în curent alternativ au performanțe mai bune pentru aceste valori ale rezistivității [88].

S-au construit diferite instalații care să simuleze condițiile prafului din electrofiltru, pentru măsurarea rezistivității [55,69].

Rezistivitatea prafului depinde de rezistențele de volum, de suprafață și de contact. Rezistența de volum depinde de compoziția chimică a particulelor care se modifică cu temperatura,



rezistența de suprafață și rezistența de contact fiind influențată de umiditate, iar rezistența de contact depinde de formația superficială a particulelor de praf și de densitatea lor de grupare. Rezistivitatea prafului are un efect puternic asupra performanțelor electrofiltrului. Dacă rezistivitatea variază de la 10^8 la $10^{14} \Omega \text{cm}$, electrofiltrul trebuie mărit de patru ori pentru a menține eficiența de separare [50].

Fig.2.37. Variația gradului de separare cu rezistivitatea

Eficiența de colectare a electrofiltrului se determină în funcție de concentrația de praf măsurată cu opacimetre la intrare ($c_i[\text{mg}/\text{m}^3]$) și la ieșire ($c_e[\text{mg}/\text{m}^3]$).

$$\eta = 1 - \frac{c_e}{c_i} \quad (2.12)$$

Variația gradului de separare fig.2.37 al unui electrofiltrului cu rezistivitatea este funcție de tipul electrozilor de emisie (1 - electrozi cu secțiunea transversală în stea, 2 – electrozi cu secțiunea transversală circulară).

Praful separat electrostatic este colectat de electrozii de depunere, producând o micșorare a intensității câmpului electric datorită căderii de tensiune pe stratul depus. Pentru rezistivități mari această cădere de tensiune nu poate fi neglijată. Scăderea tensiunii între electrozi este dependentă de grosimea stratului de praf $\delta[\text{m}]$, rezistivitatea prafului $\rho[\Omega \cdot \text{m}]$ și de densitatea de curent $j [\text{A}/\text{m}^2]$ [88,159]. Căderea de tensiune pe stratul de praf este:

$$U^1 = \delta \cdot \rho \cdot j \quad (2.13)$$

Intensitatea reală a câmpului electric care produce separarea particulelor de praf va fi:

$$E_U = \frac{U - U^1}{h - \delta} = \frac{U - \delta \cdot \rho \cdot j}{h - \delta} \quad (2.14)$$

unde $h [\text{m}]$ este distanța între electrozii de emisie și cei de depunere. Rezultă o modificare relativă:

$$\Delta E_r = \frac{E - E_U}{E} \cdot 100 = \frac{U - \frac{U - \delta \cdot \rho \cdot j}{h - \delta}}{\frac{U}{h}} \cdot 100 = \left[1 - \frac{h \cdot (U - \delta \cdot \rho \cdot j)}{(h - \delta) \cdot U} \right] \cdot 100 \quad (2.15)$$

Uneori, aceste straturi de praf ating grosimi de 2 – 4 mm care nu mai pot fi date jos decât prin curățare mecanică (ceea ce necesită oprirea electrofiltrului) [18]. Electrofiltrele moderne au un sistem automat de periat, care curăță electrozii într-un timp scurt.

Un electrofiltru destinat epurării unui debit mare de gaze nu poate fi proiectat cu un singur câmp cu toți electrozii de emisie alimentați de la o singură sursă de tensiune înaltă, deoarece densitatea de curent nu este aceeași de-a lungul electrofiltrului, datorită faptului că gazul care

conține particule de praf devine din ce în ce mai curat spre ieșirea electrofiltrului. La concentrații mari de praf, spațiul de încărcare determină suprimarea efectului Corona, această suprimare fiind mai mare la electrozii de intrare și neglijabilă la electrozii de ieșire. De aceea, este imposibil de a alimenta de la aceeași sursă toți electrozii de emisie deoarece în acest caz cea mai mare parte a curentului ar fi consumat de către electrozii aflați la ieșirea electrofiltrului. Există și alte motive de a utiliza puține secțiuni mari; probabil cel mai important motiv este acela de a reduce tensiunea de alimentare care are ca rezultat micșorarea eficienței de colectare. Construcțiile mari nu sunt niciodată perfecte, nici chiar atunci când sunt noi. Astfel de defecte mecanice care afectează buna funcționare a electrofiltrelor sunt [164, 165, 167]: pierderea alinierii electrozilor de descărcare; zone ascuțite sau colțuri la electrozii de depunere; vibrația electrozilor de descărcare în momentele de scuturare; praful depus pe electrozi; desprinderea unor bucăți de electrod.

Oricare din acești factori pot produce o micșorare a nivelului de tensiune de descărcare. Un alt motiv important pentru care nu se utilizează secțiuni mari este distribuția neuniformă a gazului supus filtrării.

S-a constatat că există o neadaptare între impedanța internă redusă a grupului de alimentare (transformator-redresor) și capacitatea electrică a unei secțiuni mari (capacitatea electrică a electrofiltrului este proporțională cu suprafața colectoare). De aceea, pot apărea curenți de valoare mare în timpul descărcărilor rezultând o funcționare instabilă a electrofiltrului. În cazul unor descărcări prea dese crește energia disipată sub formă de căldură, în timp ajungându-se la coroziunea și la reducerea vieții electrozilor. Energia acumulată în sistem, imediat înainte de descărcare este proporțională cu capacitatea câmpului sau secțiunii și cu pătratul tensiunii aplicate:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (2.16)$$

Apariția efectului Corona invers este mai mic în cazul unor secțiuni mai mici a electrofiltrelor. S-a determinat experimental că două secțiuni ale aceluiași câmp, dacă au fost alimentate separat de la două grupuri transformator-redresor, au dat rezultate mai bune decât în cazul în care cele două secțiuni au fost conectate în paralel și alimentate de la o singură sursă [91]. Motivul principal de a nu utiliza cât mai multe secțiuni este cel economic, deoarece costul surselor de putere și a izolatoarelor este mai mic în cazul unor secțiuni mai mari. Astfel, la proiectare trebuie ținut cont și de aspectul economic, proiectanții tinzând să minimizeze numărul de secțiuni.

2.6. Concluzii

În cele mai multe aplicații se folosesc electrofiltrele cu plăci datorită avantajelor pe care le au: filtrarea unor debite foarte mari de gaze într-o gamă largă de temperaturi și randamente ridicate. Numărul aplicațiilor în care se utilizează electrofiltre cilindrice este mult mai restrâns (de exemplu în industria chimică). În procesele în care concentrațiile de praf sunt foarte ridicate se utilizează soluții hibride constituite dintr-un desprăfuitor mecanic și electrofiltru. Nu s-a ajuns la construcția unui electrofiltru care să se adapteze la orice aplicație. Pentru tratarea unor debite mari de gaze electrofiltrele ocupă un spațiu foarte mare. Pentru a micșora dimensiunile, utilizarea unei zone de preîncărcare împreună cu răcirea gazului (printr-un schimbător de căldură) poate constitui o soluție. O soluție pentru praful înalt rezistiv, care nu sunt încărcate suficient cu sarcină o constituie

încărcarea electrostatică în curent continuu cât și în curent alternativ. Particulele de praf cu diametre sub $2,5 \mu\text{m}$ sunt cel mai greu de colectat și sunt cele mai periculoase pentru sănătate. Particulele cele mai fine se colectează în ultimul câmp, care prin scuturare o parte vor fi evacuate prin coș. Utilizarea electrofiltrelor umede constituie o soluție pentru colectarea particulelor fine. Pentru că devin foarte scumpe din cauza materialelor costisitoare, se poate utiliza un electrofiltru uscat al cărui ultim câmp este umed. În marea majoritate a aplicațiilor, electrozii de emisie sunt conectați la potențialul negativ al sursei, datorită descărcării Corona mult mai uniforme.

Sursele tradiționale de putere sunt alimentate de la două faze, ceea ce determină o încărcare neuniformă a rețelei trifazate. O atenție deosebită trebuie acordată și elementelor de protecție a instalației electrice, care dacă nu funcționează, pot determina accidente și pagube importante.

În cazul alimentării în curent continuu, cazul cel mai întâlnit în practică, s-a arătat rolul fiecărei componente din schema de alimentare. Datorită complexității procesului de filtrare electrostatică s-a introdus inductorul variabil care se adaptează mai bine fenomenului de încărcare electrostatică și de deplasare a particulelor către suprafețele colectoare.

La alimentarea intermitentă tensiunea maximă pe electrofiltru este mai mare, tensiunea minimă este mai mică și pentru că acest principiu se bazează pe suprimarea pulsurilor de curent, valoarea efectivă și medie a curentului sunt mai mici. Ca rezultat, tensiunea medie pe electrofiltru este mai mică, puterea Corona produsă pe respectiva secțiunea a electrofiltrului este mai mică ceea ce are ca efect o putere consumată de electrofiltru mai mică. Toate acestea sunt valabile în cazul utilizării unor gaze care conțin prafuri cu rezistivitate de valoarea medie și ridicată.

Alimentarea prin pulsuri este recomandată pentru electrofiltre care colectează praf de rezistivitate ridicată. O astfel de alimentare oferă o încărcare mai bună a particulelor, o intensitate mai mare a câmpului electric, o mai bună distribuție de curent și un mai bun control a curentului. În cazul rezistivității scăzute a prafului această alimentare nu asigură o eficiență bună.

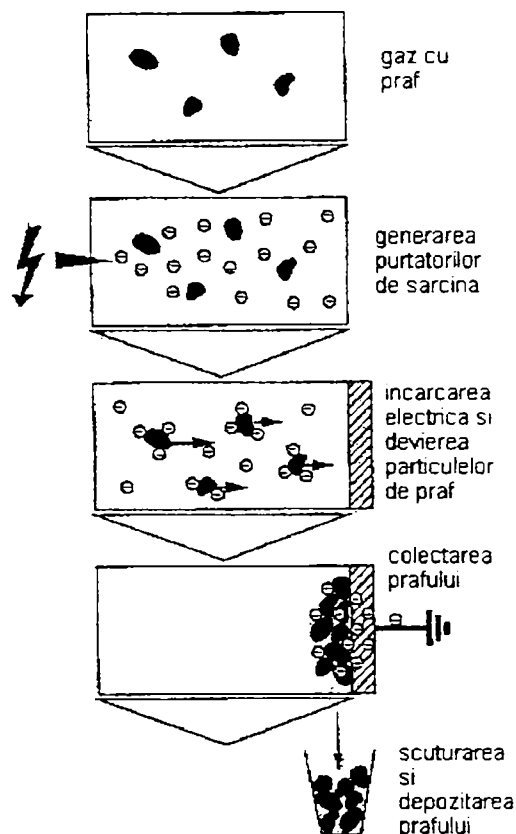
Multe din procesele unde se utilizează electrofiltre au modificări lente sau rapide. Debitul de gaz, temperatura gazului, umiditatea gazului, combustibilul, concentrația se schimbă frecvent. Pentru a menține eficiența de colectare la un nivel cât mai ridicat posibil în condiții dificile de operare este nevoie de mai multă putere și sunt utilizate unități de control din ce în ce mai sofisticate. Pentru o colectare eficientă a prafului cu electrofiltre trebuie dotate cu o unitate bună de control automat a tensiunii, să existe o compatibilitate între sursa de alimentare și secțiunea electrofiltrului care se alimentează, iar starea mecanică a construcției electrofiltrului trebuie să fie bună.

Unul din obiectivele principale ale unităților de control automat este de a păstra tensiunea din secțiunea electrofiltrului cât mai aproape de tensiunea Corona. Pentru aceasta tensiunea este crescută până când apar descărcări în electrofiltru. După descărcare, urmează perioada de revenire a tensiunii, care trebuie să fie cât mai rapidă după o descărcare. În acest fel este posibil de a maximiza integrala tensiune-timp și de a menține o eficiență de colectare ridicată. Revenirea tensiunii de alimentare după o descărcare trebuie făcută fără a apărea o nouă descărcare. O frecvență de descărcare prea mică va determina o neadaptare a tensiunii de alimentare cu gazele din electrofiltru ceea ce determină emisii mari de praf, iar dacă frecvența de descărcare este prea mare, timpul de revenire al tensiunii în electrofiltru va crește ceea ce determină o valoare medie a tensiunii mai mică și o solicitare mai mare a elementelor de comutație din instalația de forță.

3.FUNCȚIONAREA ȘI MODELAREA ELECTROFILTELOR

3.1. Introducere

În electrofiltre separarea particulelor de praf din gaze se face pe cale electrică. Procesul de separare se poate împărți în cinci etape care sunt prezentate în fig.3.1:



- generarea purtătorilor de sarcină;
- încărcarea electrică a particulelor de praf;
- devierea traiectoriei și separarea particulelor de praf;
- depozitarea prafului;
- scuturarea și depozitarea prafului din buncărele electrofiltrului.

În cele mai multe aplicații aceste etape nu sunt așa de bine definite, dar practic se trece prin toate etapele în aproape toate tipurile de electrofiltre. Cele mai multe electrofiltre au în general în vedere și funcționarea acestor etape prezentate mai sus [88,93].

Descărcarea Corona apare între electrozii de tip diferit când se aplică tensiuni de ordinul zecilor de kV, intensitatea câmpului electric din zona electrozilor de emisie devenind mai mare decât cea critică. Datorită prezenței, în gazele rezultate din procesele industriale, a unor molecule neutre sau slab polarizate și prin acțiunea radiațiilor cosmice [23,126] și a reacțiilor chimice, o parte din moleculele gazului se ionizează, formându-se ioni pozitivi sau ioni negativi care

Fig.3.1. Etapele necesare colectării particulelor de praf

împreună cu electronii sunt antrenați în câmp electric, ceea ce determină un curent electric în gaz. Dacă se depășește o valoare critică a intensității câmpului electric din zona electrozilor de emisie, atunci electronii din această zonă sunt accelerați puternic și vor avea o energie cinetică care este suficientă pentru a determina ionizarea prin ciocnire a moleculelor neutre din drumul lor. Prin ciocniri repetate, se crează în zona electrozilor de emisie zone intense de ionizare. Prin recombinație apar fotoni care vor determina o zonă luminoasă în zona electrozilor de emisie.

Încărcarea electrostatică a particulelor de praf este determinată de forțele electrostatice care sunt proporționale cu sarcinile electrice. În practică, se dorește încărcarea electrostatică cât mai rapidă a particulelor de praf indiferent de rezistivitate, pentru o colectare rapidă a prafului. S-a constatat că prin aplicarea unui potențial negativ electrozului de emisie, ionii negativi care se formează se atașează mai bine de particulele de praf decât ionii pozitivi, în cazul alimentării pozitive. După ce particulele de praf au fost încărcate electrostatic asupra lor acționează forțe (electrice și mecanice) care au ca rezultată deplasarea particulelor spre suprafețele (electrozii) de colectare care sunt conectate la pământ. Odată depuse, asupra particulelor de praf acționează alte forțe și va avea loc transfer de sarcină electrică între particule și moleculele de gaz. În funcție de

procesele de încărcare-descărcare va avea loc fie o acumulare de praf, fie desprinderea particulelor de pe stratul deja depus. Prin scuturarea periodică a electrozilor, straturile de praf ajung în buncărele colectoare, de unde printr-un sistem mecanic sau hidraulic vor fi evacuate în afara electrofiltrului [130,134,137].

În electrofiltru are loc curgerea gazelor care conțin particule de praf care sunt supuse atât forțelor electrice cât și forțele datorate agitației termice a gazelor la ieșirea din cazanul unde a avut loc arderea. Interacțiunea dintre câmpul electric și curgerea gazului se numește curgere electrohidrodinamică. De exemplu, intensitatea turbulențelor din curgerea gazului se modifică la comutația sursei de înaltă tensiune [73,145].

Proiectarea și modelarea electrofiltrelor se face de obicei în funcție de anumiți factori (cum este viteza de migrație) prin măsurarea lor în procese similare. În principiu, se utilizează ecuația lui Deutsch, care a fost modificată în ultimii 20 de ani pentru a obține modele cât mai performante. O altă metodă este de a construi electrofiltre pilot (de laborator) la scară pentru a putea evalua temperatura, viteza gazelor, încărcarea prafului, etc. Condițiile gazului la intrarea în electrofiltru sunt foarte importante pentru determinarea eficienței electrofiltrului.

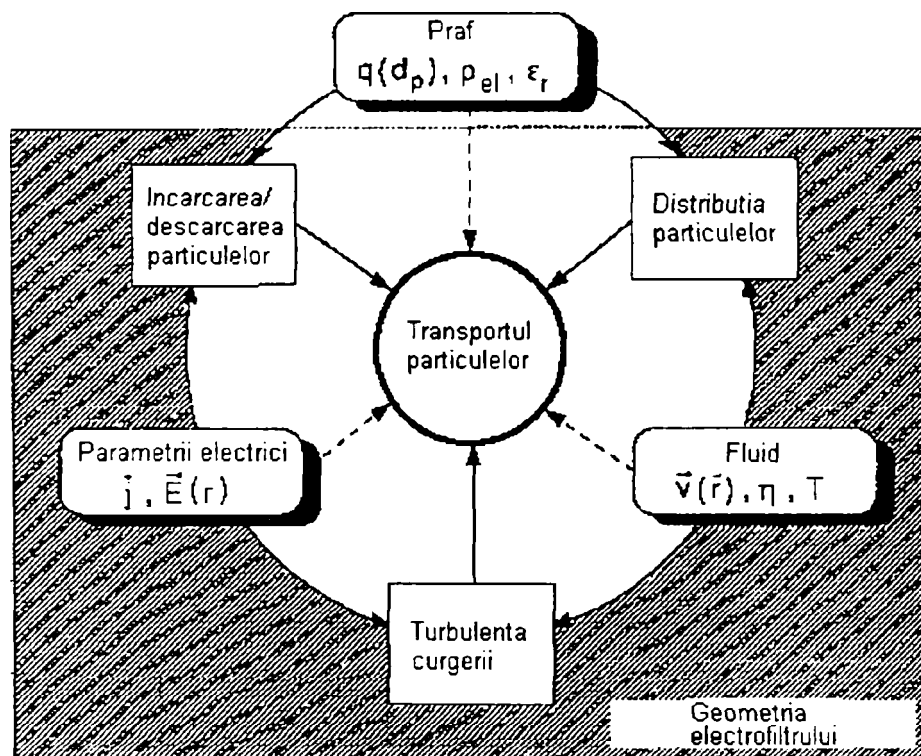


Fig.3.2. Parametrii care influențează transportul particulelor de praf

În fig.3.2 se prezintă parametrii care influențează transportul particulelor de praf. Interacțiunea dintre particulele de praf și câmpul electric determină mecanismul de încărcare-descărcare electrică a particulelor de praf, modificând dispersia particulelor. Transportul particulelor de praf este evaluat mai mult de interacțiuni decât de influența parametrilor. Influența parametrilor și interacțiunea dintre ei sunt în funcție de geometria electrofiltrelor [93].

3.2. Teoria descărcării Corona

Pentru a produce un număr mare de purtători de sarcină în gaz trebuie să se atingă o intensitate critică a câmpului electric care se obține prin aplicarea unei tensiuni înalte între electrozii electrofiltrului. Când tensiunea aplicată depășește o valoare limită apare un curent electric între cei doi electrozi (de emisie și de depunere) care poate fi măsurat, indicând descărcarea Corona. Această tensiune reprezintă valoarea minimă a tensiunii la care apare un curent între cei doi electrozi. Dacă tensiunea este crescută în continuare, curentul crește până când apare o descărcare electrică între cei doi electrozi.

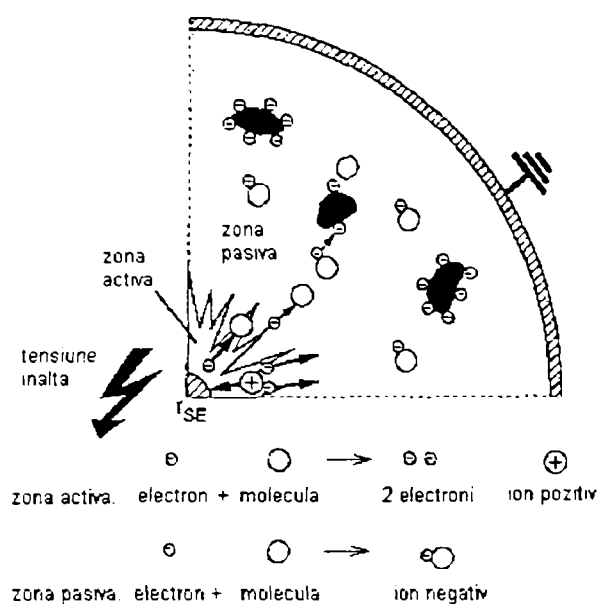


Fig.3.3. Principiul descărcării Corona

De obicei, un gaz conține aproximativ 10^{19} molecule/cm³. Datorită radioactivității naturale și a razei cosmice unele molecule devin ionizate și imediat se recombina. Dacă un câmp electric este prezent în timpul ionizării, electronii vor fi accelerați și separați rapid de ionii pozitivi rămași. După o scurtă distanță parcursă, electronii vor ciocni alte molecule neutre de gaz, și se produc alți electroni secundari care au suficientă energie cinetică pentru a produce o nouă ionizare (fig.3.3).

Efectul de avalanșă începe în regiuni unde intensitatea câmpului electric este suficient de mare pentru a aduce electronii la asemenea energii încât

să producă ionizări. Recombinarea ionilor și moleculele neneutre emit fotoni, iar descărcarea este de culoare albastră și însoțită de pocnituri puternice. Un câmp electric neomogen apare în jurul electrozilor de descărcare. Câmpul electric puternic este limitat la regiuni apropiate de electrozii de descărcare. Această regiune unde procesul de ionizare apare este denumită zonă activă [93,134].

Ionii pozitivi sunt atrași de electrodul negativ, iar ionii negativi de electrodul pozitiv. Concentrația ionilor este de aproximativ 10^9 ioni/cm³, sau uneori mai mult, la temperatura și presiunea normală. Concentrația ionilor poate să crească până la 100% dacă se utilizează substanțe care se ionizează ușor (de exemplu cesiu) [56,126].

Când electronii liberi în mișcare intră în zona cu intensitate mică a câmpului electric, denumită zona pasivă, ei nu mai sunt capabili de ionizare a altor molecule, atașându-se moleculelor de gaz (de exemplu O₂, SO₂, Cl₂) formând ioni negativi în gaz. Mărimea zonei active este de numai câteva procente din zona pasivă, separarea făcându-se în zona pasivă.

În general, electrozii de descărcare pot funcționa atât la polaritate negativă cât și la polaritate pozitivă. Pentru o geometrie dată, tensiunea de inițializare Corona și descărcarea electrică în gaz apare la tensiuni mai înalte în cazul polarizării negative, comparativ cu polarizarea pozitivă. Datorită intensităților mari ale câmpului electric, cele mai multe aplicații industriale au alimentarea negativă (electrozii de emisie sunt alimentați de la polul negativ a tensiunii înalte, iar electrozii de colectare la polul pozitiv sunt conectați și la pământ).

Se consideră un gaz la presiunea p [N/m²] și temperatura T [K], într-un câmp electric cu intensitatea E [V/m], conform legii gazelor ideale:

$$p = \chi \cdot k \cdot T \tag{3.1}$$

unde χ [N/(J·m²)] este un parametru ce depinde de natura gazului, iar k - constanta lui Boltzmann ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

Fie un electron de masă m [kg] și sarcină q [C] care se află în gaz. Electronul primește energie de la câmpul electric și se deplasează pe drumul mediu λ [m].

Dacă se consideră ciocnirea electronului cu o moleculă dură de formă sferică, drumul mediu al electronului este dat de [127]:

$$\lambda = \frac{l}{\chi \cdot Q} \quad (3.2)$$

unde Q [J·m/N] este un factor de împrăștiere dintre electron și molecula de gaz.

Din relațiile (3.1) și (3.2) rezultă drumul mediu parcurs de electron:

$$\lambda = \frac{k \cdot T}{p \cdot Q} \quad (3.3)$$

Deoarece câmpul electric acționează într-o singură direcție 0-x, accelerația pe care o imprimă electronului este dată de:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{q \cdot E}{m}; a_y = \frac{dv_y}{dt} = 0; a_z = \frac{dv_z}{dt} = 0 \quad (3.4)$$

unde q este sarcina electronului, iar $v_x, v_y, v_z, a_x, a_y, a_z$, sunt vitezele [m/s], respectiv accelerațiile [m/s²] după cele trei axe.

Ecuatia mișcării electronului este:

$$x = x_0 \pm v_x \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_x \cdot t^2 \quad (3.5)$$

se utilizează $+v_x$ atunci când viteza electronului are sens opus față de intensitatea câmpului electric și $-v_x$ atunci când viteza electronului are același sens cu intensitatea câmpului electric.

Energia cinetică a electronului este:

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \quad (3.6)$$

Aceasta este energia chiar înaintea coliziunii între electron și molecula de gaz.

Conform legii conservării energiei, energia cinetică este egală cu lucrul mecanic determinat de electron pe distanța x :

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) = q \cdot E \cdot x \quad (3.7)$$

unde:

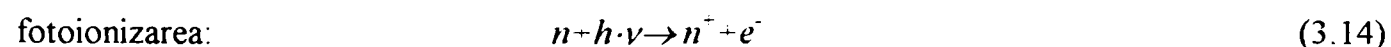
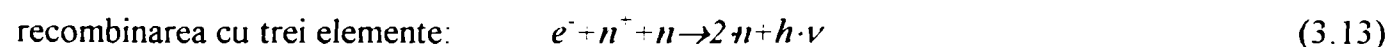
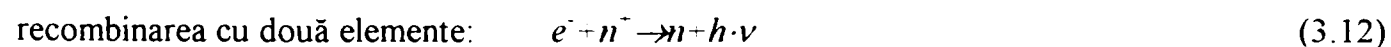
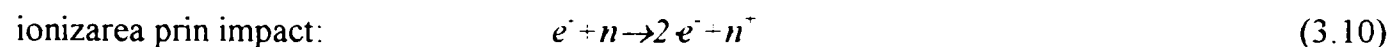
$$v_e = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (3.8)$$

Din relațiile (3.7) și (3.8) rezultă:

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot E \cdot x}{m}} \quad (3.9)$$

În urma ciocnirilor repetate cu moleculele de gaz, electronii își amplifică energia inițială după un anumit număr de ciocniri (peste 200) [126, 127].

Modurile fundamentale ale apariției descărcării Corona au la bază interacțiunile dintre electroni-molecule sau fotoni-molecule și anume: ionizare prin impact, atașarea electronilor, recombinația cu două sau trei elemente și fotoionizarea:



unde e^- este un electron, n - moleculă neutră și $h \cdot \nu$ este un foton cu frecvența ν , iar h - constanta lui Plank, $h=6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s [25].

În absența unui mecanism de numărare un electron determină, prin energia cinetică mare pe care o posedă (~ 10 eV), un număr de electroni și ioni care cresc exponențial către suprafețele colectoare. Numărul de ionizări pe unitatea de lungime, pentru un anumit tip de molecule, este denumit "coeficient de ionizare", notat cu α [1/m] și depinde de intensitatea câmpului electric E [V/m] și de densitatea moleculelor neutre N [1/m³]. Pentru aer α poate fi aproximat cu [73]:

$$\frac{\alpha}{N} = 6,619 \cdot 10^{-21} \cdot \exp\left(\frac{-5,593 \cdot 10^{-19}}{\frac{E}{N}}\right) \text{ [m}^2\text{] pentru } \frac{E}{N} \leq 1,5 \cdot 10^{-19} \text{ [V} \cdot \text{m}^2\text{]} \quad (3.15)$$

$$\frac{\alpha}{N} = 2 \cdot 10^{-20} \cdot \exp\left(\frac{-7,248 \cdot 10^{-19}}{\frac{E}{N}}\right) \text{ [m}^2\text{] pentru } \frac{E}{N} > 1,5 \cdot 10^{-19} \text{ [V} \cdot \text{m}^2\text{]} \quad (3.16)$$

Rata de apariție a ionizării este dată de: $\alpha \cdot n_e \cdot |v_e|$ [1/(m³·s)], unde n_e [1/m³] este densitatea electronilor, iar $|v_e|$ [m/s] este viteza medie a electronilor.

Atașarea electronilor are loc acolo unde un electron liber devine componentă a unei molecule neutre formându-se un ion negativ și poate fi determinată de recombinarea a două sau trei elemente.

Numărul de atașări a două elemente pe unitatea de lungime se notează cu η_2 [1/m], iar pentru trei elemente pe unitatea de lungime cu η_3 [1/m].

Pentru aer, acestea se pot aproxima cu:

$$\frac{\eta_2}{N} = 6,089 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{E}{N} - 2,893 \cdot 10^{-23} \text{ [m}^2\text{] pentru } \frac{E}{N} \leq 1,05 \cdot 10^{-19} \text{ [V} \cdot \text{m}^2\text{]} \quad (3.17)$$

$$\frac{\eta_2}{N} = 8,889 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{E}{N} + 2,567 \cdot 10^{-23} \text{ [m}^2\text{] pentru } \frac{E}{N} > 1,05 \cdot 10^{-19} \text{ [V} \cdot \text{m}^2\text{]} \quad (3.18)$$

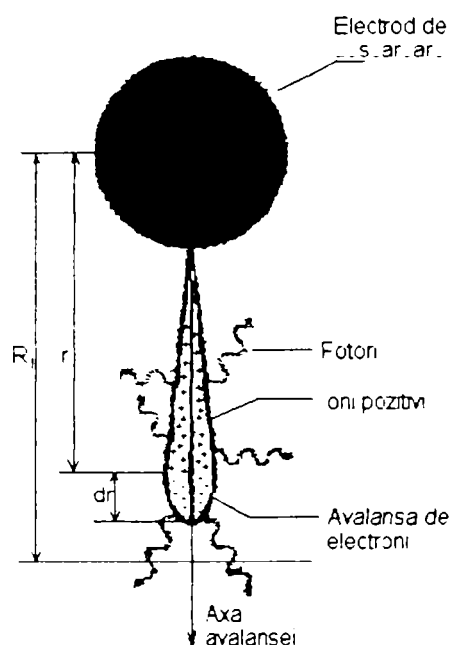
$$\frac{\eta_3}{N^2} = 3,7986 \cdot 10^{-74} \cdot \left(\frac{E}{N}\right)^{-1,2749} \text{ [m}^5\text{]} \quad (3.19)$$

Rata de atașare a electronilor la moleculele neutre este dată de: $-(\eta_2 + \eta_3) \cdot n_e \cdot |v_e|$ [1/(m³·s)].

Recombinarea apare acolo unde electronii liberi se atașază de ioni pozitivi. Rata de recombinaere este dată de: $-\beta \cdot n_e \cdot n_p$ [1/(m³·s)], unde β [1/m] este coeficientul de recombinaere, n_e [1/m³] densitatea electronilor, iar n_p [m/s] este viteza ionilor pozitivi. Pentru aer, rata de recombinaere este de $2 \cdot 10^{-13}$ [1/(m³·s)] [73].

Criteriul Townsend

Modelul avalanșei electronului în procesul de descărcare poate fi aplicat asupra unui electrod de emisie pentru a determina condițiile limită ale densității de încărcare a electrodului.



Se consideră că avalanșa electronului pornește de pe electrodul de emisie de rază r_e și de la un electron liber (probabil eliberat de pe suprafața electrodului prin fotoemisie) ca în fig.3.4. Avalanșa se dezvoltă radial sub influența câmpului electric, numărul de electroni N_e la distanța r față de axa electrodului de emisie este:

$$N_e(r) = e^{\int_{r_e}^r (\alpha - \eta_2 - \eta_3) dr} \quad (3.20)$$

unde α , η_2 , η_3 sunt în funcție de câmpul electric, iar r_e [m] este raza electrodului de emisie (emisie). În cazul intensităților mari ale câmpului electric pentru a iniția descărcarea $\alpha \gg \eta_2 + \eta_3$ la suprafață, până când $\alpha > \eta_2 + \eta_3$ avalanșa va continua să crească.

Fig.3.4. Explicativă pentru avalanșa electronului

Câmpul electric scade rapid spre raza R_i unde $\alpha = \eta_2 + \eta_3$. Dincolo de R_i , avalanșa nu mai există, iar electronii se atașează de moleculele neutre pentru a forma ioni negativi care continuă să se îndepărteze față de electrodul de emisie.

La o creștere dr a avalanșei, numărul de fotoni produși n_{ph} este [73]:

$$dn_{ph}(r) = \Phi(r) \cdot N_e(r) \cdot dr \quad (3.21)$$

unde Φ [1/m] este numărul de fotoni produși de electroni liberi pe metru, iar $N_e(r)$ - numărul de electroni. S-a determinat că Φ este proporțional cu rata de ionizare α [119,120]:

$$\Phi(r) = f \cdot \alpha(r) \quad (3.22)$$

Numai o parte din acești fotoni ating electrodul de emisie pentru a elibera noi electroni. Numărul de electroni eliberați vor depinde de unghiul solid la distanța r (față de electrodul de emisie) și atenuarea fotonilor între r și r_e . De aceea numărul de fotoni care ating electrodul de emisie este:

$$dn_w(r) = dn_{ph}(r) \cdot g(r) \cdot e^{-(r-r_e)\mu} = f \cdot \alpha(r) \cdot N_e(r) \cdot g(r) \cdot e^{-r \cdot \mu} \cdot dr \quad (3.23)$$

unde $g(r)$ este un factor geometric, μ [1/m] - coeficient de absorbție a fotonilor, iar f [1/m] este factor de absorbție.

Numărul total de electroni $N_e(ph)$ eliberați de pe electrodul de emisie prin fotoemisie se obține prin integrarea relației (3.24) între limitele r_e și R_i :

$$N_{e(ph)} = \gamma_{ph} \cdot \int_{r_e}^{R_i} \alpha(r) \cdot N_e(r) \cdot g(r) \cdot e^{-r \cdot \mu} \cdot dr \quad (3.24)$$

unde γ_{ph} [-] este cunoscut ca al doilea coeficient a lui Townsend, care are valoarea 10^{-3} .

Pentru a avea loc o descărcare autosusținută, fiecare avalanșă trebuie să elibereze cel puțin un electron de pe electrodul de emisie. Acesta este cunoscut ca și criteriul Townsend și este exprimat ca:

$$N_{e(ph)} > 1 \quad (3.25)$$

$N_{\alpha(ph)}$ depinde de intensitatea E a câmpului electric la distanța r față de electrodul de emisie prin intermediul coeficienților α , η_2 și η_3 . Valoarea tipică a factorului de absorție f este de 5 m^{-1} .

Procesele descrise mai sus sunt de ordinul ns sau μs . Tipul descărcării depinde de amplitudinea și polaritatea tensiunii aplicate, de dimensiunile și geometria electrodului de emisie, de mediul de descărcare și de condițiile fizice ambientale.

În câmpuri electrice cu intensități mici viteza ionilor este considerată a fi proporțională cu intensitatea câmpului electric local, iar constanta de proporționalitate este cunoscută ca mobilitate a ionilor respectivi.

Densitatea de curent J [A/m^2] este în relație de proporționalitate cu densitatea de sarcină a purtătorilor de sarcină ρ [C/m^3] și viteza purtătorilor de sarcină v_x [m/s]:

$$J = \rho \cdot v_x \quad (3.26)$$

Între intensitatea câmpului electric E [V/m], viteza purtătorilor de sarcină v_x [m/s], mobilitatea ionilor k_i [$\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$] există relația:

$$v_x = k_i \cdot E \quad (3.27)$$

Din (3.26) și (3.27) rezultă:

$$J = \rho \cdot k_i \cdot E \quad (3.28)$$

La diferențe de potențial mici între electrozi, această relație este valabilă dacă se consideră intensitatea câmpului electric constantă. La diferențe de potențial mari curentul crește mai rapid decât intensitatea câmpului electric [128], deci produsul $\rho \cdot k_i$ nu mai este constant și depinde de intensitatea locală a câmpului electric.

Mobilitatea ionilor produși de electrozii de descărcare este o funcție complicată determinată de: densitatea gazului, intensitatea câmpului electric și de speciile constituente ale gazului [130].

Pe baza legii gazelor ideale, pentru un mediu dat, mobilitatea ionilor poate fi scrisă ca o funcție de presiune și de temperatură:

$$k_i = k_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p} \right)^{\bar{\omega}} \quad (3.29)$$

unde k_0 [$\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$], p_0 [N/m^2] sunt mobilitatea ionilor, respectiv presiunea la temperatura T_0 [K], iar k [$\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$], p [N/m^2] sunt mobilitatea ionilor, respectiv presiunea la temperatura T [K] și $\bar{\omega}$ [-] este un parametru care se determină experimental.

Starea gazului și în special compoziția gazului determină într-un mod esențial proprietățile electrice ale electrofiltrelor.

Suprafața electrodului determină în mod hotărâtor apariția efectului Corona. Cele mai mici impurități (particule de praf conductor) sau neregularități (din construcție) a electrozilor devin locuri de apariție a efectului Corona și au un caracter instabil. La mică putere, caracterul descărcării Corona este neautonom depinzând de factorii de ionizare exteriori. Descărcările au un caracter instabil, fiind greu de reprodus, iar curentul absorbit este extrem de mic. Determinarea tensiunii critice și implicit a intensității critice ale câmpului electric sunt greu de stabilit analitic. Relații empirice se pot stabili numai în condiții deosebite (electrozi perfect curați, natura gazului, umiditate, etc.). Crescând tensiunea de alimentare a electrozilor, la un moment dat se trece de la descărcare neautonomă și instabilă, la o descărcare autonomă, iar curenții pot fi măsurați mai ușor pentru că vor avea valori mai mari. Electrocul va fi înconjurat de o luminescență violet-albăstruie

și fenomenul este însoțit de un zgomot specific. Dacă se crește în continuare tensiunea, descărcarea va fi din ce în ce mai puternică, la fel și luminescența și la un moment dat apar strimeri care vor conduce la o descărcare completă care este determinată de tensiunea și rezistența internă a sursei. Pe suprafața electrodului de emisie intensitatea câmpului electric se menține aproximativ constantă, indiferent de polaritatea electrodului de emisie, odată cu creșterea tensiunii de alimentare. În exteriorul electrodului intensitatea câmpului electric, diferă de la o alimentare la alta, pentru aceeași tensiune de alimentare.

Când are loc descărcarea Corona între electrozi intensitatea medie a câmpului electric este de 1,5-3kV/cm, iar curenții care apar sunt de 0,012-0,25 mA/m de electrod. Mobilitatea moleculelor de gaz este de aproximativ 2 cm²/(V·s) [73,127,130]. La alimentarea cu potențial negativ a electrozilor de emisie, ionii pozitivi din vecinătatea electrodului vor fi atrași de electrodul de emisie, iar electronii vor fi emiși de pe suprafața electrodului de emisie și se vor atașa particulelor de praf.

Prin atașarea electronilor la moleculele de gaz se formează ioni negativi. Electronii eliberați de pe electrodul de emisie produc numeroși ioni, care la rândul lor vor determina prin ionizare noi electroni. Odată cu creșterea distanței între electroni și electrodul de emisie, numărul electronilor scade datorită recombinațiilor. Atașarea electronilor de moleculele de gaz depinde de compoziția gazelor. Trebuie utilizați electrozi de emisie care să creeze intensitatea maximă a câmpului electric în vecinătatea electrodului de emisie (se pot obține 80-500 kV/cm) [137].

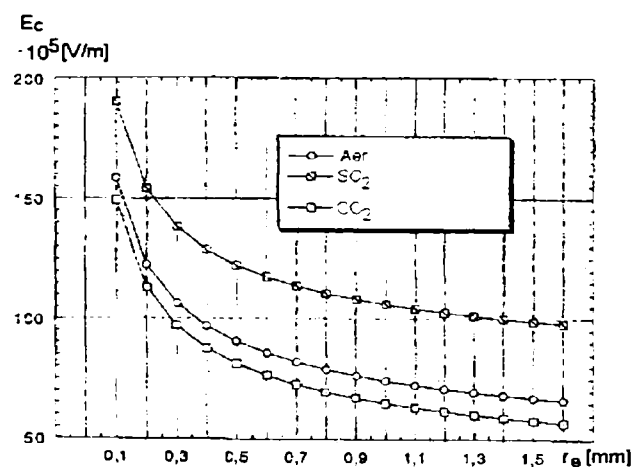


Fig.3.5. Intensitatea electrică de inițiere a efectului Corona în funcție de raza electrodului de emisie și compoziția gazului

Peek a propus o relație semiempirică unde intensitatea inițială a câmpului E₀[V/m] este în funcție de densitatea relativă a gazului δ[-], de raza electrodului de descărcare r_e[m] și de două constante empirice A[V/m] și B[V/m^{0.5}] caracterizate de gaz și polaritatea Corona [24,93]:

$$E_0 = A \cdot \delta + B \cdot \sqrt{\frac{\delta}{r_e}} \tag{3.30}$$

$$\delta = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \tag{3.31}$$

Temperatura și presiunea se referă la condițiile normale, T₁=273 [K] și p₁=10⁵ [N/m²], iar p₂ [N/m²] este presiunea la temperatura T₂ [K]. Pentru condiții tipice în electrofiltru (polaritate negativă la electrozii de emisie) s-au determinat următoarele valori pentru constante: A=3,2·10⁶ [V/m] și B=9·10⁴ [V/m^{0.5}].

În fig.3.5 este reprezentată intensitatea câmpului electric de inițiere a efectului Corona în funcție de raza electrodului de emisie pentru aer, SO₂ și CO₂. O mărire a razei electrodului de emisie determină o descreștere a intensității câmpului electric, această scădere fiind mai mică pentru raze ale conductorului $r_e > 1$ mm.

O problemă importantă este determinarea distanței la care se deplasează sarcina spațială. Se consideră un ion care are mobilitatea k_i [cm²/(V·s)] și este plasat în câmpul alternativ, de frecvență f [Hz], de intensitatea electrică E [V/cm], câmpul fiind creat de un electrod de emisie cu raza r_e [cm] care este conectat la un potențial ridicat astfel încât să apară descărcarea Corona [130]. Viteza de deplasare v [cm/s] a ionului în câmpul electric este:

$$v = k_i \cdot E \quad (3.32)$$

Viteza se mai poate exprima și în funcție de distanța față de electrodul de emisie r [cm] și timpul t [s]:

$$v = \frac{dr}{dt} \quad (3.33)$$

Intensitatea câmpului electric E [V/cm] nu este constantă și depinde de raza electrodului de emisie r_e [cm], de distanța r [cm] până la locul unde se determină intensitatea câmpului electric și de intensitatea câmpului electric E_e [V/cm] la suprafața electrodului de emisie:

$$E = E_e \frac{r_e}{r} \quad (3.34)$$

Din relațiile (3.32), (3.33) și (3.34) rezultă:

$$k_i \cdot E_e \frac{r_e}{r} = \frac{dr}{dt} \quad (3.35)$$

După integrare se pun condițiile la limită pentru timpul t și distanța r :

$$t \Big|_0^T = \frac{1}{k_i \cdot E_e \cdot r_e} \cdot \frac{r^2}{2} \Big|_{r_e}^{r_{max}} \quad (3.36)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.37)$$

de unde rezultă r_{max} [cm]:

$$r_{max} = \sqrt{r_e^2 + \frac{k_i \cdot E_e \cdot r_e}{f}} \quad (3.38)$$

Pentru a determina distanța maximă de ionizare r_{max} se consideră următorul exemplu [122]: $k_i=2$ [cm²/(V·s)], $E_e = 40$ kV/cm, $r_e \in [0,01-0,2]$ cm, iar $f \in [0,05-50]$ kHz. S-au trasat două grafice pentru determinarea lui r_{max} în funcție raza electrodului de emisie r_e și frecvența câmpului electric f , cu ajutorul programul MatLab 5.3 [31] pe domenii de frecvență. În fig.3.6.a se utilizează domeniul 50-500Hz, iar în fig.3.6.b deomeniul de 500-50000Hz.

La alimentarea cu potențial negativ a electrodului de emisie va avea loc o emisie masivă a electronilor de pe suprafața electrodului. Electronii se vor deplasa cu viteză foarte mare și vor determina noi ionizări prin ciocnirea moleculelor de gaz. Dacă electronii nu se atașază moleculelor de gaz atunci ei vor determina excitări ale acestora care favorizează o ionizare mai ușoară la o ciocnire viitoare. La o distanță mai mare față de electrodul de emisie, electronii nu vor mai avea viteză mare și se vor atașa particulelor de praf care se depun pe electrodul de colectare. Ionii

pozitivi care apar în timpul ciocnirilor se vor deplasa spre electrodul de emisie pe care-l va ciocni determinând noi emisii de electroni.

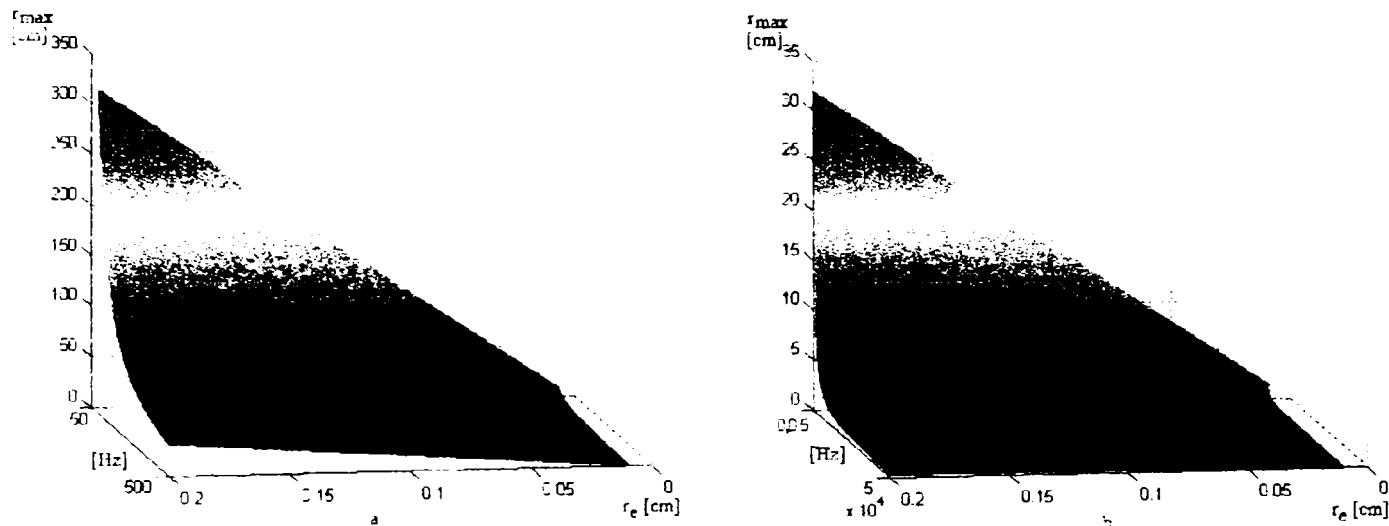


Fig. 3.6. Distanța maximă de ionizare în funcție de frecvență și raza electrodului de emisie

Dacă se alimentează pozitiv electrodul de emisie, electronii din spațiul dintre electrozi vor fi puternic accelerați și vor avea loc ciocniri cu moleculele de gaz, și apar ioni pozitivi care se vor deplasa spre electrodul de colectare care este legat la pământ.

Distanța dintre electrozii electrofiltrului este în funcție de frecvența tensiunii în cazul alimentării cu tensiune alternativă a electrofiltrelor. Dacă distanța între electrozi este suficient de mică și ionii au timp să ajungă la electrodul de polaritate opusă într-o jumătate de perioadă, atunci descărcarea Corona se comportă ca și în cazurile prezentate pentru fiecare semiperioadă în parte. Dacă distanța între electrozi este mare atunci sarcina spațială a ionilor își păstrează semnul la scăderea tensiunii și continuă să se îndrepte spre electrod până când tensiunea pe electrod își schimbă semnul. Astfel, apare o traiectorie oscilantă a ionilor [88,134,137].

Aplicarea unor impulsurilor de tensiune va determina emisia masivă de electroni de pe suprafața electrozilor de descărcare rezultând mai multe ciocniri și ionizări ale moleculelor de gaz pentru impulsuri negative. Electronii vor produce ionizări, spre electrodul de descărcare în cazul alimentării pozitive. Consumul energetic este mai mic în cazul alimentării prin pulsuri decât în cazul aplicării unei tensiuni continue constante. Descărcarea depinde de tipul electrozilor de emisie și de polaritate și de amplitudinea tensiunii care se aplică [35].

S-au experimentat sisteme de câte trei electrozi pentru a crea descărcarea Corona. Un electrod este de emisie, altul este conectat la pământ, iar cel de-al treilea (cu rol de grilă) controlează intensitatea câmpului electric dacă este așezat într-o poziție optimă. Grila are rolul de a preveni trecerea bruscă de la descărcarea Corona la descărcarea electrică care poate cauza daune considerabile dacă nu există un sistem de protecție corespunzător. Potențialul grilei poate fi modificat într-un anumit domeniu pentru a se obține trecerea cea mai lină de la descărcarea Corona la descărcarea electrică între electrozi. La un astfel de sistem de descărcare, s-au făcut experiențe atât în condiții uscate cât și umede [28].

În electrofiltrele cu plăci tensiunea de inițiere Corona se determină cu [93]:

$$U_0 = E_0(\delta, r_e) \cdot r_e \cdot \ln \frac{d(s, 2c)}{r_e} \quad (3.39)$$

$$\frac{d}{2 \cdot c} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s}{2 \cdot c}; \frac{s}{2 \cdot c} < 0.3 \quad (3.40)$$

$$\frac{d}{2 \cdot c} = 0.18 \cdot e^{2.96 \frac{s}{2 \cdot c}}; 0.3 < \frac{s}{2 \cdot c} < 1 \quad (3.41)$$

$$\frac{d}{2 \cdot c} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot e^{\pi \frac{s}{2 \cdot c}}; \frac{s}{2 \cdot c} > 1 \quad (3.42)$$

unde: U_0 [kV] este tensiunea de inițiere Corona, E_0 [kV/cm] - intensitatea câmpului electric la care apare descărcarea Corona, r_c [mm] - raza echivalentă a electrodului de emisie, d [mm] - distanța pe axa 0-x în direcția electrozilor de emisie, s [mm] - distanța între doi electrozi alăturați de polaritate diferită, iar $2 \cdot c$ [mm] distanța între doi electrozi de emisie alăturați.

Distribuția câmpului electric între electrozii electrofiltrului determină distribuția curentului pe suprafețele colectoare, încărcarea electrostatică a particulelor și migrația lor. Distribuția câmpului electric depinde de geometria și modul de alimentare cu tensiune a electrofiltrului. Intensitatea câmpului electric este prezentată simplificat:

$$E = \frac{U}{s} \quad (3.43)$$

Ecuția lui Poisson este [73]:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_{tot}}{\epsilon} \quad (3.44)$$

unde ρ_{tot} [C/m³] este densitatea electrică de încărcare totală, V [V] - potențialul electric, ϵ [F/m] - permitivitatea mediului.

Vectorul câmpului electric este determinat de potențialul electric:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3.45)$$

Pentru a putea fi determinată distribuția câmpului electric trebuie cunoscută distribuția ionilor din gaz care este complexă. Atât distribuția câmpului electric cât și densitatea de încărcare vor determina procesul de încărcare și de transport al particulelor spre suprafețele colectoare.

3.3. Încărcarea electrostatică, migrația și colectarea particulelor

Încărcarea electrostatică a particulelor se desfășoară în două procese distincte. Primul proces este determinat de câmpul electric prin crearea fluxului de ioni. Al doilea proces, cunoscut ca încărcarea electrică prin difuzie se referă la atașarea ionilor asupra particulelor de praf prin intermediul mișcării termice aleatorii a componentelor gazului.

Se consideră o particulă sferică suspendată în gaz, în care există ioni generați de descărcarea Corona [73]. Pentru că particula de praf are caracteristicile unui dielectric (datorită rezistenței de suprafață și de volum de valori foarte mari), liniile de câmp trec pe lângă și prin particula de praf deviate. Pentru că o parte din liniile de câmp vor trece prin particula de praf, va trece și un flux de ioni spre suprafețele particulelor. Se consideră că pe liniile de câmp se deplasează ionii. Această descriere este valabilă atâta timp cât diametrul particulei este mult mai mare decât diametrul ionilor. Drumul liber parcurs de ioni este dat de relația:

$$\lambda_i = \frac{k \cdot T}{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot r_{ion}^2 \cdot p} \quad (3.46)$$

unde $k=1,38054 \cdot 10^{-23}$ [J/K] este constanta lui Boltzmann, r_{ion} [m] - raza ionului, p [N/m²] - presiunea fluidului. Raza unui ion se aproximează cu valoarea de $2 \cdot 10^{-10}$ [m], iar $\lambda_i \approx 0,1 \mu\text{m}$.

Lovirea ionilor de suprafața particulelor poate determina aderarea la suprafața acestora fără a avea loc transfer de sarcină electrică sau ionii pot fi neutralizați prin transferul sarcinii la particulele de praf. Oricum, fluxul de ioni transferă sarcina electrică asupra particulelor. Particulele dezvoltă propriul câmp prin atașarea ionilor care au sarcină electrică. Câmpul electric al particulelor distorsionează câmpul electric creat de electroni care produce fluxul de ioni, iar componenta normală pe suprafața particulei de praf devine nulă și nici un ion nu se mai atașează la suprafața particulei de praf. Astfel, particula de praf se încarcă electric până la o valoare limită.

Pentru o particulă sferică de rază r_p și dielectric constant ϵ_r rata de încărcare cu sarcină electrică se calculează cu:

$$\frac{dq_p}{dt} = \frac{\rho_i \cdot k_i \cdot q_{sat}}{4 \cdot \epsilon_0} \cdot \left(1 - \frac{q_p}{q_{sat}}\right)^2 \cdot q_p < q_{sat} \quad (3.47)$$

$$\frac{dq_p}{dt} = 0, q_p \geq q_{sat}$$

unde:

$$q_{sat} = \frac{12 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E \cdot r_p^2}{\epsilon_r + 2} \quad (3.48)$$

În aceste relații ρ_i [C/m³] este densitatea de încărcare a ionilor, k_i - mobilitatea ionilor, q_{sat} [C] este sarcina electrică la saturație, q_p [C] - sarcina electrică a particulei de praf, ϵ_0 [F/m] este permitivitatea electrică a vidului, $\epsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9}$ [F/m], iar ϵ_r [-] este permitivitatea relativă a mediului.

S-au făcut următoarele simplificări:

- particulele de praf sunt sferice;
- spațiul între particule este mult mai mare decât diametrul particulelor;
- concentrația de ioni și câmpul electric este invariant în vecinătatea particulelor.

Încărcarea electrică la saturație este încărcarea limită obținută de particulă prin încărcarea câmpului electric și este în funcție de intensitatea locală a câmpului electric E [V/m] și particula de rază r_p [m]. În general, încărcarea electrică este obținută prin integrarea relației (3.47) în funcție de timp:

$$q_p(t) = q_{sat} \cdot \frac{t}{t + \tau_{camp}} \quad (3.49)$$

$$\tau_{camp} = \frac{4 \cdot \epsilon_0}{\rho_i \cdot k_i} \quad (3.50)$$

unde τ_{camp} [s] este constanta de timp a încărcării și reprezintă timpul necesar pentru a ajunge la 50% din încărcarea la saturație. Ordinul de mărime este de câteva sutimi de secunde pentru particule de dimensiuni medii ($r_p \sim 1 \mu\text{m}$), iar din punct de vedere practic aceste particule pot fi considerate că se încarcă instantaneu la saturație [75,137]. Încărcarea la saturație a particulelor este direct proporțională cu intensitatea (locală) a câmpului electric E și cu pătratul razei particulei r_p

conform relației (3.48). Pentru $t \rightarrow \infty$, $q_p \rightarrow q_{sat}$. Pentru medii perfect conductoare $\epsilon_r \rightarrow \infty$, iar pentru vid $\epsilon_r \rightarrow 1$. Deci se poate scrie că:

$$q_{satvid} \approx \frac{q_{satconductor}}{3} \quad (3.51)$$

Încărcarea prin difuzie este similară cu încărcarea câmpului, rata încărcării crescând odată cu suprafața particulelor. Făcând presupunerea că densitatea ionilor este mult mai mică decât densitatea moleculelor de gaz, încărcarea prin difuzie depinde în principal de energia termică a ionilor în timpul de expunere.

Încărcarea prin difuzie a fost determinată cu ajutorul relației:

$$\frac{dq_p}{dt} = \pi \cdot r_p^2 \cdot v_{med} \cdot \rho_i \cdot e \cdot \frac{q_p \cdot e}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_p \cdot k \cdot T} \quad (3.52)$$

unde v_{med} [m/s] este viteza medie a ionilor, ρ_i [C/m³] este densitatea de încărcare a ionilor, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ [C] este încărcarea electrică a unui electron, k - constanta lui Boltzmann, iar T [K] - temperatura mediului.

Viteza medie a unui ion este dată de:

$$v_{med} = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_{ion}}} \quad (3.53)$$

în care m_{ion} [kg] este masa ionului.

Prin integrarea relației (3.52) pentru o densitate a încărcării constante ($\rho_i = ct$) se obține:

$$q(t) = q^* \cdot \ln \left(1 + \frac{t}{\tau_{diff}} \right) \quad (3.54)$$

unde q^* [C] este o sarcină constantă, iar τ_{diff} [s] este o constantă de timp la încărcare:

$$q^* = \frac{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_p \cdot k \cdot T}{e} \quad (3.55)$$

$$\tau_{diff} = \frac{4 \cdot \epsilon_0 \cdot k \cdot T}{r_p \cdot v_{med} \cdot \rho_i \cdot e} \quad (3.56)$$

Ecuția (3.52) nu are limită la $t \rightarrow \infty$. Rata de încărcare scade exponențial cu încărcarea particulei. Încărcarea depinde de raza particulei r_p și temperatura mediului T , fiind independentă de intensitatea E a câmpului electric exterior.

Modelul de încărcare a lui Cochet [93,121,122] este prezentat în cele ce urmează.

După un timp infinit se consideră că sarcina particulei la saturație este dată de:

$$Q_p^\infty = \left[\left(1 + \frac{2 \cdot \lambda_i}{d_p} \right)^2 + \frac{2}{1 + \frac{2 \cdot \lambda_i}{d_p}} \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right] \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad (3.57)$$

unde λ_i [m] este drumul liber al moleculelor, d_p [m] este diametrul particulelor, ϵ_r [-] este permitivitatea relativă a moleculelor, ϵ_0 [F/m] - este permitivitatea absolută a vidului, iar E [V/m] - intensitatea câmpului electric. Cu ajutorul programului MatLab 5.3 s-au trasat grafice ale sarcinii particulelor la saturație în funcție de diferiți parametri (d_p [μm], E [V/m], j [A/m²], ϵ_r [-], t [s]).

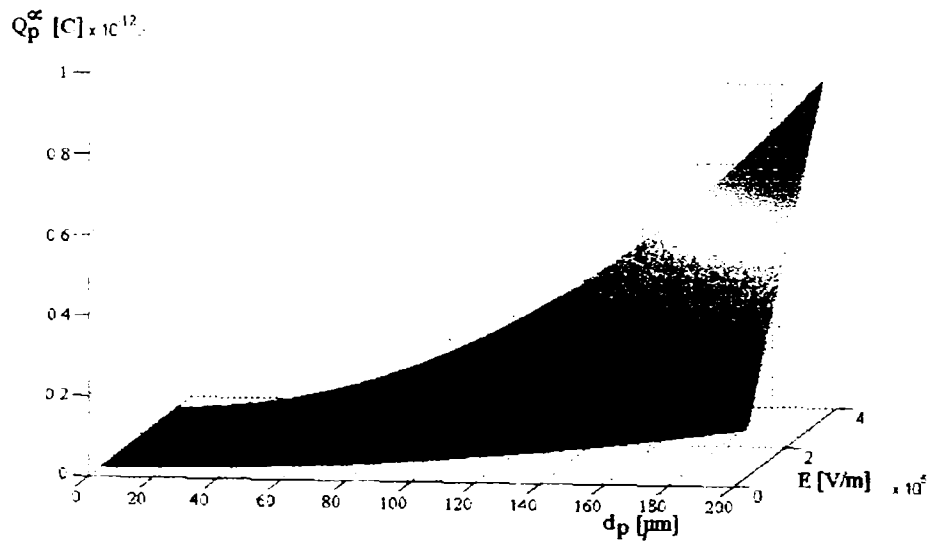


Fig.3.7. Sarcina la saturație a particulelor în funcție de diametrul particulelor de praf și de intensitatea câmpului electric, când $\epsilon_r=5$

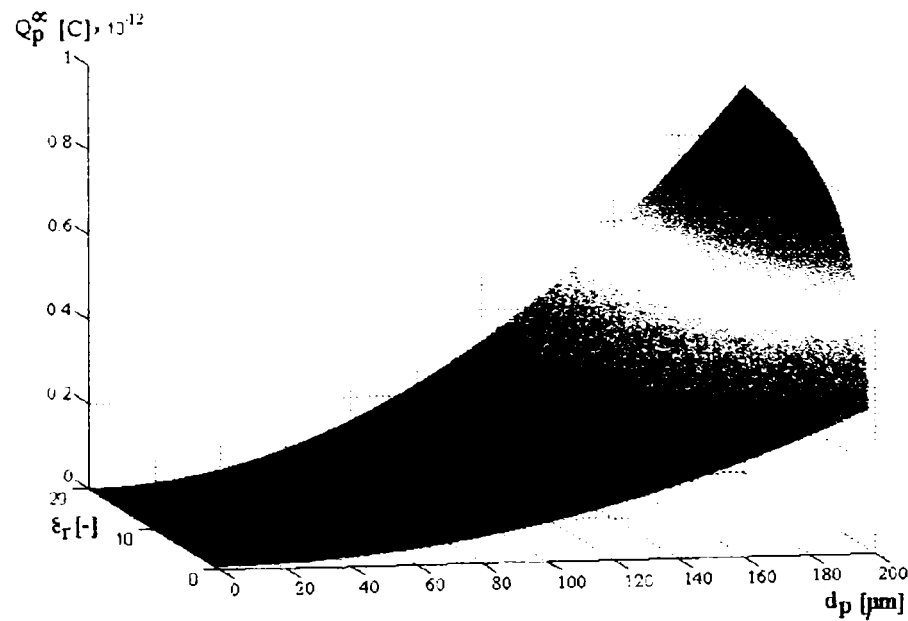


Fig.3.8. Sarcina la saturație a particulelor în funcție de diametrul particulelor de praf și de permitivitatea relativă a mediului, când $E=3kV/cm$

Pentru trasarea graficelor din fig.3.7-3.19, s-au utilizat domenii în care se încadrează parametrii ($d_p[\mu m]$, $E [V/m]$, $j[A/m^2]$) determinați la electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. [154,161,162,165,166,167,168,169,172]. Domeniul în care se poate modifica permitivitatea relativă $\epsilon_r[-]$ a particulelor de praf a fost luat din literatura [74,93,145].

Încărcarea electrică a particulelor în timp este descrisă de ecuația (3.58) utilizând constanta de timp $\tau_Q [s]$ pentru procesul de încărcare. Dacă se consideră că intensitatea câmpului electric este constantă, atunci încărcarea electrică a particulelor este independentă de dimensiunile particulelor.

$$Q_p(t) = Q_p^\infty \frac{t}{t + \tau_Q} \tag{3.58}$$

$$\tau_Q \approx \frac{4 \cdot \epsilon_0 \cdot E}{j} \tag{3.59}$$

unde $Q_p(t)$ [C] este sarcina electrică la momentul t [s], iar j [A/m²] este densitatea de curent. Cu programul MatI ab s-au trasat două grafice ale modificării sarcinii electrice ale particulelor în timp

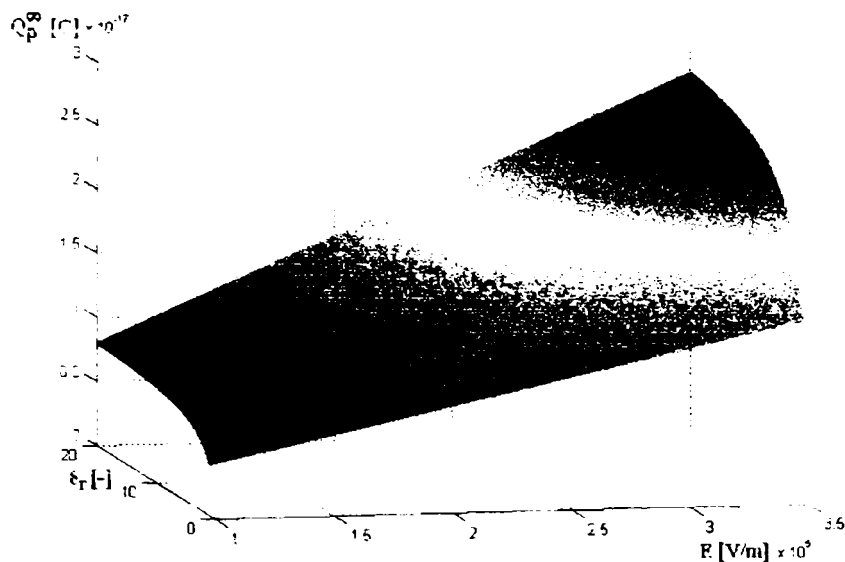


Fig.3.9. Sarcina la saturație a particulelor în funcție de permitivitatea relativă a mediului și de intensitatea câmpului electric, când $d_p = 1 \mu m$

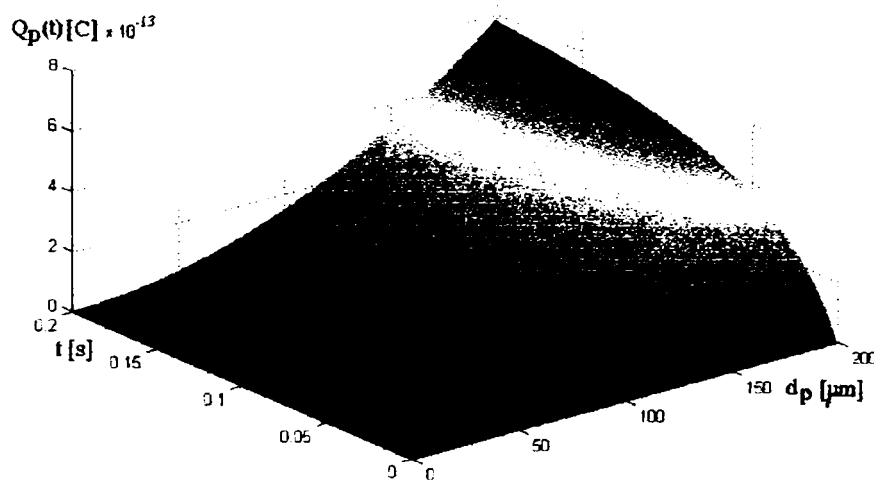


Fig.3.10. Modificarea sarcinii electrice în timp în funcție de diametrul particulelor, când $\epsilon_r = 5$, $E = 3kV/cm$ și $j = 0,00024 A \cdot m^{-2}$

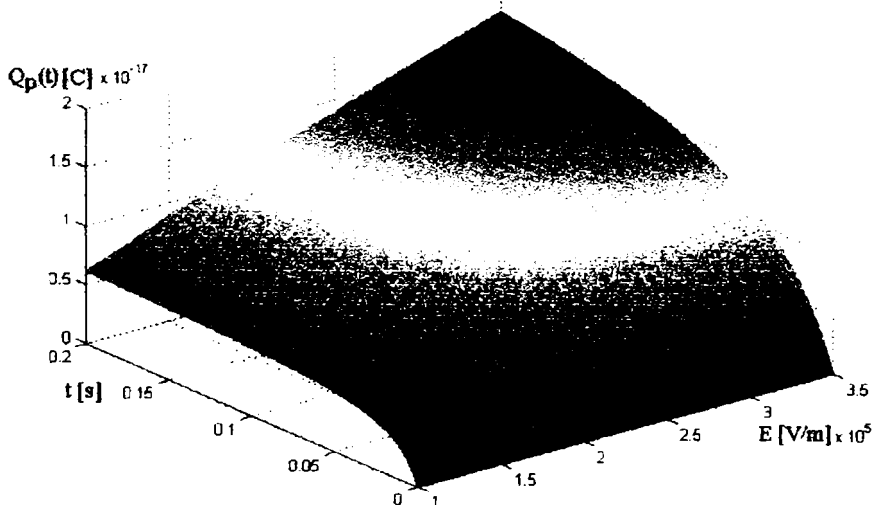


Fig.3.11. Modificarea sarcinii electrice în timp în funcție de intensitatea câmpului electric, când $d_p = 1 \mu m$, $\epsilon_r = 5$ și $j = 0,00024 A/m^2$

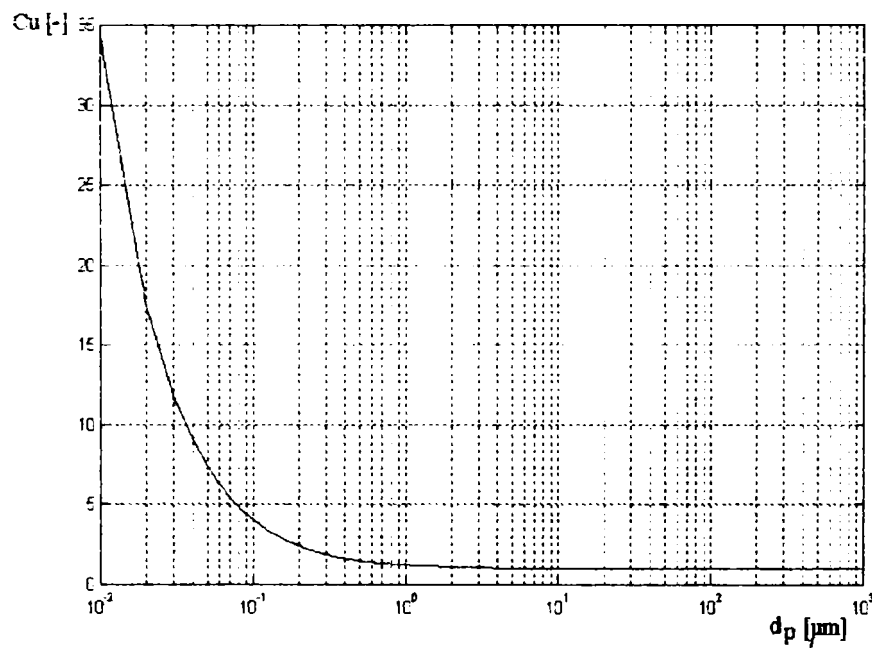
Asupra unei particule de praf aflată în câmpul electric al electrofiltrului acționează un sistem de forțe electrice și mecanice [88,93,134,137,145]. Cele mai importante forțe sunt:

Forța lui Coulomb F_{el} [N] este determinată de interacțiunea sarcinii particulei și câmpul electric local:

$$\overline{F_{el}} = Q_p \cdot \overline{E} \quad (3.60)$$

Forța inerțială F_m , datorată mișcării accelerate cu accelerația a [m/s²] a particulei de masă m [kg] prin câmpul electric este:

$$\overline{F_m} = -m \cdot \overline{a} \quad (3.61)$$



Forța determinată de frecarea vâscoasă F_w între particula de praf și mediul (rezistența aerodinamică), care se deduce din ecuația lui Stokes la care se face o ajustare cu ajutorul coeficientului de corecție Cunningham, se determină cu:

$$\overline{F_w} = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot w \cdot \frac{1}{Cu} \quad (3.62)$$

Coeficientul de corecție Cunningham este în funcție de diametrul particulei de praf (fig.3.12).

Fig.3.12. Modificarea coeficientului de corecție Cunningham cu diametrul particulelor de praf

În (3.62), μ [kg/(m·s)] este vâscozitatea dinamică a gazului, iar w [m/s] - viteza de migrație a particulei.

$$Cu = 1 + 1.246 \cdot \frac{2 \cdot \lambda}{d_p} + 0.42 \cdot \frac{2 \cdot \lambda}{d_p} \cdot e^{-0.87 \cdot \frac{d_p}{2 \cdot \lambda}} \quad (3.63)$$

Suma forțelor trebuie să fie zero:

$$\overline{F_{el}} + \overline{F_m} + \overline{F_w} = 0 \quad (3.64)$$

Din (3.60), (3.61), (3.62) și (3.64) rezultă ecuația mișcării unei particule de praf sferice, încărcată la saturație, într-un câmp electric E :

$$\frac{dw}{dt} + \frac{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p}{m \cdot Cu} \cdot w = \frac{Q_p^\infty}{m} \cdot E \quad (3.65)$$

Considerând condițiile inițiale $w|_{t=0}=0$, soluția ecuației (3.65) este următoarea:

$$w(t) = w_t \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) \quad (3.66)$$

unde w_t [m/s] este viteza de migrație teoretică:

$$w_t = \frac{Q_p^\infty \cdot E}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p} \cdot Cu \tag{3.67}$$

iar τ_p [s] este un timp de relaxare caracterizat de regimul dinamic al particulei:

$$\tau_p = \frac{m \cdot Cu}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p} \tag{3.68}$$

Ecuția (3.66) descrie dependența vitezei de migrație a particulei de praf în funcție de timp. Constanta de timp τ_p are valorile: $8,3 \cdot 10^{-7}$ [s] pentru particule de praf cu $d_p = 1[\mu m]$; $6,7 \cdot 10^{-3}$ [s] pentru particule de praf cu $d_p = 100[\mu m]$; $0,67$ [s] pentru particule de praf cu $d_p = 1000[\mu m]$. Aceste constante de timp s-au utilizat la trasarea graficelor din fig.3.16-3.19.

Utilizând parametri reali ($d_p[\mu m]$, E [V/m], ρ_{praf} [kg/m³]) de la electrofiltrele S.C. Electrocentrale Deva S.A. [154,161,162,165,166,167,168,169,172] și parametri luați din literatură ($\epsilon_r[-]$, μ [kg/(m·s)]) [73,93,145], s-a utilizat programul MatLab 5.3 pentru trasarea graficelor vitezei teoretice, a constantei de timp și a vitezei teoretice de migrației în funcție de diferiți parametri care influențează funcționarea electrofiltrelor.

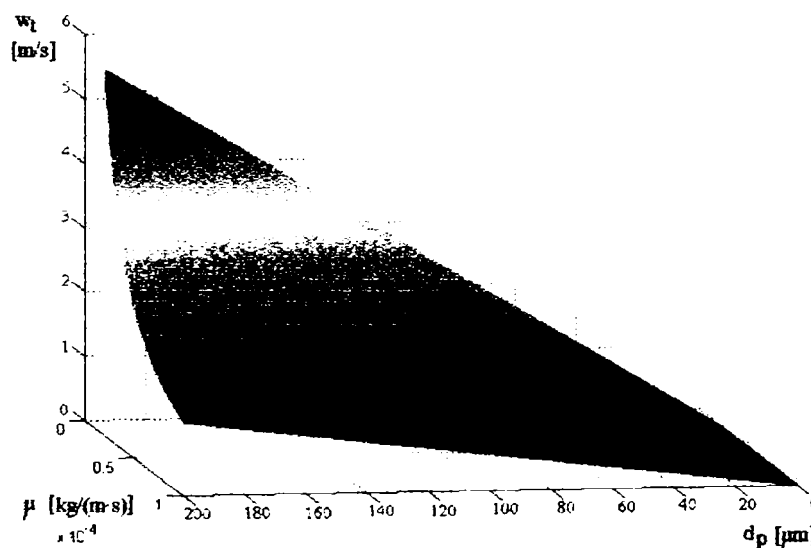


Fig.3.13. Modificarea vitezei teoretice a particulei de praf în funcție de vâscozitatea dinamică și de diametrul particulelor de praf ($d_p \in [0, 1-200] \mu m$), când $E = 3kV/cm$ și $\epsilon_r = 5$

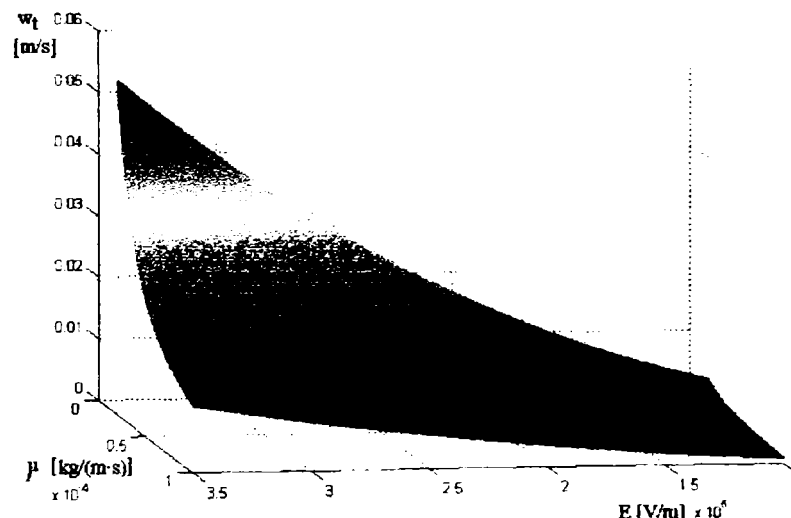


Fig.3.14. Modificarea vitezei teoretice a particulei de praf în funcție de vâscozitatea dinamică și de intensitatea câmpului electric, când $d_p = 1 \mu m$ și $\epsilon_r = 5$

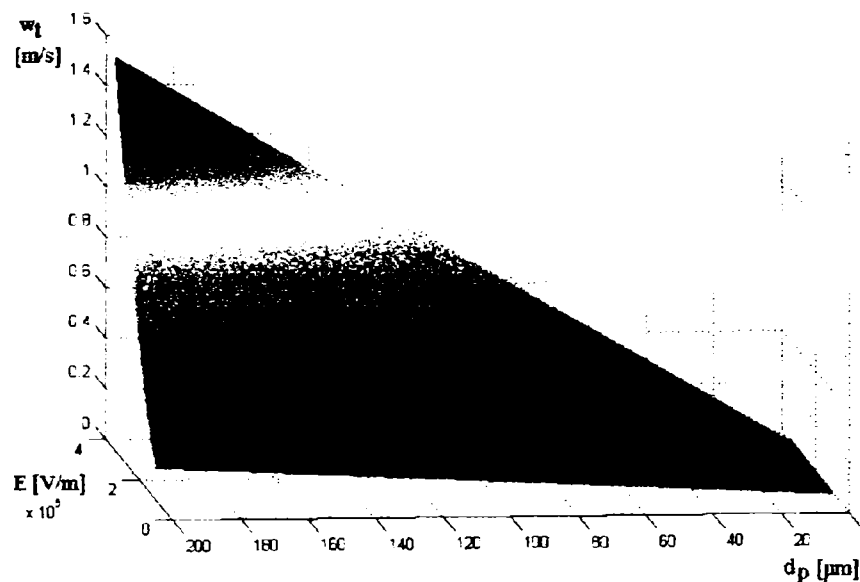


Fig.3.15. Modificarea vitezei teoretice a particulei de praf în funcție de intensitatea câmpului electric și de diametrul particulei, când $\mu=0,0001 \text{ kg (m}\cdot\text{s)}$ și $\varepsilon_r=5$

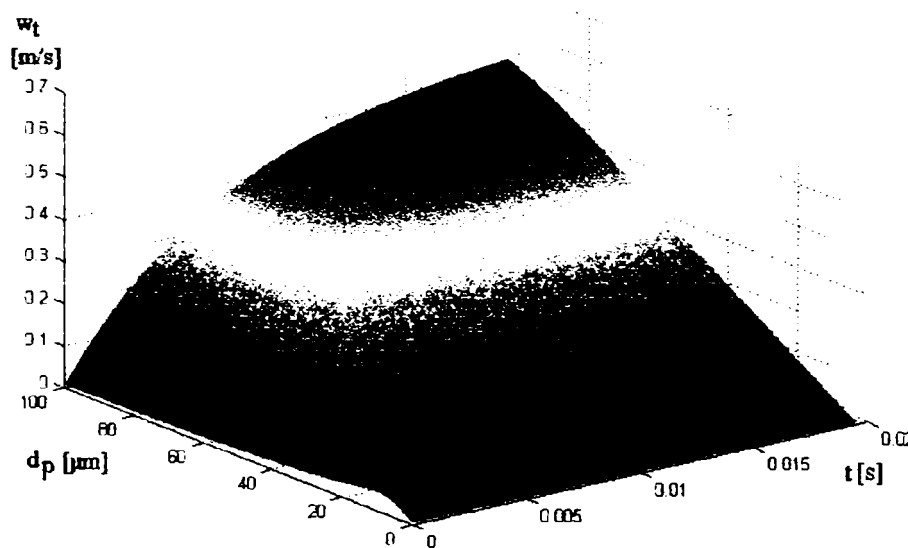


Fig.3.16. Modificarea vitezei de migrație în timp în funcție de diametrul particulelor de praf ($d_p \in [0, 1-100] \mu\text{m}$), când $E=3 \text{ kV/cm}$, $\mu=0,0001 \text{ kg (m}\cdot\text{s)}$ și $\rho_{\text{praf}}=1200 \text{ kg/m}^3$

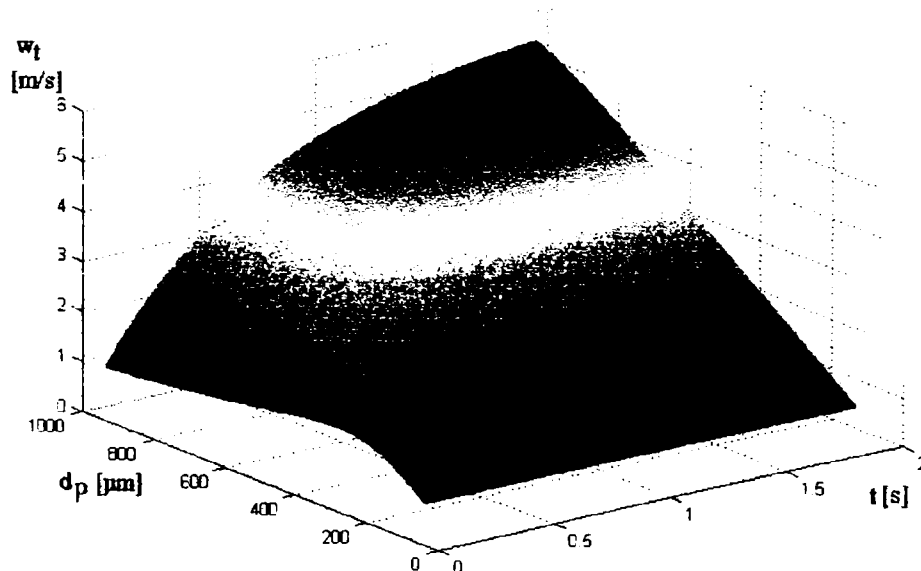


Fig.3.17. Modificarea vitezei de migrație în timp în funcție de diametrul particulelor de praf ($d_p \in [100-1000] \mu\text{m}$), când $E=3 \text{ kV/cm}$, $\mu=0,0001 \text{ kg (m}\cdot\text{s)}$ și $\rho_{\text{praf}}=1200 \text{ kg/m}^3$

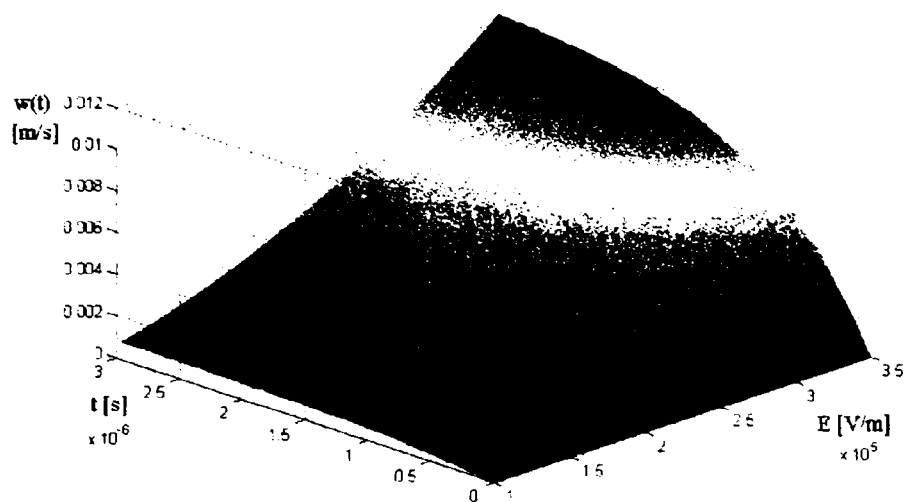


Fig.3.18. Modificarea vitezei de migrație în timp în funcție de intensitatea câmpului electric, când $d_p = 1 \mu\text{m}$, $\mu = 0,0001 \text{ kg (m-s)}$ și $\rho_{\text{praf}} = 1200 \text{ kg m}^3$

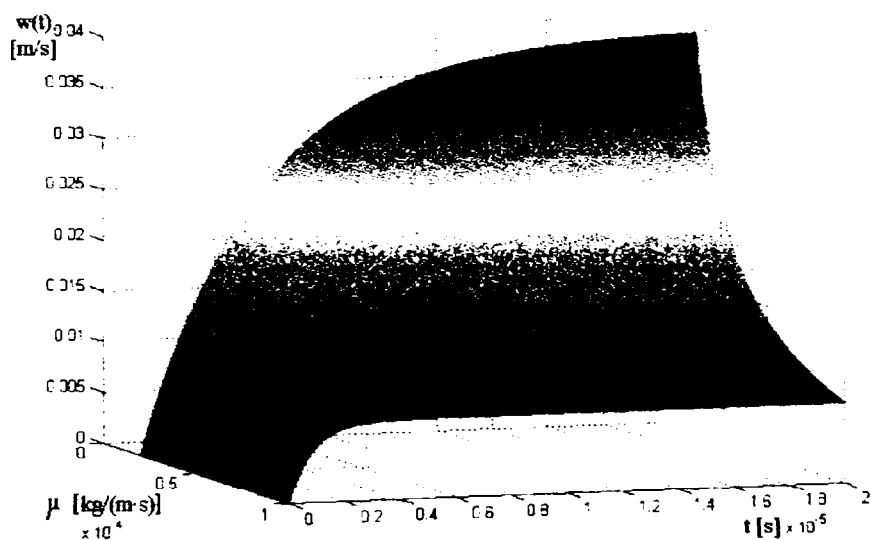


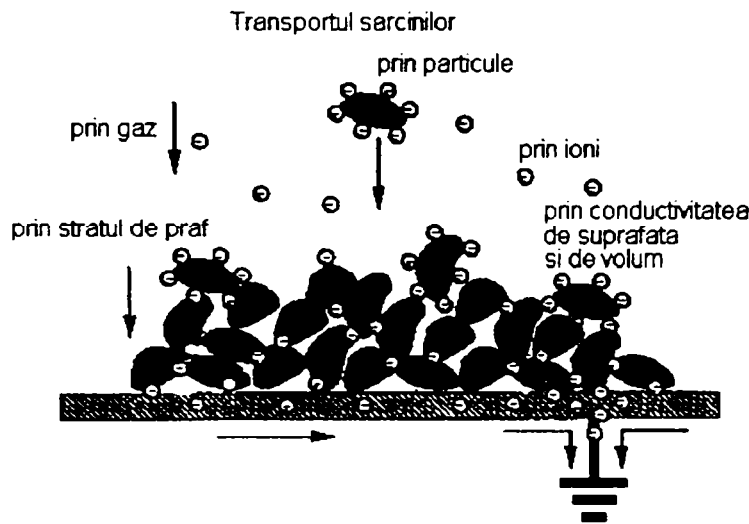
Fig.3.19. Modificarea vitezei de migrație în timp în funcție de vâscozitatea dinamică, când $d_p = 1 \mu\text{m}$, $E = 3 \text{ kV cm}$ și $\rho_{\text{praf}} = 1200 \text{ kg m}^3$

Colectarea particulelor de praf sub $10 \mu\text{m}$ constituie încă o problemă. Unele cercetări [1,52,149] au arătat că încărcarea particulelor de praf într-o zonă cu câmp electric alternativ și colectarea particulelor în altă zonă cu câmp electric continuu (încărcare bipolară a particulelor de praf), constituie o soluție pentru îmbunătățirea colectării acestor particule. Particule de praf cu diametre mai mici $10 \mu\text{m}$ apar în urma arderii cărbunelui care este măcinat fin.

În timpul zborului particulelor de praf care sunt încărcate electric, acestea ating suprafețele colectoare care sunt puse la pământ. Sarcina electrică se transferă de la particule la electrozii de depunere. Deoarece sarcina electrică există în praful din gaz, rezistivitatea prafului joacă un rol important în funcționarea electrofiltrelor (fig.3.20). Numărul de sarcini electrice create de efectul Corona este mai mare decât ar fi nevoie pentru încărcarea electrică a tuturor particulelor la saturație. Funcționarea la curenți ridicați are avantajul de încărcare mai rapidă a particulelor de praf. Pe de altă parte, curentul are o valoare critică peste care apare efectul Corona invers, care înrăutățește depunerea particulelor de praf. Din acest motiv, alimentarea cu tensiune în pulsuri

poate fi mai bun pentru prafurile de înaltă rezistivitate. În această situație consumul energetic va fi mai mic.

Când o particulă de praf ajunge pe electrodul de depunere intervine transferul sarcinii electrice (descărcare) de la particulă la suprafața colectoare. În același timp, deoarece există purtători de sarcină liberi, particula este supusă și procesului de încărcare. Din cauza încărcării și descărcării electrice a particulelor, este posibil ca particula să mai aibă o anumită sarcină și de

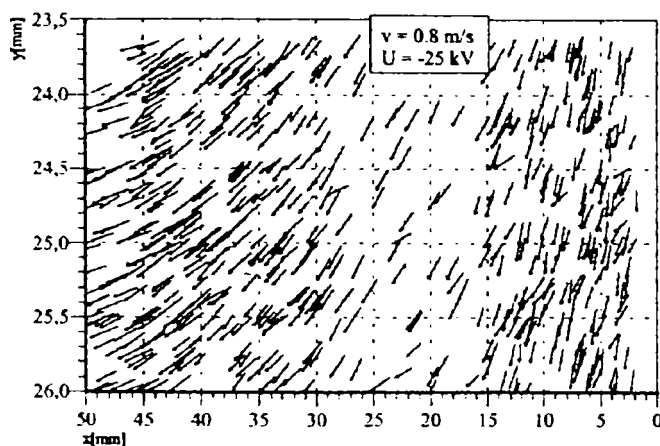


aceea nu poate fi înlăturată de pe electrod [69]. În câmpurile electrofiltrelor există un flux continuu de particule de praf spre suprafețele colectoare, unele particule de praf ... că cate cu pola tatea elect o ulu . e col ctar , alt l cu polaritat opu ă , alt... transferă sarcina la suprafețele colectoare, fiind astfel greu de determinat momentul scuturării mecanice a suprafețelor colectoare pentru a obține o eficiență de colectare maximă.

Fig.3.20. Transportul sarcinilor electrice spre electrozii de depunere

În majoritatea aplicațiilor scuturările se fac în timpul funcționării, în timpul curgerii gazelor și când electrozii de emisie sunt alimentați cu tensiune. Straturi groase de praf cad în bucăți, iar datorită curgerii gazelor este posibilă reentrenarea particulelor fine de praf. Această reentrenare depinde de nivelul turbulenței și reduce semnificativ eficiența electrofiltrelor. Dacă frecvența scuturărilor este prea ridicată atunci nu se ajunge la colectarea unor straturi de praf suficient de groase, astfel încât stratul de particule să rămână compact în timpul scuturării ajungându-se la reentrenarea particulelor de praf în gaz. Dacă frecvența scuturărilor este prea mică căderea de tensiune pe stratul de praf va fi foarte mare ceea ce determină o încărcare electrică mai slabă a particulelor de praf din gaz [81].

Studiul experimental al încărcării electrostatice a particulelor și transportul acestora prin



electrofiltrele cu plăci s-au sfârșit în [122,124,125]. În [125] s-a utilizat tehnica laserilor și a hologramelor pentru a determina mișcarea particulelor de praf într-un electrofiltru cu plăci pilot cu electrozi de emisie cu secțiunea rotundă. Cu această metodă s-au determinat dimensiunile, viteza și localizarea particulelor într-un singur plan din zona analizată (fig.3.21) pentru o viteză medie a gazului de 0,8 m/s și o tensiune negativă de 25kV.

Fig.3.21. Vectorii vitezelor particulelor de praf măsurate într-un electrofiltru cu plăci pilot cu ajutorul laserilor (în stânga electrodul de colectare, iar în dreapta electrodul de emisie) [125]

3.4. Curgerea electrohidrodinamică în electrofiltru

Curgerea electrohidrodinamică a gazelor cu particule de praf într-un electrofiltru trebuie cunoscută pentru a putea îmbunătăți performanțele electrofiltrului. Începând de la intrarea în electrofiltru curgerea gazelor este turbulentă din cauza mișcării browniene a particulelor de praf la ieșirea din cazan, iar pe de altă parte mișcarea turbulentă a particulelor este amplificată de interacțiunea dintre ioni și moleculele neutre de gaz. Particulele de praf care intră în electrofiltru sunt accelerate de către curgerea gazului și de forțele electrice (Coulomb).

Curgerea gazelor în electrofiltre este întotdeauna turbulentă deoarece acestea au cifra Reynolds $Re \geq 10^4$, iar în ramuri $Re \approx 10^5$ [92]. Turbulența apare, în general, în centrul fluxului de gaze sau la pereți, precum și la obstacolele care împiedică curgerea gazelor. În apropierea pereților, turbulențele sunt generate de frânarea vâscoasă a gazului. Schimbările bruște de direcție și de secțiune, precum și toate obstacolele constituie surse potențiale de turbulență.

Pentru un punct dintr-o secțiune dată:

$$\bar{v} = \frac{\int_0^T v dt}{T} \quad (3.69)$$

unde \bar{v} este viteza locală medie, iar v este viteza momentană în acel punct. În cazul mișcării turbulente apare fenomenul de pulsație a vitezei. Se constată că la măsurarea vitezei într-un anumit punct, viteza nu este constantă, ea modificându-se rapid în jurul unei valori medii [72]. Viteza de pulsație se determină cu ajutorul relației:

$$v' = v - \bar{v} \quad (3.70)$$

Ecuția de conservare a masei pentru un gaz, în forma generală este [72,73]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot v_i) = 0 \quad (3.71)$$

unde ρ [kg/m^3] este densitatea fluidului, x_i [m] - deplasarea particulei în coordonate carteziene, v_i [m/s] - viteza fluctuantă a gazului, iar $i=x,y$ pentru fluidele bidimensionale.

Gazul este considerat incompresibil. În acest caz, derivatele densității devin zero rezultând:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.72)$$

Conservarea momentului într-un fluid vâscos este determinat de [73,79]:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot v_x^2) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v_x \cdot v_y) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] + F_x \quad (3.73)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot v_x^2) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v_x \cdot v_y) = \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + F_y \quad (3.74)$$

unde p [N/m^2] este presiunea fluidului, μ [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$] - vâscozitatea dinamică a gazului, F_x, F_y [N/m^3] sunt forțe raportate la volum datorate câmpului electric. Vâscozitatea dinamică a gazului μ [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$] este în funcție de vâscozitatea moleculară μ_{mol} [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$] și de vâscozitatea turbulentă μ_{turb} [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$] a gazului:

$$\mu = \mu_{\text{mol}} + \mu_{\text{turb}} \quad (3.75)$$

Între vâscozitatea dinamică μ [kg/(m·s)] și vâscozitatea cinematică ν [m²/s] există relația:

$$\mu = \nu \cdot \rho_{\text{gaz}} \quad (3.76)$$

unde ρ_{gaz} [kg/m³] este densitatea gazului.

Ecuatiile (3.72), (3.73), (3.74) descriu o curgere a gazelor incompresibilă, newtoniană și isotermică.

Forțele volumice F_x și F_y [N/m³] exercitate de o singură particulă de praf încărcată electric cu sarcina q [C] se definesc aproximativ cu:

$$\frac{dF_x}{dV} = q \cdot E_x \quad (3.77)$$

$$\frac{dF_y}{dV} = q \cdot E_y \quad (3.78)$$

unde V [m³] - volumul de gaz care conține particule încărcate electric, iar E_x , E_y [V/m] - componentele intensității electrice pe axele x și y . S-a neglijat forța determinată de curentul Corona, care este cu câteva ordine de mărime mai mică decât forța Lorentz.

În practică, electrofiltrele se utilizează într-un domeniu larg de industrii la care praful are caracteristici specifice, mai ales din punct de vedere al distribuțiilor și a diametrelor particulelor. Această diversitate determină o dificilă și complexă modelare fizică. În tabelul 3.1 se prezintă câteva caracteristici ale prafulor filtrate de electrofiltre [73].

Tabelul 3.1.

Domeniu de valori ale proprietăților fizice ale particulelor de praf

Parametrii caracteristici	Domeniu de valori
Diametrul [μm]	0,05-1000
Densitatea materialului [kg/m ³]	200-2000
Rezistivitatea [$\Omega \cdot \text{m}$]	10^5 - 10^{13}
Concentrația de praf la intrare [g/m ³]	maxim 10
Volum praf / volum gaz	maxim 10^{-5}

3.5. Modelarea electrofiltrelor

3.5.1. Caracteristicile curent-tensiune

Caracteristicile curent-tensiune sunt importante pentru evaluarea eficienței electrofiltrelor și pentru determinarea puterii consumate. Determinarea analitică a caracteristicilor curent-tensiune se face cu ajutorul intensității câmpului electric E [V/m], a densității de volum a sarcinii ρ_s [C/m³], a densității de curent j [A/m²], a mobilității ionilor k_i [m²/(V·s)] și cu ajutorul ecuațiilor diferențiale [4,25,63,73,82,133]:

$$\nabla \bar{E} = \frac{\rho_s}{\epsilon_0} \quad (3.79)$$

$$\nabla \bar{j} = 0 \quad (3.80)$$

$$\bar{E} = -\nabla V \quad (3.81)$$

$$\bar{j} = \rho_s \cdot k_i \cdot \bar{E} \quad (3.82)$$

Curentul pe unitatea de lungime I[A/m] a conductorului de emisie este:

$$I = \int j ds \quad (3.83)$$

În literatură există modele pentru determinarea caracteristicilor teoretice curent-tensiune pentru câmpurile electrofiltrelor. Modelele matematice au la bază următoarea relație de determinare a caracteristicilor curent-tensiune [24, 69, 93].

$$I = k_i \cdot G \cdot U \cdot (U - U_0) \quad (3.84)$$

unde k_i [$m^2/(V \cdot s)$] este mobilitatea ionilor, U [V] este tensiunea între electrozi, U_0 [V] este tensiunea inițială a descărcării Corona, iar G [$s/(m \cdot \Omega)$] este un coeficient care se determină în funcție de metoda folosită. S-a utilizat în calcule $k_i = 2 \cdot 10^{-4}$ [$m^2/(V \cdot s)$] [25, 73].

Metoda 1 (Deutsch) (se neglijează distanța între electrozii de emisie).

$$G = \frac{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\left(\frac{4 \cdot s}{\pi}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot s}{\pi \cdot r_e}\right)} \quad (3.85)$$

unde s [m] este distanța între electrozii de emisie și electrozii de colectare, r_e [m] este raza echivalentă a electrozilor de emisie.

Metoda 2 (se ia în considerare distanța d [m] între electrozii de emisie).

$$G = 2 \cdot \pi^3 \cdot \frac{\epsilon_0}{d^2} \cdot A \cdot \left(1 + B \cdot \sqrt{\frac{r_0}{d}}\right) \quad (3.86)$$

Dacă $0,8 \leq s/d \leq 2,3$ $A = \frac{0,017}{\frac{s}{d} - 0,585} - 0,007$; $B = 1,75$, iar dacă $0,5 \leq s/d < 0,8$ $A = 0,515 - 0,56 \cdot \frac{h}{s}$; $B = 3,5$.

Metoda 3 (Cooperman)

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{s^2} \cdot \frac{1}{\ln \frac{Z}{r_e}} \quad (3.87)$$

unde $Z = \frac{d}{2 \cdot \pi} \cdot e^{\frac{\pi \cdot s}{d}}$

Într-un electrofiltru cu plăci, fiecare câmp se alimentează de la surse de alimentare separate. Dacă se notează cu l_{tot} [m] lungimea totală a electrozilor de emisie dintr-un câmp a electrofiltrelor cu plăci, atunci curentul dintr-un câmp se poate determina cu:

$$I_{tot} = l_{tot} \cdot k_i \cdot G \cdot U \cdot (U - U_0) \quad (3.88)$$

Tensiunea inițială a descărcării Corona U_0 pentru electrofiltrele cu plăci se poate determina teoretic cu relația [74, 93, 145]:

$$U_0 = E_0 \cdot r_e \cdot \ln \frac{m}{r_e} \quad (3.89)$$

E_0 [V/m] se determină cu (3.30). Dacă $s/d < 0,3$ atunci $m = \frac{4}{\pi} \cdot s$, dacă $0,3 \leq s/d < 1$ atunci

$$m = 0,18 \cdot d \cdot e^{2,96 \frac{s}{d}}, \text{ dacă } 1 \leq s/d \text{ atunci } m = \frac{d}{2 \cdot \pi} \cdot e^{\pi \cdot \frac{s}{d}}.$$

Pentru câmpurile electrofiltrelor 1A și 1B (fiecare cu patru câmpuri), de la S.C. Electrocentrale Deva S.A., se vor trasa graficele cu mărimile (tensiuni și curenți din electrofiltre) măsurate și calculate după cele trei metode (metoda 1, metoda 2, metoda 3) utilizând relațiile (3.88), (3.85), (3.86) și (3.87) (fig.3.22-3.29) [110].

Câmpurile electrofiltrelor 1A și 1B au următoarele caracteristici: $s=0,175m$, $d=0,14m$ ($s/d=1,25$), $r_e=0,00075m$ [24,25], $l_{tot}=8280m$.

S-au măsurat curenții în funcție de tensiune [168], pentru fiecare câmp în parte a celor două electrofiltre 1A și 1B, pentru două regimuri de sarcină tehnologică a cazanelor:

- regim de sarcină minimă tehnologică (s.min.) (putere electrică 145-150 MW), $T_{electrofiltru}=142,5\text{ }^{\circ}C$;
- regim de sarcină maximă tehnologică (s.max.) (putere electrică 175-190 MW), $T_{electrofiltru}=150\text{ }^{\circ}C$.

Caracteristicile curent-tensiune măsurate și calculate sunt trasate în fig.3.22-3.29, pentru regimul de sarcină minimă tehnologică și pentru regimul de sarcină maximă tehnologică.

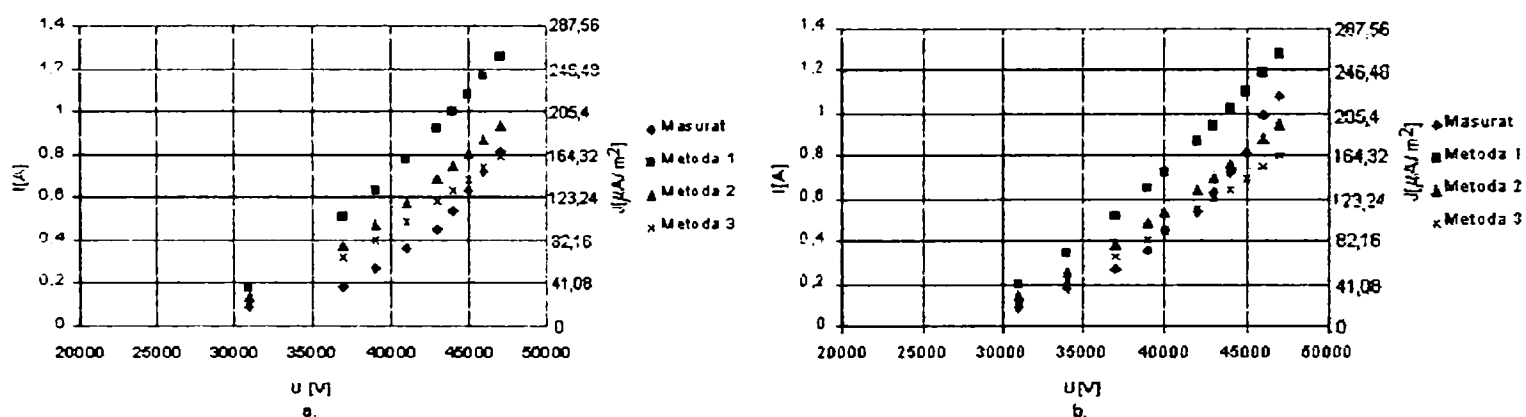


Fig.3.22. Caracteristicile curent-tensiune pentru electrofiltrul 1A, câmpul 1 la sarcină minimă tehnologică (a) și la sarcină maximă tehnologică (b)

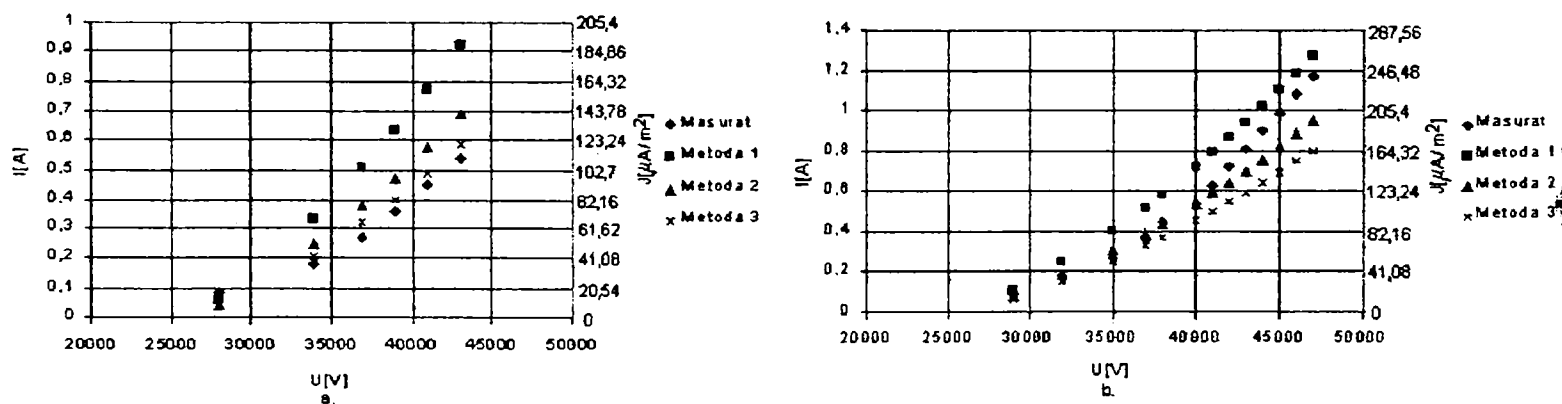


Fig.3.23. Caracteristicile curent-tensiune pentru electrofiltrul 1A, câmpul 2 la sarcină minimă tehnologică (a) și la sarcină maximă tehnologică (b)

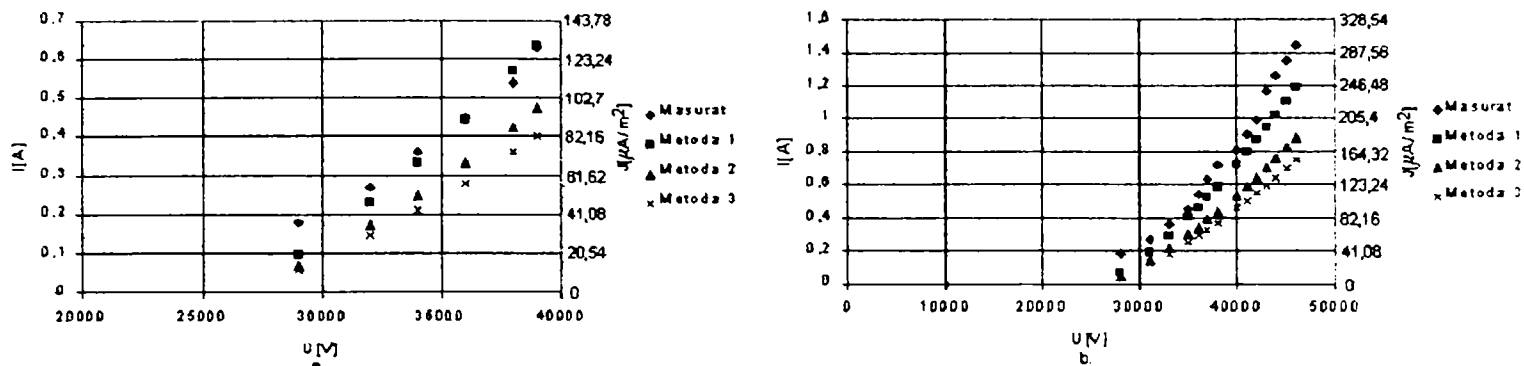


Fig.3.24. Caracteristicile curent-tensiune pentru electrofiltrul 1A, câmpul 3 la sarcină minimă tehnologică (a) și la sarcină maximă tehnologică (b)

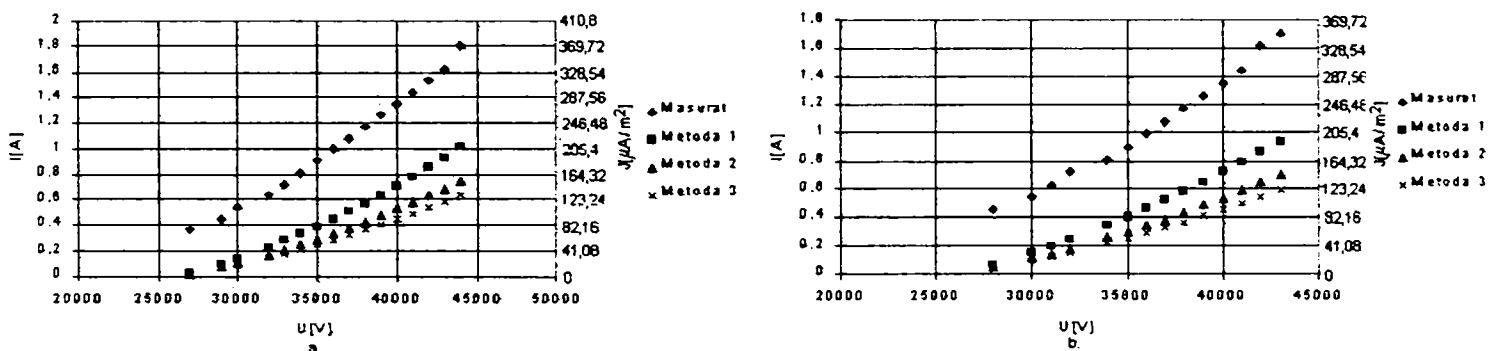


Fig.3.25. Caracteristicile curent-tensiune pentru electrofiltrul 1A, câmpul 4 la sarcină minimă tehnologică (a) și la sarcină maximă tehnologică (b)

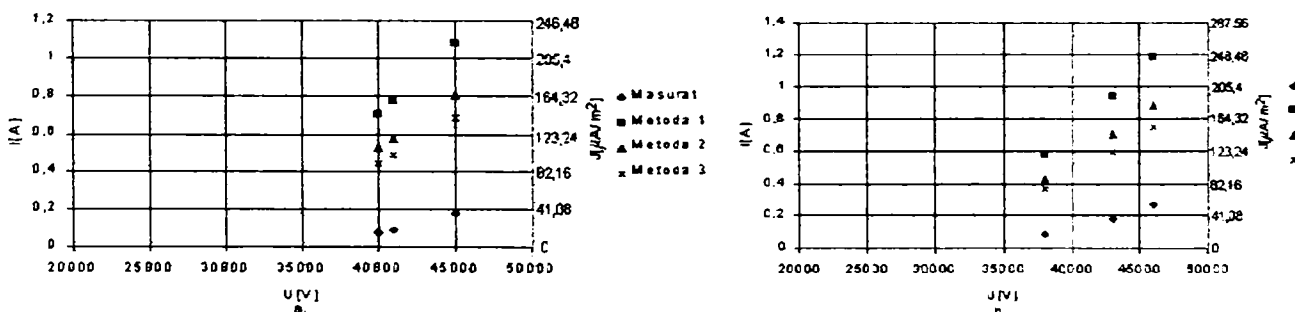


Fig.3.26. Caracteristicile curent-tensiune pentru electrofiltrul 1B, câmpul 1 la sarcină minimă tehnologică (a) și la sarcină maximă tehnologică (b)

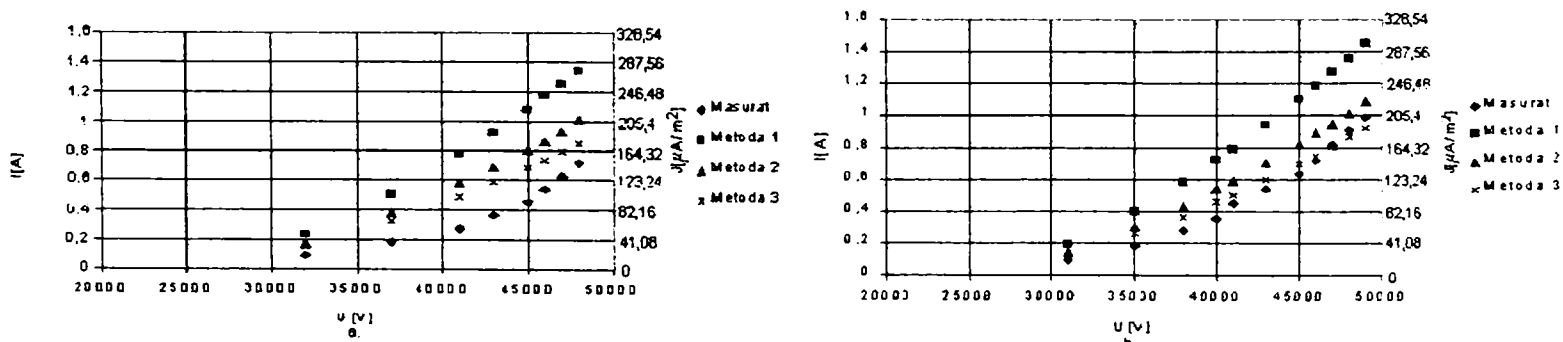


Fig.3.27. Caracteristicile curent-tensiune pentru electrofiltrul 1B, câmpul 2 la sarcină minimă tehnologică (a) și la sarcină maximă tehnologică (b)

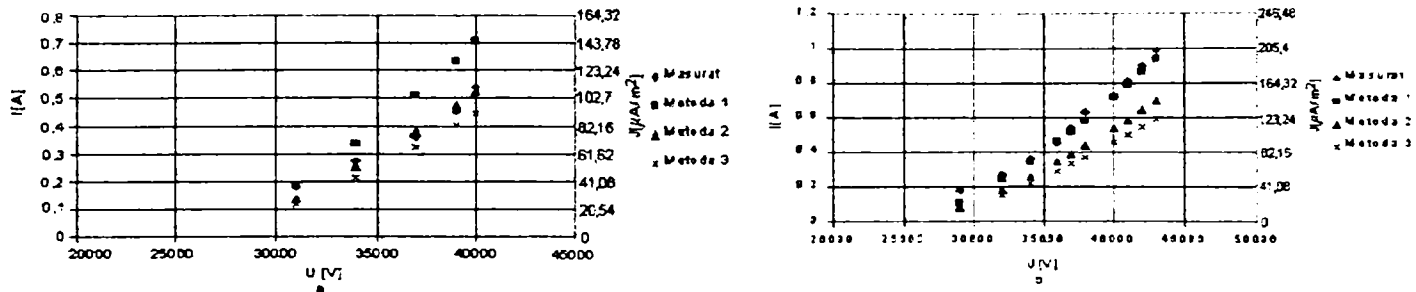


Fig.3.28. Caracteristicile curent-tensiune pentru electrofiltrul 1B, câmpul 3 la sarcină minimă tehnologică (a) și la sarcină maximă tehnologică (b)

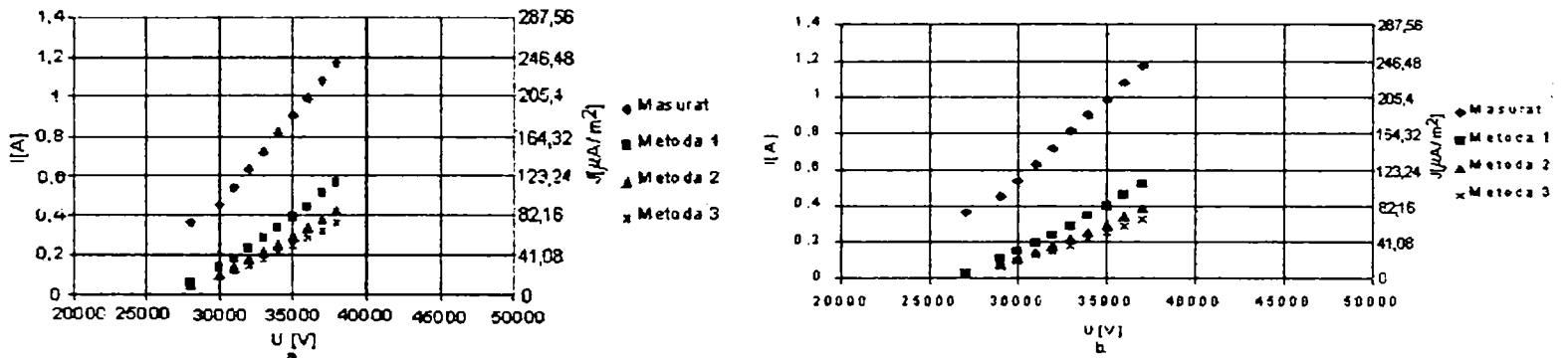


Fig.3.29. Caracteristicile curent-tensiune pentru electrofiltrul 1B, câmpul 4 la sarcină minimă tehnologică (a) și la sarcină maximă tehnologică (b)

În urma analizării rezultatelor măsurate și modelate, se constată că, pentru cele două regimuri de funcționare (minimă și maximă tehnologică), caracteristicile tensiune-curent cele mai bine modelate sunt pentru câmpurile 1,2,3 de la electrofiltrul 1A și pentru câmpul 3 de la electrofiltrul 1B, fără să se poată specifica care metodă de modelare este mai bună. Modelarea caracteristicilor curent-tensiune, la sarcină minimă și la sarcină maximă tehnologică, evidențiază rezultate apropiate.

3.5.2. Modelarea electrofiltrelor

Metodele numerice se utilizează în domeniul electrofiltrelor pentru modelarea caracteristicilor curent-tensiune, a intensității câmpului electric în spațiu și a curgerii electrohidrodinamice a gazelor prin electrofiltru.

La modelarea fenomenelor electrice din electrofiltre se utilizează relațiile (3.79)-(3.83). Dacă se ține cont și de viteza gazului, relația (3.82) devine [78]:

$$j = \rho_s \cdot (-\rho_s \cdot \nabla V + v) \tag{3.90}$$

Cu metoda elementului finit o ecuație cu matrice S de $n \times n$ elemente se rezolvă prin iterații succesive:

$$S \cdot I_{ij} + \rho_{ij} = 0 \tag{3.91}$$

unde i, j sunt numerele de ordine al elementelor de pe linia și coloane, V_{ij} [V] - este potențialul în fiecare nod, iar ρ_{sij} [C/m^3] este densitatea de încărcare pentru

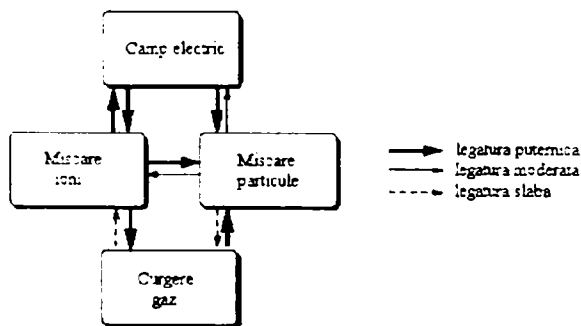


Fig.3.30. Legătura între principalii parametrii introduși în modelare

fiecare nod. Intensitatea câmpului electric este necesară pentru a efectua calculul curentului și este valabilă în orice punct al rețelei.

În fig.3.30 se prezintă legătura între principalii parametrii introduși în modelare [78].

Condițiile limită care se impun pentru inițierea calculului corespund cu cele reale:

- electrodul de emisie $V=V_{\text{conductor}}$ [V] și $\rho_s=\rho_{\text{conductor}}$ [C/m³];

- electrodul de depunere $V=0$ și $\delta\rho/\delta n=0$.

Pentru calculul intensității câmpului electric se utilizează formulele (3.30), (3.31).

Pentru o rețea formată din triunghiuri, potențialul V se aproximează cu o funcție liniară [4]:

$$V = V_e \cdot w_e = V_p \cdot w_p + V_s \cdot w_s + V_t \cdot w_t \quad (3.92)$$

unde p, s, t-reprezintă nodurile elementului e iar w - funcții.

Se utilizează, de obicei, următoarea funcție pentru rezolvare:

$$R_e = - \int_A [W] \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \frac{\rho}{\epsilon_0} \right] dA \quad (3.93)$$

După generarea rețelei, primul pas este determinarea în fiecare punct a densității de sarcină spațială. Pentru a calcula intensitatea câmpului electric, după ce se cunosc valorile densității de sarcină în orice punct, se minimizează funcționala (3.93) cu respectarea potențialului în fiecare punct.

Influențele numărului de noduri, formele elementelor rețelei, și a câmpului electric cu sarcină și fără sarcină electrică au fost realizate în [3,4,20,74,75,78], rezultatele obținute fiind comparabile cu cele măsurate.

Calcularea caracteristicilor curent-tensiune cu metoda elementului finit s-a efectuat și în cazul alimentării prin pulsuri de tensiune [12,67,77] în funcție de frecvența de repetare a pulsurilor, de lățimea pulsurilor și de încărcarea electrostatică a particulelor.

Modelarea curgerii electrohidrodinamice a gazelor din electrofiltre a fost realizată detaliat în [73,121,123] pentru diferite viteze ale gazelor și în funcție de diferite tensiuni de alimentare a electrozilor.

În general, rezultatele obținute au fost apropiate cu cele măsurate în practică, mai ales în cazul calculului caracteristicilor curent-tensiune, a intensității câmpului electric și a potențialului electric.

Un model al unui electrofiltru trebuie să conțină variabilele de intrare, parametrii constructivi și variabilele de ieșire. Toate acestea trebuie corelate în ecuații care să interpreteze cât mai bine fenomenele din electrofiltre. Ecuațiile sunt foarte greu de definit, deoarece identificarea variabilelor de intrare a constituit întotdeauna o problemă. O soluție o constituie metodele numerice utilizate la determinarea performanțelor electrofiltrelor deoarece se pot lua în considerare o multitudine de variabile de intrare și de parametri constructivi. Se pot identifica astfel, care dintre intrări au influență mai mare asupra performanțelor electrofiltrelor. Cele mai multe variabile de intrare sunt multidimensionale având o distribuție în timp și spațiu, astfel complexitatea modelelor este foarte mare. Cu o anumită aproximație uneori se poate neglija distribuția în timp și/sau spațiu ajungându-se la modele mai simplificate.

Cele mai uzuale modele, care sunt și mai puțin performante, au la bază derivate ale ecuației lui Deutsch, care a fost determinată folosind multe ipoteze simplificatoare.

A. Un prim model mai performant a fost utilizat începând cu anii 1970 la Southern Research Institute, U.S.A [93]. Modelul are la bază descompunerea electrofiltrului în lungimi infinitezimale l și subdivizarea particulelor de praf în clase de un anumit ordin. Ecuația lui Deutsch, în acest caz, devine:

$$\eta_{i,j} = 1 - e^{-w_{i,j} \cdot \alpha_i} \quad (3.94)$$

unde $w_{i,j}$ [m/s]- este viteza de migrație a particulelor de clasă j și din zona de electrofiltru i, iar α_i [m²/m³/s] este suprafața de colectare specifică din zona i. Se măsoară astfel, eficiența de colectare pentru fiecare zonă a electrofiltrului și pentru fiecare clasă de particule. Eficiența de colectare totală este:

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i \cdot P_i \quad (3.95)$$

$$P_i = \frac{m_i}{m} \quad (3.96)$$

unde η_i [-] este eficiența de colectare pentru particulele de praf de clasă i, m_i [kg] - masa particulelor colectate de clasă i, iar m [kg] - masa totală a particulelor de praf colectate. În acest model s-a ținut cont de reentrenarea particulelor de praf din timpul scuturării, iar curgerea fluidului a fost ajustată prin coeficienți de corecție. Performanțele unei astfel de modelări este influențată de numărul zonelor în care este împărțit electrofiltrul.

B. Un alt model important a fost realizat de L.Canadas, B. Navarrete, L. Salvador în 1993 [93]. Este un model pentru electrofiltre cu plăci, iar programul construit pe baza lui poartă denumirea de PRELEC. Utilizează un model Deutsch complex, care evită introducerea de coeficienți empirici. PRELEC calculează câmpul electric pe baza tensiunii aplicate, incluzând densitatea de încărcare spațială a particulelor de praf. Este capabil să simuleze două forme de alimentare cu tensiune: tensiune continuă și în pulsuri. Se analizează chiar și fenomenele electrice din timpul scuturării. Modelul s-a dovedit util, în urma unor măsurători efectuate pe electrofiltre reale în Spania. Mărimile de intrare sunt: distribuția particulelor de praf, rezistivitatea și debitul de gaze. În acest model s-a ținut cont de: tensiunea aplicată, de tensiunea de ionizare, de raza electrozilor de emisie, de densitatea de încărcare spațială, de încărcarea relativă a particulelor pe clase de dimensiuni, de vitezele de migrație pentru fiecare clasă de particule, de grosimea stratului de praf depus pe electrozii de colectare, de rezistivitatea stratului de praf depus și de căderea de tensiune pe stratul de praf respectiv.

C. Un program care conține un model asemănător este ESPVI4.0.a care este aprobat de U.S. Environmental Protection Agency [96,157]. În plus la acest model se poate studia alimentarea intermitentă, în schimb nu se poate folosi alimentarea prin pulsuri de tensiune.

D. Ultimul model performant este cel construit de B.Bellagamba și colectiv [93]. Modelul determina cu înaltă finețe caracteristicile curent/tensiune, când prin electrofiltru trec gaze cu particule de diferite concentrații. Alimentarea se poate face atât în curent continuu cât și în pulsuri de tensiune. S-a putut determina chiar și efectul Corona invers ca funcție dintre tensiunea aplicată și rezistența stratului de praf. Mărimile de intrare ale modelului sunt grupate sub formă de blocuri de date care conțin: parametrii geometrici; compoziția gazului; distribuția vitezelor; distribuția particulelor de praf; tensiuni de alimentare.

3.6. Elemente privind dimensionarea electrofiltrelor

Fie un electrofiltru cu plăci format din două plăci paralele. Înălțimea electrofiltrului este h [m], lungimea activă – l [m], iar distanța între electrozii de depunere este $2 \cdot s$ [m]. Între electrozii de depunere (conectați la masă) se găsesc electrozii de emisie (conectați la potențialul negativ al sursei de putere) la distanța s [m]. Se consideră că particulele de praf sunt repartizate uniform în secțiunea transversală a electrofiltrului, iar vitezele longitudinală v [m/s] (determinată de curgerea gazului) și transversală w [m/s] (determinată de atracția particulelor spre electrozii de colectare) se consideră constante în lungul electrofiltrului. La intrarea în electrofiltru, concentrația de praf a particulelor este q_i [g/m³] iar la ieșire este q_f [g/m³]. Se notează cu q_z [g/m³] concentrația particulelor aflate la distanța $w \cdot dt$ de suprafețele colectoare, iar q_s [g/m³] este concentrația particulelor de praf necolectate în electrofiltru [24,88]. Concentrația de praf de-a lungul electrofiltrului scade conform relației:

$$s \cdot dq_s = q_z \cdot w \cdot dt \quad (3.97)$$

În timpul dt , particula p parcurge distanța:

$$dz = v \cdot dt \quad (3.98)$$

Din (3.97) și (3.98) rezultă:

$$dq_s = q_z \cdot \frac{l}{s} \cdot \frac{w}{v} \cdot dz \quad (3.99)$$

$$q_i = q_s + q_z \quad (3.100)$$

Se derivează relația (3.99), $q_i = \text{constant}$ și se obține:

$$dq_s = -dq_z \quad (3.101)$$

Cu (3.99) și (3.101) se poate scrie:

$$\frac{dq_z}{q_z} = -\frac{l}{s} \cdot \frac{w}{v} \cdot dz \quad (3.102)$$

Se integrează relația (3.102) și se obține:

$$\ln q_z \Big|_{q_i}^{q_f} = -\frac{l}{s} \cdot \frac{w}{v} \cdot z \Big|_0^l \quad (3.103)$$

de unde rezultă:

$$q_f = q_i \cdot e^{-\frac{l}{s} \cdot \frac{w}{v}} \quad (3.104)$$

Eficiența de colectare este:

$$\eta = \frac{q_i - q_f}{q_i} = 1 - \frac{q_f}{q_i} \quad (3.105)$$

Introducând (3.104) în (3.105) rezultă:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{l}{s} \cdot \frac{w}{v}} \quad (3.106)$$

Secțiunea transversală prin care trece gazul este:

$$S_t = 2 \cdot s \cdot h \quad (3.107)$$

Viteza gazului prin electrofiltru se determină cu:

$$v = \frac{Q}{S_t} = \frac{Q}{2 \cdot s \cdot h} \quad (3.108)$$

unde Q [m^3/s] este debitul volumic al gazului. Se face presupunerea că debitul volumic este constant. Se introduce relația (3.108) în (3.106) și se obține:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{w}{Q} \cdot S_c} \quad (3.109)$$

unde S_c [m^2] este suprafața colectoare a electrofiltrului:

$$S_c = 2 \cdot l \cdot h \quad (3.110)$$

Într-un electrofiltru există mai multe suprafețe colectoare care sunt în paralel. Relația (3.109) este valabilă și pentru un electrofiltru cu $n+1$ plăci colectoare, deoarece suprafața colectoare se mărește de n ori, iar debitul volumic tot de n ori.

Se notează cu:

$$\alpha = \frac{S_c}{Q} \quad (3.111)$$

suprafața de colectare specifică [$m^2/m^3/s$]. Relația (3.109) se poate scrie:

$$\eta = 1 - e^{-w \cdot \alpha} \quad (3.112)$$

Această ecuație a fost dedusă de Walter Deutsch în 1922 și este ecuația eficienței care conține mai multe simplificări.

Se consideră un electrofiltru cu plăci cu n câmpuri (fig.3.31). Se menționează că în practică, în funcție de aplicație numărul de câmpuri într-un electrofiltru cu plăci poate fi de maxim 10. La intrare în electrofiltru concentrația gazelor este q_i [g/m^3], la ieșirea câmpului 1 concentrația gazelor este q_1 [g/m^3], la ieșirea câmpului $n-1$ concentrația gazelor este q_{n-1} [g/m^3], iar la ieșirea electrofiltrului concentrația gazelor este q_f [g/m^3].

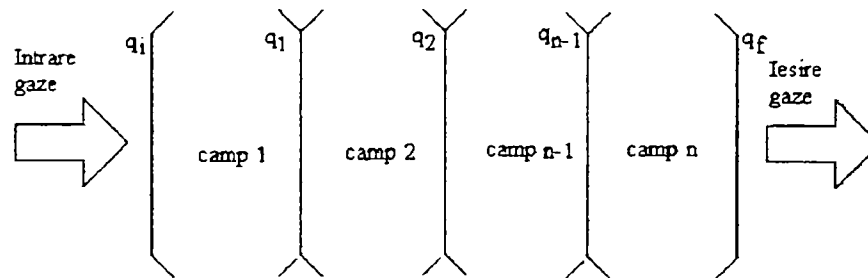


Fig.3.31. Electrofiltru cu plăci cu n câmpuri

Eficiența de colectare η_1 [-] a câmpului 1 este:

$$\eta_1 = 1 - \frac{q_1}{q_i} \quad (3.113)$$

Eficiența de colectare η_2 [-] a câmpului 2 este:

$$\eta_2 = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (3.114)$$

Eficiența de colectare η_n [-] a câmpului n este:

$$\eta_n = 1 - \frac{q_f}{q_{n-1}} \quad (3.115)$$

Eficiența totală de colectare η [-] a electrofiltrului este dată de relația (3.105). Din (3.105), (3.113), (3.114) și (3.115) rezultă:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot \dots \cdot (1 - \eta_n) \quad (3.116)$$

În regim stabilizat, viteza de migrație a particulei are valoarea dată în (3.67).

Relația (3.109) fiind simplificată, s-au determinat alte relații ale eficienței.

O primă îmbunătățire au realizat-o Matts și Öhmfeld [73]:

$$\eta = 1 - e^{-\chi \sqrt{w \cdot \alpha}} \quad (3.117)$$

unde w [m/s] este viteza de migrație modificată, iar $\chi[-]=0,1-0,6$. Această ecuație se poate utiliza numai atunci când condițiile electrice în electrofiltru sunt maximizate.

În 1967 F.L. Smidth a dedus ecuația [93]:

$$\eta = 1 - \frac{l}{\sqrt[3]{l + b \cdot w \cdot \alpha}} \quad (3.118)$$

unde $b=0,22$ (pentru cele mai multe cazuri). În această situație, viteza de migrație a particulelor se determină cu relația:

$$w = \frac{d_p \cdot E_0 \cdot E_p}{4 \cdot \pi \cdot \mu} \cdot \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \quad (3.119)$$

unde d_p [m] este diametrul mediu a particulelor de praf, E_0 [V/m] este intensitatea câmpului electric de depunere, iar E_p [V/m] – intensitatea câmpului electric de încărcare. Pentru o eficiență cât mai mare a prafului trebuie ca w să aibă valori mari, adică produsul $E_0 \cdot E_p$ să fie maxim.

Pentru particule cu rezistivitatea ridicată $\rho \geq 10^{11}$ [Ωcm] este preferabilă alimentarea în impulsuri pentru obținerea unui randament maxim, iar pentru particule cu rezistivități mici $\rho \leq 10^8$ [Ωcm] alimentarea cu tensiune apropiată de tensiunea continuă este de preferat.

Dacă se introduce (3.119) în (3.112) rezultă:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{d_p \cdot E_0 \cdot E_p}{4 \cdot \pi \cdot \mu} \cdot \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \cdot \alpha} \quad (3.120)$$

Considerând vâscozitatea gazului constantă, că particulele de praf sunt din același material ($\epsilon_r = \text{constant}$) și că E_0 și E_p sunt proporționale cu tensiunea de alimentare U , relația (3.120) devine:

$$\eta = 1 - e^{-C_{ef} \cdot d_p \cdot U^2 \cdot \alpha} \quad (3.121)$$

$$C_{ef} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \mu} \cdot C_v \cdot \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2}; C_{ef} = ct. \quad (3.122)$$

$$C_v = \frac{E_0 \cdot E_p}{U^2}; C_v = ct. \quad (3.123)$$

S-a determinat experimental că electrofiltru, chiar dacă nu este alimentat cu energie electrică constituie un obstacol mecanic pentru gazul cu praf [93, 145]. Datorită turbulenței gazelor și a construcției electrofiltrelor, particulele de praf ajung în contact cu electrozii de colectare, care au o anumită porozitate, iar o parte din particule se vor prinde de aceste suprafețe. După ce stratul de praf crește în grosime, când greutatea lui depășește valoarea forțelor de aderență, stratul de praf cade în buncăre, o parte a prafului fiind reantrenată în mișcarea gazului. Pe electrofiltre pilot, nealimentate cu tensiune, s-au determinat colectări semnificative ale prafului ($\eta_m = 0,2-0,4$). De această colectare trebuie ținut cont la calculul eficienței electrofiltrului.

$$\eta = 1 - (1 - \eta_m) \cdot e^{-C_{ef} \cdot d_p \cdot U^2 \cdot \alpha} \quad (3.124)$$

unde η_m - eficiența mecanică a electrofiltrelor.

La proiectarea electrofiltrelor trebuie ținut cont de următorii parametri: debitul de gaze; concentrația de praf la intrarea electrofiltrului; temperatura gazelor; tipul combustibilului ars; compoziția chimică a prafului; distribuția particulelor; rezistivitatea prafului; consistența prafului.

De obicei proiectantul cu experiență, are o bază de date cu privire la instalațiile folosite. Se pot determina, pentru un anumit proces, relații între viteza de migrație și rezistivitatea prafului, temperatură, conținutul de praf și distanța dintre electrozii de colectare, pentru a determina suprafața electrozilor de colectare.

În continuare, trebuie stabilite următoarele: numărul câmpurilor electrofiltrului; câte surse de alimentare sunt necesare; tipul surselor de alimentare; instalația de alimentare cu energie electrică; numărul și tipul izolatoarelor electrice de susținere a panourilor de electrozi; detalii cu privire la scuturare; piese pentru uniformizarea curgerii gazelor la intrarea în electrofiltru; construcția buncărelor de colectare a prafului; materialele necesare pentru construirea electrofiltrului.

Un factor important de care trebuie ținut cont la construcția electrofiltrului este factorul de zveltețe:

$$k_z = \frac{L}{H} \tag{3.125}$$

unde L[m] este lungimea, iar H[m] - înălțimea electrozilor de colectare. Proiectanții au valori minime ale acestui coeficient. Experimental, s-a determinat că numărul mai mare de câmpuri electrice alimentate separat, determină creșterea eficienței de colectare [2,16,50,88,93]: pentru două câmpuri $\eta < 98\%$; pentru trei câmpuri $\eta \approx 99\%$; pentru patru sau mai multe câmpuri $\eta > 99,7\%$. Electrofiltrele trebuie astfel proiectate și construite încât să coste cât mai puțin, dar cu condiția să asigure la ieșire cantități de praf care să se încadreze în normele în vigoare.

S-au utilizat date referitoare la concentrațiile de praf (de la intrare și de la ieșire) și debitul de gaze pentru electrofiltrele 1 (A și B) [165,167,168,172], 4 (A și B) [161,169], 5 (A și B) [166] și 6 (A și B) [162] de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. Aceste date se utilizează pentru a determina vitezele medii de migrație ale particulelor de praf din diferite electrofiltre în funcție de modelele date de relațiile (3.109), (3.117) și (3.118). Caracteristicile electrofiltrelor de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. sunt date în anexa 1.

Tabelul 3.2.

Suprafețele electrofiltrelor de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. cărora li se determină viteza medie de migrație

Electrofiltru	$S_{c\grave{a}mp1}[m^2]$	$S_{c\grave{a}mp2}[m^2]$	$S_{c\grave{a}mp3}[m^2]$	$S_{c\grave{a}mp4}[m^2]$	$S_{tot}[m^2]$	$S_{transversal\grave{a}}[m^2]$
1 (A sau B)	4868,5	4868,5	4868,5	4868,5	19474	193,2
4 (A sau B)	5715,2	5715,2	5715,2	-	17145,6	194,4
5 (A sau B)	5821	6467,8	5821	-	18109,8	198
6 (A sau B)	5926,9	5926,9	5926,9	-	17780,7	201,6

Tabelul 3.3.

Calculul vitezelor medii de migrație pentru electrofiltrele cu plăci de la
S.C. Electrocentrale Deva S.A.

Electrofiltru	q_i [g/m ³]	q_r [g/m ³]	η [-] (3.105)	Q [m ³ /s]	v [m/s]	w_1 [cm/s] (3.109)	w_2 [cm/s] (3.117). $\chi=0.1$	w_3 [cm/s] (3.118)
ELF 1A cazI [168]	24,27	0,059	0,9976	123.62	0,64	3,82	7,59	7,96
ELF 1B cazI [168]	22,235	0,06	0,9973	114.65	0,593	3,48	7,03	7,16
ELF 1A cazII [168]	24,61	0,056	0,9977	114.4	0,592	3,57	7,03	7,52
ELF 1B cazII [168]	20,84	0,053	0,9975	107.65	0,557	3,3	6,61	6,84
ELF 1A cazIII [168]	26,915	0,083	0,9969	119.01	0,616	3,53	7,28	7,13
ELF 1B cazIII [168]	28,795	0,085	0,997	115.2	0,596	3,45	7,05	7
ELF 1A cazIV [168]	26,915	0,08	0,997	119.01	0,616	3,56	7,28	7,21
ELF 1B cazIV [168]	28,795	0,092	0,9968	115.2	0,596	3,4	7,04	6,83
ELF 1A cazV [168]	26,915	0,061	0,9977	119.01	0,616	3,72	7,32	7,83
ELF 1B cazV [168]	28,795	0,087	0,997	115.2	0,596	3,43	7,05	6,95
ELF 1A [165]	24,27	0,059	0,9976	128.88	0,667	3,98	7,92	8,3
ELF 1B [165]	22,238	0,06	0,9973	119.77	0,62	3,64	7,34	7,48
ELF 1A cazI [172]	25,303	0,092	0,9964	108.38	0,56	3,13	6,61	6,17
ELF 1B cazI [172]	26,241	0,074	0,9972	107.92	0,558	3,25	6,61	6,65
ELF 1A cazII [172]	26,511	0,219	0,9917	108.38	0,56	2,67	6,5	4,74
ELF 1B cazII [172]	26,476	0,09	0,9966	107.92	0,558	3,15	6,6	6,28
ELF4A cazI [161]	25,528	0,138	0,9946	137.71	0,708	4,19	9,47	7,86
ELF4A cazII [161]	15,498	0,562	0,9637	137.71	0,708	2,66	9,05	3,92
ELF4A cazIII [161]	24,127	0,154	0,9936	137.71	0,708	4,06	9,44	7,45
ELF4A cazIV [161]	26,078	0,143	0,9945	137.71	0,708	4,18	9,47	7,83
ELF4A cazV [161]	24,914	0,13	0,9948	137.71	0,708	4,22	9,48	7,95
ELF4A cazVI [161]	24,726	0,141	0,9943	137.71	0,708	4,15	9,46	7,73
ELF4AcasVII [161]	22,592	0,213	0,9906	137.71	0,708	3,75	9,37	6,54
ELF 4B [161]	24,908	0,147	0,9941	130.23	0,67	3,9	8,94	7,23
ELF4A cazI [169]	43,905	0,123	0,9972	111.02	0,571	3,81	7,73	7,78
ELF4A cazII [169]	43,905	0,146	0,9967	111.02	0,571	3,69	7,7	7,38
ELF4A cazIII [169]	38,27	0,134	0,9965	111.02	0,571	3,66	7,7	7,27
ELF4A cazIV [169]	23,615	0,081	0,9966	110,2	0,567	3,65	7,64	7,26
ELF4B cazI [169]	33,545	0,163	0,9951	128.51	0,661	3,99	8,87	7,59
ELF4B cazII [169]	33,545	0,149	0,9956	128.51	0,661	4,06	8,87	7,81
ELF4B cazIII [169]	21,47	0,093	0,9957	121,14	0,623	3,84	8,37	7,42
ELF 5A [166]	20,061	0,198	0,9901	111.62	0,563	2,85	7,18	4,94
ELF 5B [166]	20,746	0,187	0,991	140,3	0,708	3,65	9,04	6,4
ELF 5B cazI [166]	32,777	0,7775	0,9763	168.72	0,852	3,49	10,63	5,41
ELF 5B cazII [166]	38,184	0,6974	0,9817	123.01	0,621	2,72	7,8	4,36
ELF 5Bcaz III [166]	33,109	0,8545	0,9742	127.62	0,644	2,56	8,02	3,96
ELF 6A [162]	26,464	0,113	0,9957	125,2	0,621	3,84	8,34	7,43
ELF 6B [162]	20,953	0,167	0,992	128.37	0,636	3,49	8,45	6,22

În tabelul 3.4 unele spații au fost necompletate pentru că nu se dețin informațiile, iar P_e [MW] este puterea electrică a unui grup care deservește două electrofiltre de același tip (de exemplu grupul energetic nr.1 are electrofiltrele 1A și 1B). Prin alimentare clasică se înțelege alimentarea automată a câmpurilor cu curent continuu până la limita de descărcare în câmpuri, pentru a obține efectul Corona maxim.

Tabelul 3.4.

Condiții de funcționare ale electrofiltrelor de la S.C. Electrocentrale Deva S.A., cărora li s-a determinat viteza medie de migrație din tabelului 3.3.

Electrofiltru	P_e [MW]	$T_{intrare}$ [°C]	$T_{ieșire}$ [°C]	Câmp 1 d_{med} [μm]	Câmp 2 d_{med} [μm]	Câmp 3 d_{med} [μm]	Câmp 4 d_{med} [μm]	Observații
ELF 1A cazI [168]	140	155	150					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 1B cazI [168]	140	155	150					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 1A cazII [168]	145	145	140					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 1B cazII [168]	145	145	140					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 1A cazIII [168]	175	155	150					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 1B cazIII [168]	175	155	150					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 1A cazIV [168]	175	155	150					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim, regim , câmpurile 1,2 și 3 alimentate continuu, câmpul 4 intermitent 1/3
ELF 1B cazIV [168]	175	155	150					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim, regim , câmpurile 1,2 și 3 alimentate continuu, câmpul 4 intermitent 1/3
ELF 1A cazV [168]	175	155	150					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim, regim , câmpurile 1,2 alimentate continuu, câmpul 3,4 intermitent 1/3
ELF 1B cazV [168]	175	155	150					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim, regim , câmpurile 1,2 alimentate continuu, câmpul 3,4 intermitent 1/3
ELF 1A [165]	145	152						Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 1B [165]	145	152						Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 1A cazI [172]	165	147	140	92,6	72,1	60,8	45,7	Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 1B cazI [172]	165	162	160					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 1A cazII [172]	165	147	140					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim, câmpul 4 nealimentat cu tensiune
ELF 1B cazII [172]	165	162	160					Alimentare intermitentă 1 3
ELF4A cazI [161]	152	140	132	79,7	45,15	50,68	-	Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF4A cazII [161]	145	140	132					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF4A cazIII [161]	150	140	132					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF4A cazIV [161]	155	140	132					Alimentare cu impulsuri de înaltă tensiune cu f=50Hz
ELF4A cazV [161]	152	140	132					Alimentare cu impulsuri de înaltă tensiune cu f=25Hz
ELF4A cazVI [161]	152	140	132					Alimentare cu impulsuri de înaltă tensiune cu f=12,5Hz
ELF4Ac cazVII [161]	150	140	132					Alimentare cu impulsuri de înaltă tensiune cu f=6,25Hz
ELF 4B [161]	154	137	135					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF4A cazI [169]	175							Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați automat
ELF4A cazII [169]	175							Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF4A cazIII [169]	175							Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați automat
ELF4A cazIV [169]	150							Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați automat
ELF4B cazI [169]	175							Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați automat
ELF4B cazII [169]	175							Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF4B cazIII [169]	150							Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați automat
ELF 5A [166]	170	147	140	73,4	45,5	50,1	-	Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 5B [166]	170	187	180					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 5B cazI [166]	170	140		85	29	-	-	Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 5B cazII [166]	170	140		79	12	-	-	Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 5B caz III [166]	170	140		90	32	-	-	Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 6A [162]	160	159	150	74,6	38,7	38,6	-	Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim
ELF 6B [162]	170	150	140					Alimentare clasică, curenții în câmpuri reglați la maxim

3.7. Concluzii

Cunoașterea fenomenelor din electrofiltre este utilă pentru proiectarea și modelarea lor. Modelarea are la bază ecuația lui Deutsch care a fost permanent îmbunătățită. Determinarea pe baze experimentale a performanțelor electrofiltrelor se face prin utilizarea unor electrofiltre de laborator sau pilot la scară.

Procesele din electrofiltre sunt deosebit de complexe și sunt datorate în principal de curgerea gazelor și de interacțiunea dintre particulele de praf încărcate electric și câmpul electric. Mecanismul de încărcare-descărcare electrică a particulelor de praf determină schimbări ale dispersiei particulelor de praf și a turbulenței gazelor din electrofiltru.

S-a determinat distanța maximă până la care se deplasează un ion (sarcina spațială) cu (3.38). Distanța maximă depinde de raza electrodului de emisie, de intensitatea câmpului electric, de mobilitatea ionului și de frecvența tensiunii de alimentare care determină câmpul electric. Cu cât frecvența este mai mică, distanța maximă este mai mare (fig.3.6), acesta fiind unul dintre motivele pentru care nu se utilizează numai alimentarea cu tensiune alternativă a electrofiltrelor, deoarece au loc mișcări oscilatorii ale particulelor de praf încărcate cu sarcină electrică. La depășirea unei frecvențe limită a tensiunii de alimentare, amplitudinea mișcării oscilatorii ale particulelor de praf este mai mică decât distanțele între electrozi.

Încărcarea electrostatică a particulelor se desfășoară în două etape distincte. Prima etapă este producerea ionilor cu ajutorul câmpului electric. A doua etapă o reprezintă atașarea ionilor de particulele de praf. Particula de praf nu se încarcă electrostatic oricât de mult, ci numai până la o anumită valoare limită (la saturație) dată de relația (3.48). Sarcina electrică acumulată în timp se face cu o constantă de timp care depinde de temperatură, de raza particulei de praf, de viteza medie și de densitatea de încărcare electrostatică conform relației (3.56).

Cochet [73,93] a determinat un model de încărcare electrostatică a particulelor de praf, când particulele de praf ajung la saturație (relația (3.57)). Evoluția sarcinii electrice în timp, până la saturație, se realizează cu (3.58) și (3.59). Pentru același diametru al particulelor de praf și aceeași densitate de curent, sarcina electrică crește exponențial în timp, având valori din ce în ce mai mari odată cu creșterea intensității câmpului electric.

Ecuația mișcării particulelor este determinată cu relația (3.65) [93,145] a introdus un coeficient care arată că forțele vâscoase sunt mai mici pentru particulele de diametru mai mic. Rezolvând ecuația (3.65) se determină viteza de migrație a particulelor cu relația (3.66) în funcție de viteza de migrație teoretică cu relația (3.67) și o constantă de timp care caracterizează regimul dinamic al particulei cu relația (3.68). Viteza de migrație crește cu diametrul particulelor și odată cu scăderea vâscozității dinamice (fig.3.13). Particulele de diametre mici (mai mici de $10\mu\text{m}$) au vitezele de migrație mici. Vitezele de migrație teoretice cresc odată cu diametrul particulelor și a intensității câmpului electric (fig.3.15).

Determinarea teoretică a vitezei de migrație, pe diametre de particule, este dificilă din cauza necunoașterii parametrilor: $E_0[\text{V/m}]$, $E_p[\text{V/m}]$, $\mu[\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})]$ și $\epsilon_r[-]$. Acești parametri se pot numai estima într-un anumit domeniu [73,79,123].

Când o particulă de praf ajunge la electrozii de depunere are loc transferul sarcinii de la particulă la electrod. Totodată, particula de praf este supusă și unui proces de încărcare electrică din

cauza ionilor. În timpul scuturării electrozilor, este posibil ca particula de praf să mai aibă o anumită sarcină și nu mai poate fi înlăturată ușor de pe electrodul de colectare. Prin alegerea atentă a momentelor de scuturare a electrozilor se poate crește eficiența electrofiltrelor.

S-au utilizat diferite modele (relațiile (3.85), (3.86) și (3.87)) pentru determinarea caracteristicilor curent-tensiune pentru fiecare câmp în parte. Modelele caracteristicilor curent-tensiune sunt în funcție de k_i [m²/(V·s)], U [V], U_0 [V], I [A/m] și G [s/(m·Ω)] conform relației (3.84).

Pentru electrofiltre aflate în industrie (electrofiltrele nr.1 A și B de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.), pentru două regimuri de funcționare (pentru două puteri ale grupului energetic numărul 1) s-au realizat comparațiile între caracteristicile curent-tensiune măsurate experimental și modelele date de relațiile (3.85), (3.86) și (3.87) (în aceste modele s-au utilizat parametri reali de la electrofiltrele 1A și 1B). În urma analizării graficelor din fig.3.22-3.29 se constată că pentru cele două regimuri de funcționare, caracteristicile cele mai bine modelate sunt pentru câmpurile 1, 2 și 3 de la electrofiltrul 1A și pentru câmpul 3 de la electrofiltrul 1B, neputându-se specifica care metodă este mai bună din cele trei utilizate. Pentru celelalte câmpuri (câmpul 4 electrofiltrul 1A și câmpurile 1,2 și 4 electrofiltrul 1B), modelarea matematică a caracteristicilor este nesatisfăcătoare. Acest lucru se datorează funcționării în condiții reale a electrofiltrelor (pierderea paralelismului între electrozi, lipsa unor electrozi de emisie sau a funcționării într-un singur semicâmp, reglarea deficitară a puterii Corona la nivelul electrozilor de emisie) cât și a determinării analitice a unor parametri (E_0 [V/m], U_0 [V], k_i [m²/(V·s)], r_e [m]) care nu corespund cu cazul real.

Parametrii importanți de care trebuie să se țină cont la proiectarea electrofiltrelor sunt: suprafața de colectare specifică (3.111), viteza de migrație a particulelor (3.67). Suprafața de colectare specifică este legată de parametrii mecanici ai electrofiltrului, iar viteza de migrație de parametrii electrici.

Prin utilizarea a trei modele (relațiile (3.109), (3.117), (3.118)) de determinare a eficienței electrofiltrelor și folosind parametri reali ai electrofiltrelor (tabelul 3.2), s-au determinat vitezele de migrație teoretice pentru electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. Vitezele de migrație reale nu s-au putut determina din cauza unor parametri care sunt greu de determinat practic (E_0 [V/m], E_p [V/m], μ [kg/(m·s)] și ϵ_r [-]). Vitezele de migrație reale se pot estima la ordinul cm/s din literatură [69,88,93], viteze care sunt comparabile cu cele determinate în tabelul 3.3. Vitezele de migrație teoretice determinate în tabelul 3.3 diferă în limite largi în funcție de modelul matematic utilizat. Se constată din acest tabel că electrofiltrele nr.1 funcționează la eficiența cea mai ridicată datorită automatizării complete și a posibilității de a funcționa în regim intermitent. Funcționarea cu mai puține câmpuri a electrofiltrelor (electrofiltrele nr.4A, 4B, 5A, 5B, 6A, 6B) determină eficiența cea mai scăzută. Pentru praful colectat de la S.C. Electrocentrale Deva S.A se constată că alimentarea intermitentă 1/3 nu determină o eficiență la fel de mare ca și alimentarea clasică (electrofiltrul nr.1 [168,172], electrofiltrul nr.4[161]). Cu ajutorul alimentării cu pulsuri de înaltă tensiune într-un domeniu de frecvențe (electrofiltrele nr.4 [161]), se constată o colectare mai bună a prafului, ceea ce indică înalta rezistivitate a prafului rezultat în urma arderii combustibililor fosili în cazanele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.

4. SIMULĂRI ALE PARAMETRILOR ELECTRICI ȘI TEHNOLOGICI ALE INSTALAȚIILOR ELECTROFILTELOR

4.1. Simulări ale parametrilor electrici cu programul PSCAD/EMTDC3.0.8

4.1.1. Generalități

Programul PSCAD/EMTDC 3.0.8 este un mediu de simulare a sistemelor electrice și electronice de putere atât în curent continuu cât și în curent alternativ. Programul este compus din două programe [135,171]:

- EMTDC (Electro-Magnetic Transients in DC System);
- PSCAD (Power System Computer Aided Design).

EMTDC este un program cu ajutorul căruia se pot simula sisteme electrice în domeniul timp și permite realizarea controlului sistemelor neliniare. Împreună cu interfața grafică PSCAD, combinația PSCAD/EMTDC devine un instrument puternic și util de determinare și vizualizare a parametrilor diferitelor zone ale sistemelor electrice și electronice de putere.

O metodă de a înțelege comportamentul sistemelor complicate este studierea răspunsului lor pentru diferite variații ale parametrilor. Se pot vizualiza răspunsurile în domeniul timp, în valori efective sau componența în frecvență a răspunsului.

4.1.2. Simulări la frecvență industrială (50Hz)

La frecvență industrială se simulează alimentarea cu tensiune (380V c.a.) a unui câmp a electrofiltrului printr-un variator de tensiune alternativă cu două tiristoare [10,11,132,168], cu o inductanță de scurtcircuit (0,7mH), un transformator ridicător de tensiune (380V/65kV), o punte redresoare de înaltă tensiune, un filtru pasiv de înaltă frecvență (format dintr-o rezistență de 80 Ω și o bobină de 60mH pe partea de înaltă tensiune), iar câmpul electrofiltrului s-a simulat prin legarea în paralel a trei componente: un condensator cu capacitatea de 300nF, o rezistență de 300k Ω și un varistor de înaltă tensiune cu tensiunea limită de 48kV. O modelare asemănătoare s-a realizat și în [32,44]. Parametrii utilizați la simulare ale tensiunii de alimentare, inductanței de scurtcircuit, raportul de transformare a transformatorului ridicător de tensiune, caracteristicile punții redresoare de înaltă tensiune, componentele filtrului pasiv de înaltă frecvență sunt aceleași cu cele de la electrofiltrele S.C. Electrocentrale Deva S.A. [168]. Capacitatea unui câmp (capacitatea între toți electrozii de emisie și cei de depunere) s-a putut estima [32] la valoarea de 300nF. Rezistența gazului cu praf dintre electrozi s-a putut estima la valoarea de 300k Ω datorită prafului cu rezistivitate ridicată [165,168]. Varistorul modelează descărcarea în câmpul electrofiltrului s-a aproximat la valoarea de 48kV în urma măsurărilor efectuate în câmpurile electrofiltrelor [105,168].

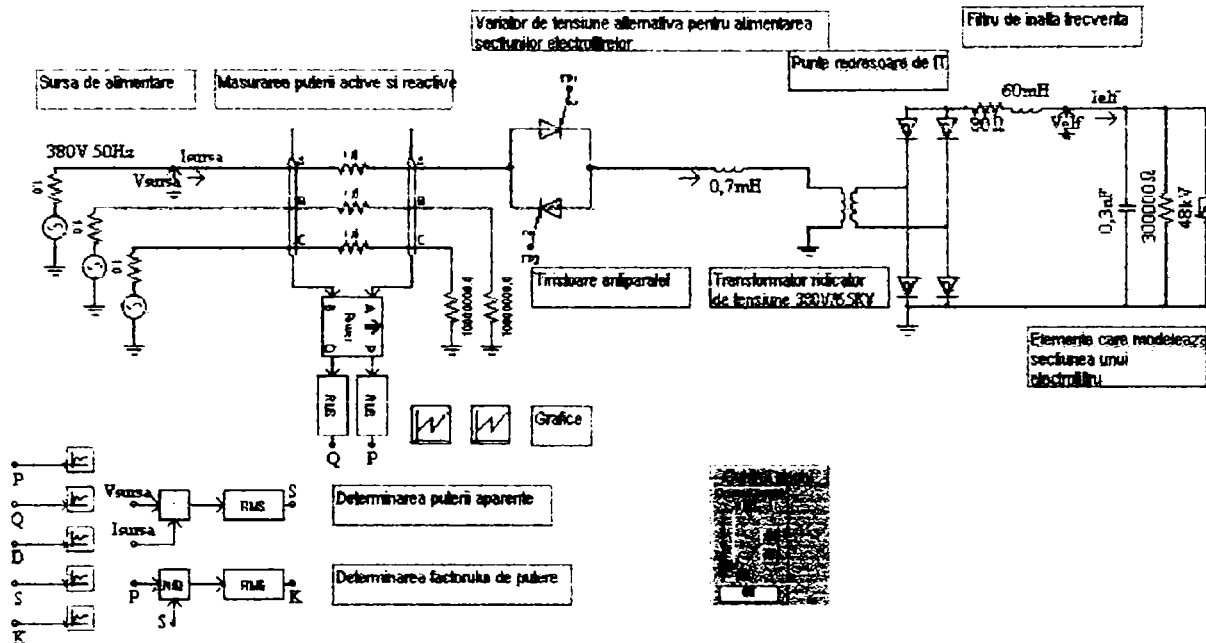


Fig. 4.1.a. Instalația de forță a electrofiltrului

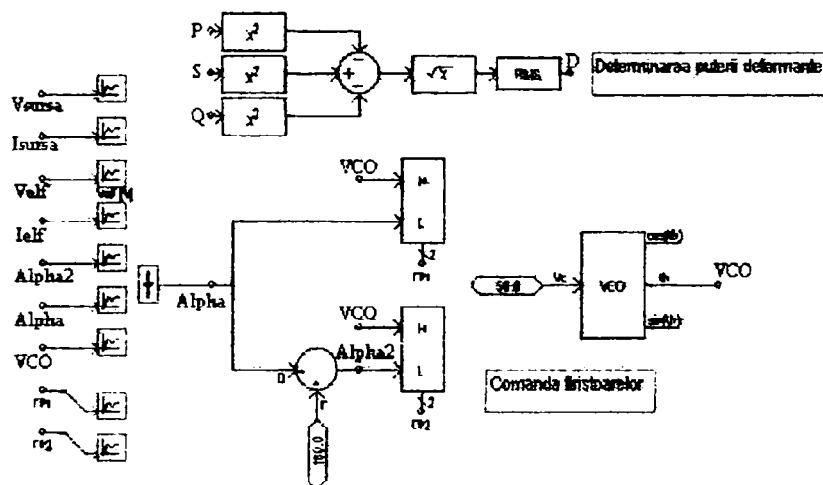


Fig. 4.1.b. Schema bloc ale instalației de determinare a puterii deformante și a dispozitivului de formare a impulsurilor de comandă a tiristoarelor

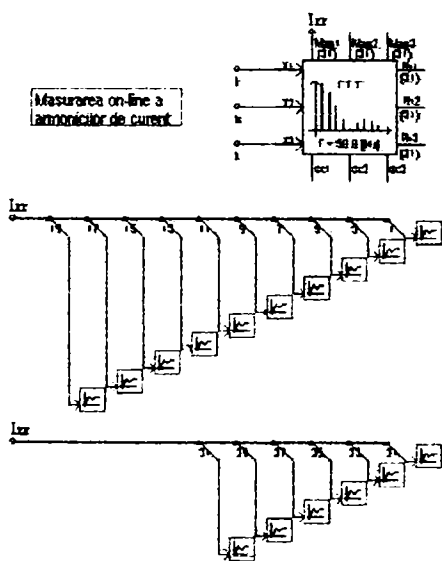


Fig. 4.1.c. Schema bloc de determinare on-line a armonicilor curentului absorbit de instalația electrică a electrofiltrului

În fig.4.1.a, 4.1.b și 4.1.c s-a prezentat schema de implementare a sistemului de alimentare cu energie electrică a unui câmp al unui electrofiltru.

În fig.4.1.a este prezentată partea de forță care cuprinde variatorul de tensiune alternativă, transformatorul de înaltă tensiune, puntea redresoare și modelul câmpului electrofiltrului. Fig.4.1.a mai conține o fereastră pentru controlul unghiului de amorsare al tiristoarelor. Fig.4.1.b cuprinde blocul de determinare al puterii deformante D și blocul de formare a impulsurilor pentru comanda tiristoarelor.

Fig.4.1.c conține blocul de determinare on-line a primelor 31 de armonice (numai armonicile impare) ale curentului absorbit de sistemul electric din fig.4.1.a.

Programul calculează regimul nesinusoidal utilizând primele 31 de armonici impare, deși pentru o aproximare suficientă a regimului nesinusoidal sunt necesare primele 40 de armonici impare [41].

Puterea activă [W] în regim nesinusoidal se calculează cu [41,116]:

$$P = U_0 \cdot I_0 + \sum_{k=1}^{31} U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k \quad (4.1)$$

Puterea reactivă [VAr] în regim nesinusoidal se determină cu:

$$Q = \sum_{k=1}^{31} U_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k \quad (4.2)$$

Puterea aparentă [VA] în regim nesinusoidal se calculează cu:

$$S = U \cdot I \quad (4.3)$$

Puterea deformantă [VAd] este specifică numai regimului nesinusoidal și se determină cu:

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad (4.4)$$

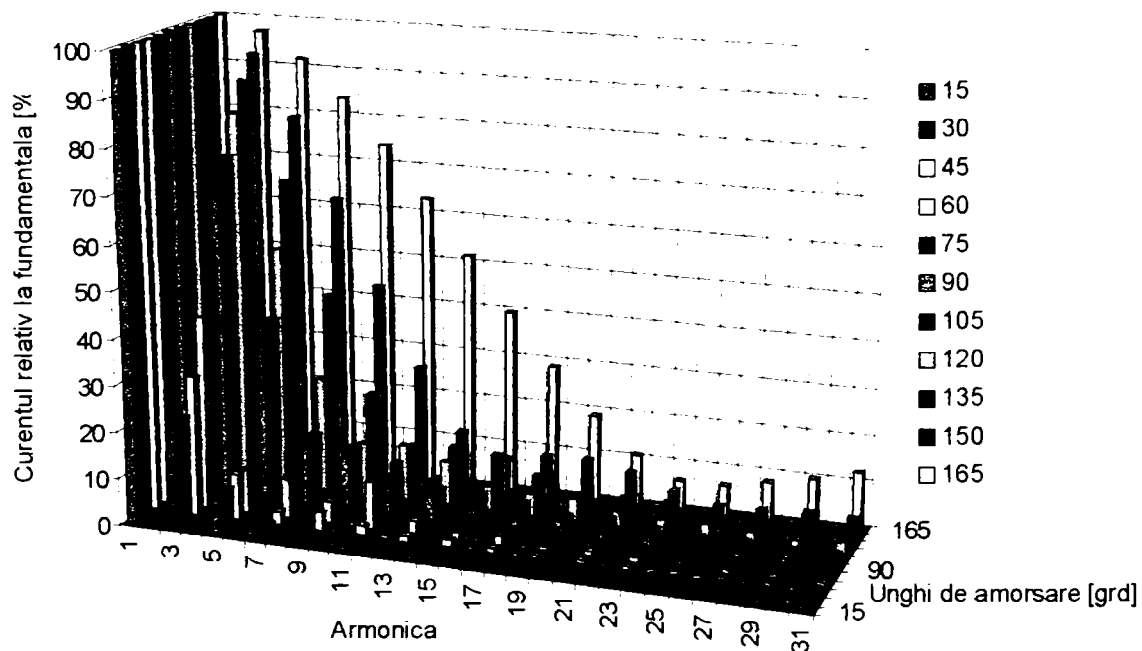


Fig.4.2. Analiza armonică a curentului absorbit din rețea pentru diferite unghiuri de amorsare a tiristoarelor din variatorul de tensiune alternativă

În fig.4.2. s-a simulat analiza armonică a curentului absorbit de sistemul de alimentare cu variator de tensiune alternativă, pentru diferite unghiuri de amorsare a tiristoarelor (15° , 30° , ..., 165°). Reprezentarea s-a realizat în mărimi raportate la curentul fundamental pentru fiecare unghi de amorsare. Se observă că armonicile sunt cu atât mai mari cu cât unghiul de amorsare este mai mare, deci curentul la unghiuri de amorsare mai mari va fi mai distorsionat.

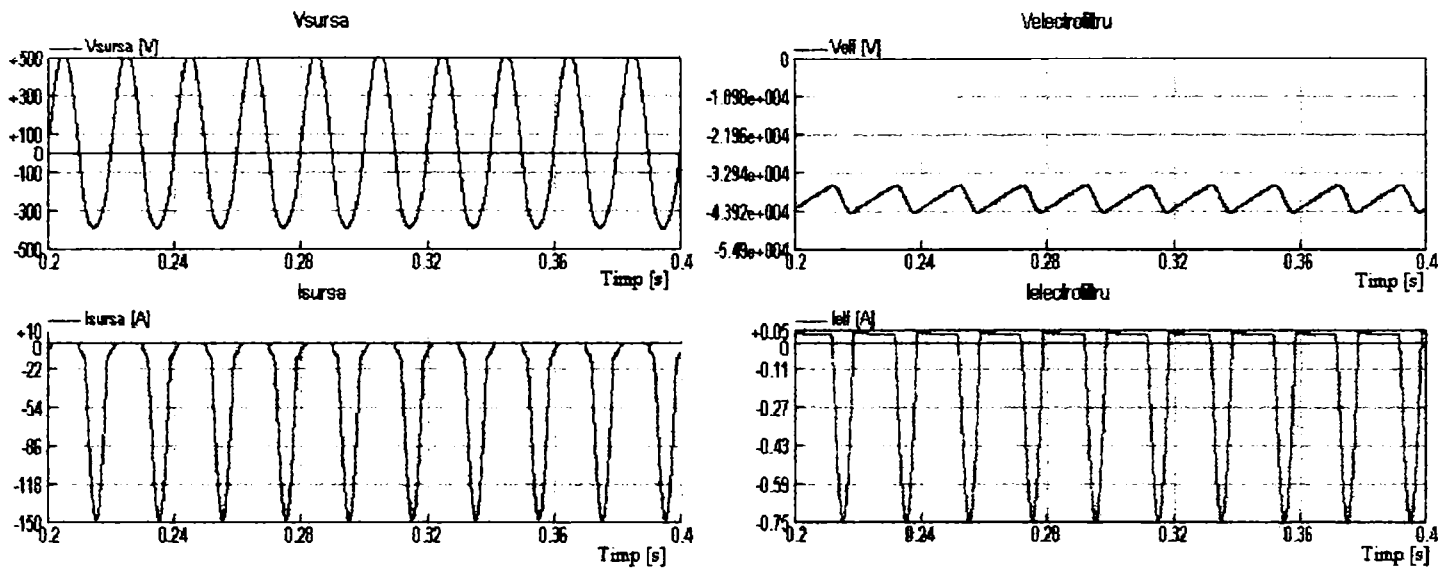


Fig.4.3. Simulări ale tensiunii de alimentare ($V_{sursă}$), curentului ($I_{sursă}$), căderii de tensiune pe electrofiltru (V_{elf}) și curentului din electrofiltru (I_{elf}), pentru un unghi de amorsare de 0°

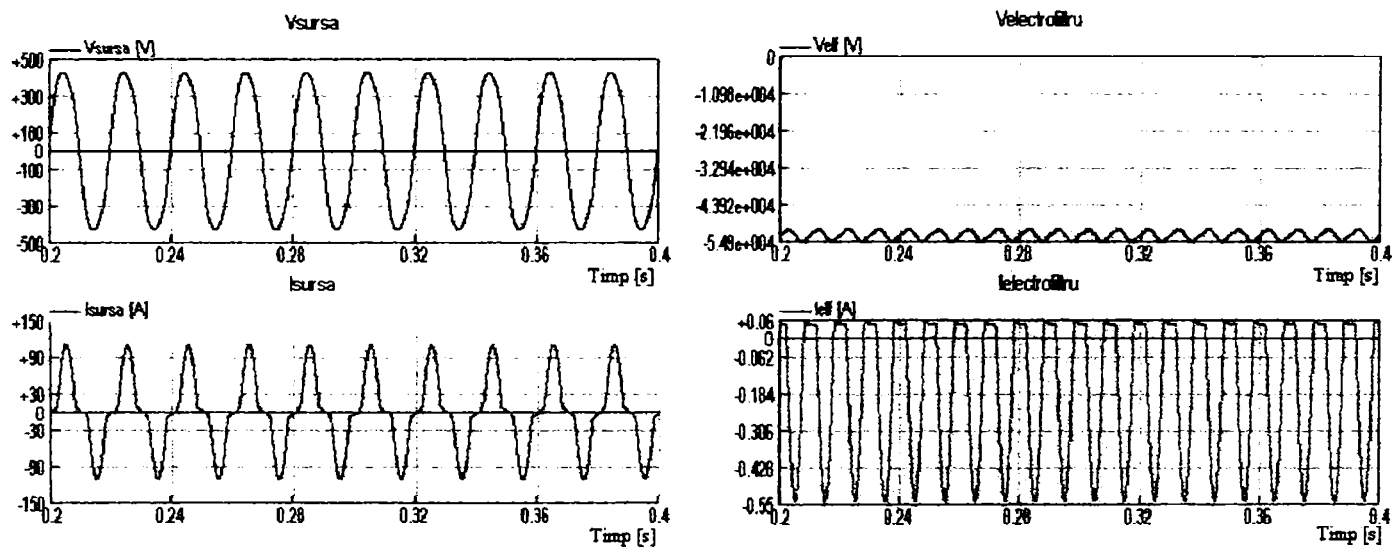


Fig.4.4. Simulări ale tensiunii de alimentare ($V_{sursă}$), curentului ($I_{sursă}$), căderii de tensiune pe electrofiltru (V_{elf}) și curentului din electrofiltru (I_{elf}), pentru un unghi de amorsare de 30°

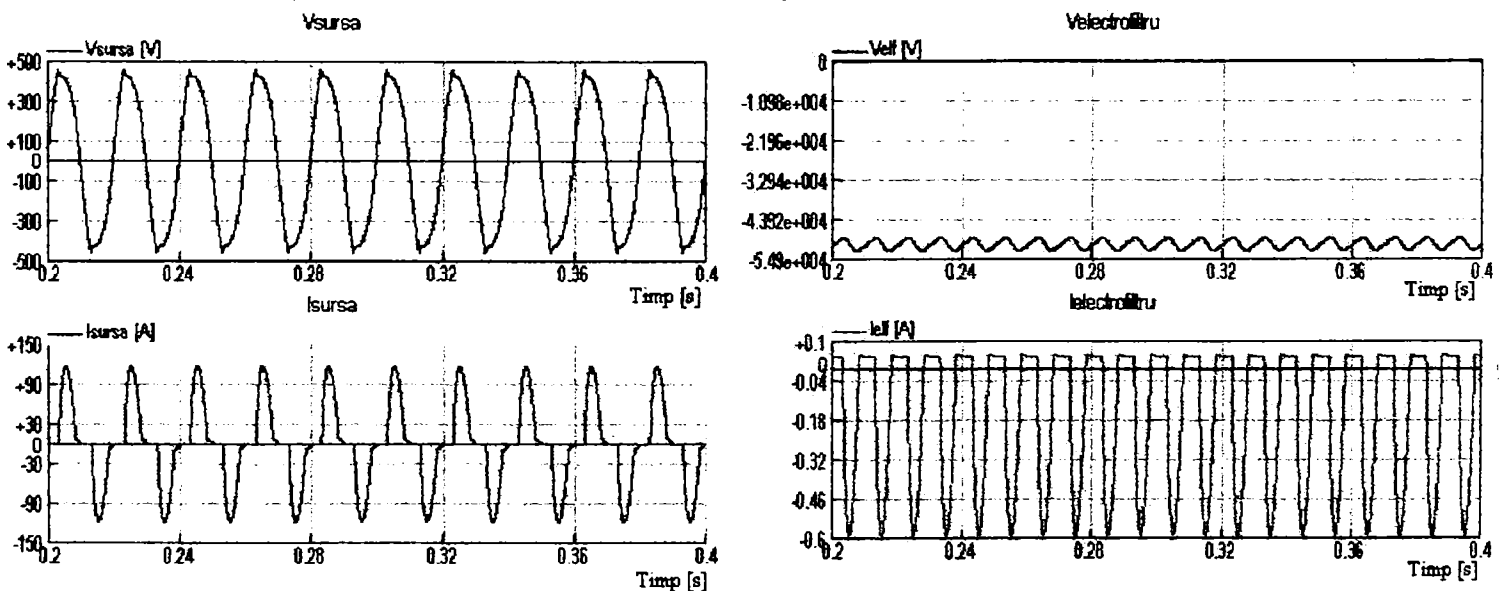


Fig.4.5. Simulări ale tensiunii de alimentare ($V_{sursă}$), curentului ($I_{sursă}$), căderii de tensiune pe electrofiltru (V_{elf}) și curentului din electrofiltru (I_{elf}), pentru un unghi de amorsare de 60°

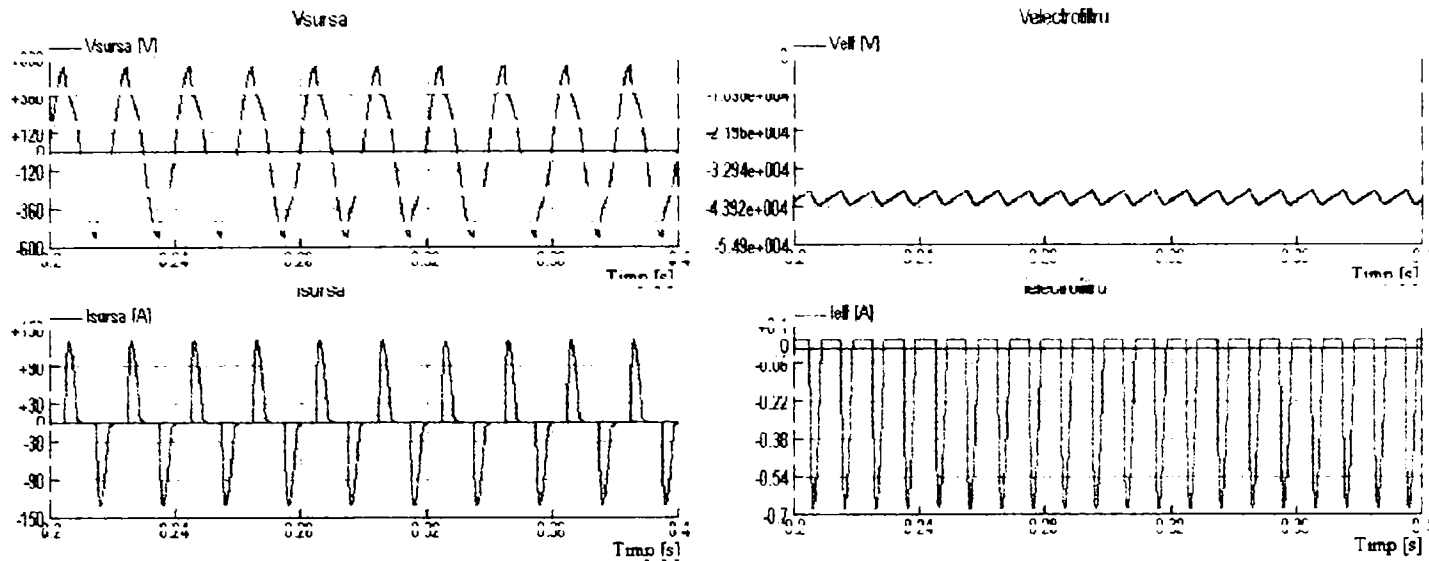


Fig.4.6. Simulări ale tensiunii de alimentare ($V_{sursă}$), curentului ($I_{sursă}$), căderii de tensiune pe electrofiltru (V_{elf}) și curentului din electrofiltru (I_{elf}), pentru un unghi de amorsare de 90°

În fig.4.3, 4.4., 4.5 și 4.6 s-au simulat variațiile în timp ale tensiunii de alimentare ($V_{sursă}$), curentului ($I_{sursă}$), căderii de tensiune pe electrofiltru (V_{elf}) și curentului din electrofiltru (I_{elf}), pentru diferite unghiuri de amorsare ale tiristoarelor: 0° , 30° , 60° și 90° .

Din aceste simulări prezintă importanță deosebită curentul absorbit ($I_{sursă}$), din punct de vedere al poluării armonice, căderea de tensiune pe electrofiltru (V_{elf}) și a curentului din electrofiltru (I_{elf}). Când unghiul de amorsare este 0° conduce un singur tiristor și anume cel care se amorsează primul. Acest lucru se datorează sarcinii preponderent inductive.

Este important de observat riplul (domeniul în care se modifică tensiunea) de tensiune (de aproximativ 4kV) pe electrofiltru în cazul alimentării la frecvență industrială. În electrofiltre este importantă menținerea tensiunii la o valoare cât mai apropiată de valoarea tensiunii de descărcare pentru a se produce o ionizare puternică [20,93]. La fel de important este timpul de creștere al tensiunii, care în cazul apariției unei descărcări, este de minimum jumătate de perioadă (10 ms la frecvența de 50Hz) a tensiunii de alimentare, timp în care nu se produc purtători de sarcină necesari încărcării electrostatice a particulelor de praf [32,145]. Astfel, în electrofiltrele cu multiple descărcări, timpul total pierdut este mare.

Soluția de alimentare a electrofiltrelor la frecvență industrială, nu este o metodă care să dea rezultate foarte bune.

După cum arată simulările, regimul real de funcționare este unul perturbat caracterizat prin distorsiunea curbelor de curent. Trebuie luate măsuri pentru îmbunătățirea calității energiei electrice [27,41,147].

O abordare tradițională pentru reducerea armonicilor de curent și de tensiune este utilizarea filtrelor pasive. Dimensionarea filtrelor pasive se face în funcție de impedanțele frecvențelor armonice ale sistemului de alimentare [13,89].

Dimensionarea filtrelor pasive L-C se face, în funcție de ordinul armonicii n care trebuie atenuată, cu ajutorul ecuației [89, 136]:

$$2 \cdot \pi \cdot n \cdot f \cdot L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot f \cdot C} \tag{4.5}$$

unde f[Hz] este frecvența curentului fundamental.

Un dezavantaj în utilizarea filtrelor pasive utilizate la reducerea armonicilor este acela că pot să apară rezonanțe între impedanța sursei și filtrul pasiv, care determină amplificarea unor armonici. În acest caz, filtrul pasiv nu mai are un efect benefic asupra rețelei electrice. Variații rapide ale sarcinii filtrate pot conduce la schimbarea configurației armonicilor de curent.

Tabelul 4.1.

Valorile componentelor filtrului pasiv utilizat la simulări [89]

Armonica	3	5	7	9	Filtru trece-jos
L[mH]	1.2	1.2	1.2	1.2	0.26
C[μF]	680	340	170	85	300
R[Ω]	-	-	-	-	3

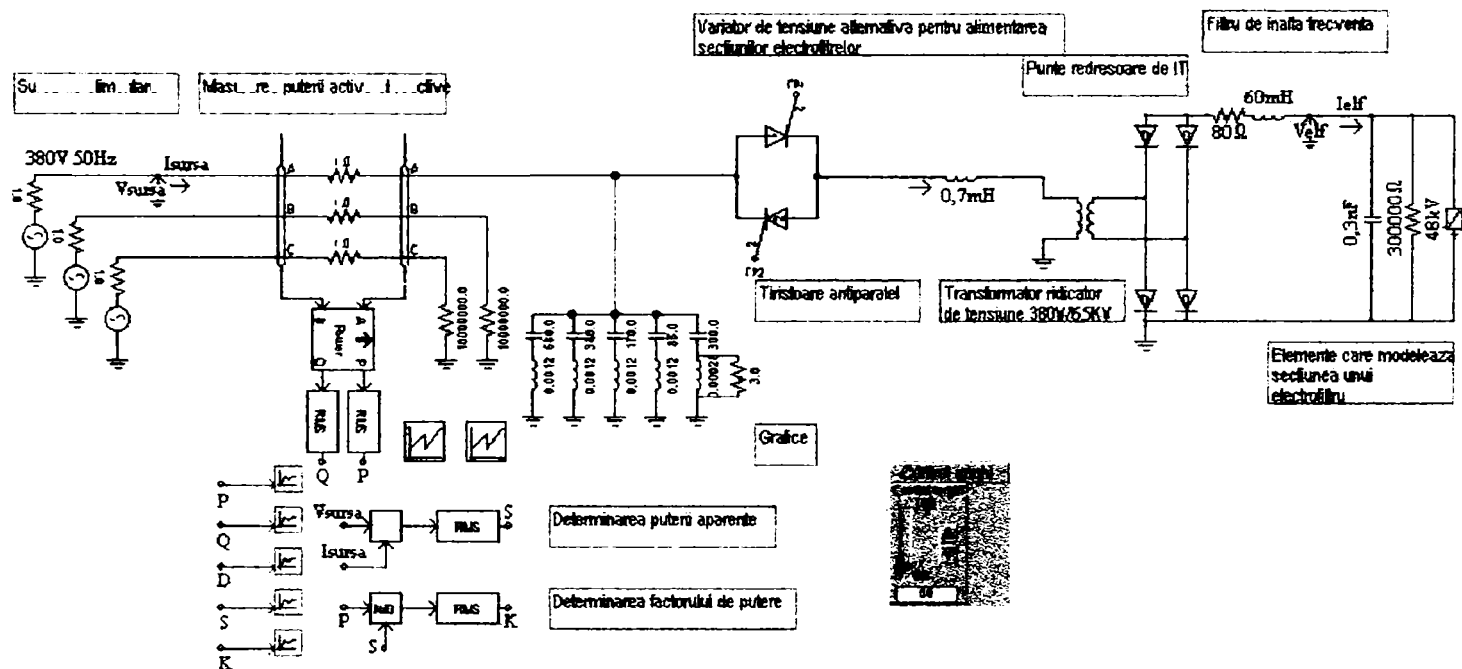


Fig.4.7. Instalația de forță a electrofiltrului, cu filtre pasive pentru armonici superioare

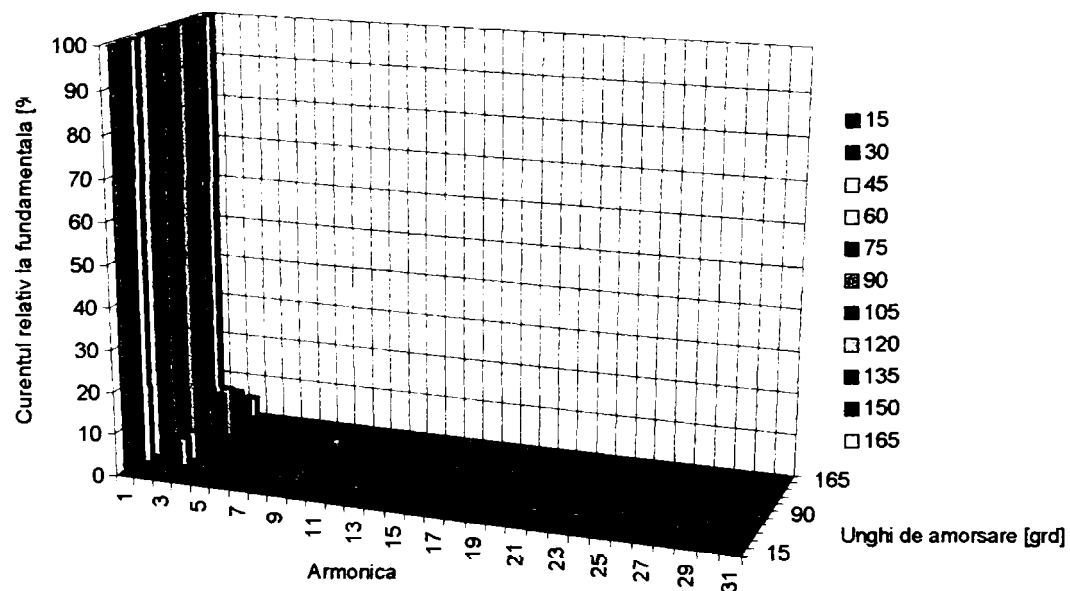


Fig.4.8. Analiza armonică a curentului absorbit din rețea pentru diferite unghiuri de amorsare a tiristoarelor, când instalația de forță are filtre pasive

Utilizând un sistem de alimentare similar cu cel din fig.4.1.a (cu aceleași valori ale componentelor ca în fig.4.1.a) s-a simulat funcționarea sistemului folosind filtre pentru armonicile 3, 5, 7, 9 și un filtru trece-jos pentru atenuarea armonicilor superioare. Datele referitoare la filtru sunt date în tabelul 4.1.

În fig.4.7 s-a prezentat o parte din schema de alimentare cu energie electrică a unui câmp dintr-un electrofiltru, utilizând un filtru pasiv la filtrarea curentului. Fig.4.8 prezintă componența armonicilor de curent în funcție de unghiul de amorsare al tiristoarelor. Comparativ cu fig.4.2, când nu se utilizează filtru pasiv, nivelul armonicilor s-au diminuat la valori foarte mici (sub limitele stabilite în norme cu privire la armonicile de curent). Armonica de ordinul 3 este singura care are valori mai semnificative și este mai mare la unghi de amorsare mai mare.

Prin utilizarea filtrului pasiv singura formă de undă care se modifică, față de fig.4.3, 4.4, 4.5 și 4.6, este cea a curentului. În fig.4.9.a, b, c și d se arată formele de undă ale curentului, pentru trei valori ale unghiului de amorsare: 0° , 30° , 60° și 90° .

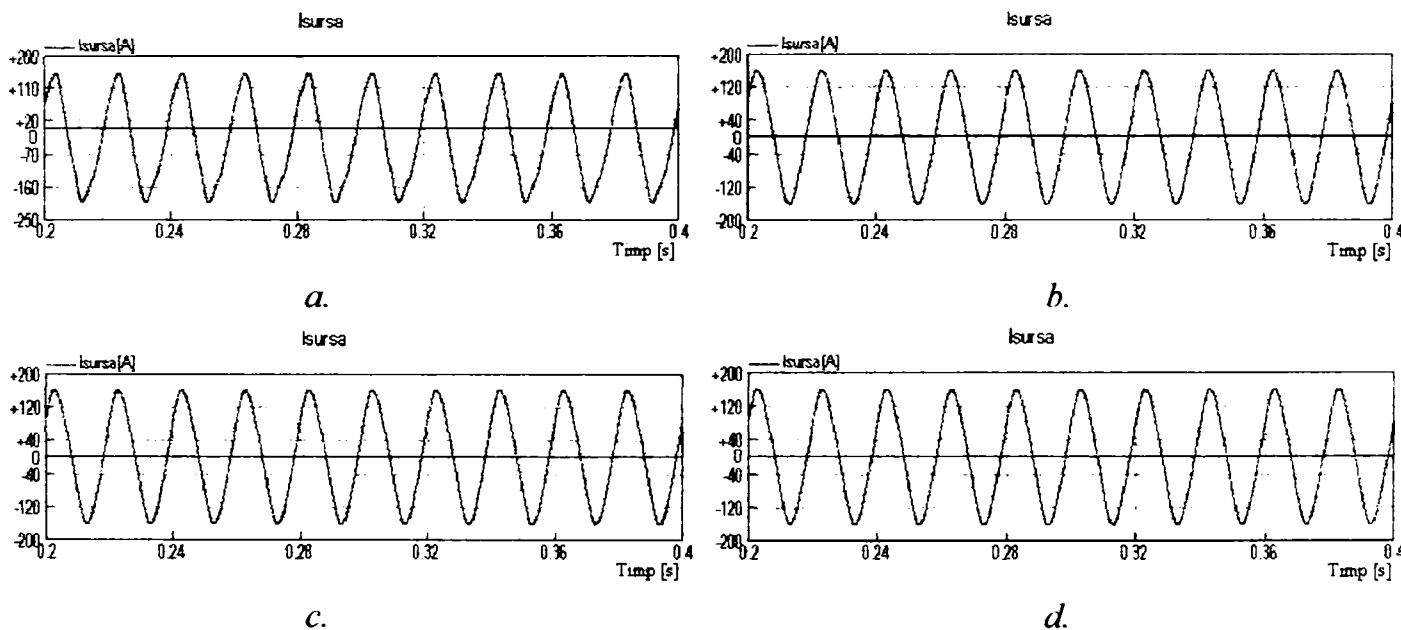


Fig.4.9. Variația în timp a curentului pentru unghiul de amorsare la valorile de 0° (a), 30° (b), 60° (c) și 90° (d)

Comparativ cu simulările curenților din fig.4.3, 4.4, 4.5 și 4.6, pentru aceleași unghiuri de amorsare (0° , 30° , 60° , 90°), curenții din fig.4.9.a, b, c și d se apropie mai mult de forma sinusoidală, dar curenții aborbiți sunt mai mari din cauza filtrului pasiv care este permanent conectat.

Deci, filtrele pasive implică diminuarea armonicilor, în regim stabil de funcționare, într-o anumită limită, însă cu consumuri energetice superioare.

4.1.3. Simulări la înaltă frecvență

O sursă pentru alimentarea unui câmp a electrofiltrelor, ca cea din fig.2.25 [29,32,94] este constituită din următoarele componente:

- redresorul primar trifazat care este necomandat;
- filtru intermediar de curent continuu, pentru reducerea riplului tensiunii redresate cu care se alimentează inverterul, format din condensatoare electrolitice cu pierderi mici;

- inverterul primar este implementat în diferite configurații și poate avea diferite elemente de comutație, frecvența de comutație fiind de ordinul kHz sau zecilor de kHz;
- transformatorul ridicător de tensiune la înaltă frecvență care asigură o tensiune ridicată pentru alimentarea unui câmp a electrofiltrului și este realizat cu miez din ferită pentru a reduce pierderile;
- redresorul secundar de înaltă tensiune și înaltă frecvență, care este utilizat pentru obținerea unor tensiuni continue pe câmpul electrofiltrului;
- filtru pentru reducerea armonicilor de curent, care apar datorită descărcării Corona și descărcărilor electrice în electrofiltru, care sunt realizate de obicei cu componente R-L.

În fig.4.10.a se prezintă sistemul de alimentare de la sursă trifazată cu inverter a unui câmp dintr-un electrofiltru. În circuitul intermediar condensatorul cu $C=400 \mu\text{F}$ se folosește pentru filtrarea tensiunii, iar bobina $L=10\text{mH}$, pentru filtrarea curentului [32,44]. Partea de înaltă tensiune prevăzută cu un filtru R-L, care are parametrii $R=80\Omega$ și $L=60\text{mH}$ (fig.4.1.a [168]). Se simulează curentul și tensiunea sursei de alimentare, curentul și căderea de tensiune pe electrofiltru care se modelează la fel ca și în fig.4.1.a. Fig.4.10.b conține partea de comandă a elementelor de comutație.

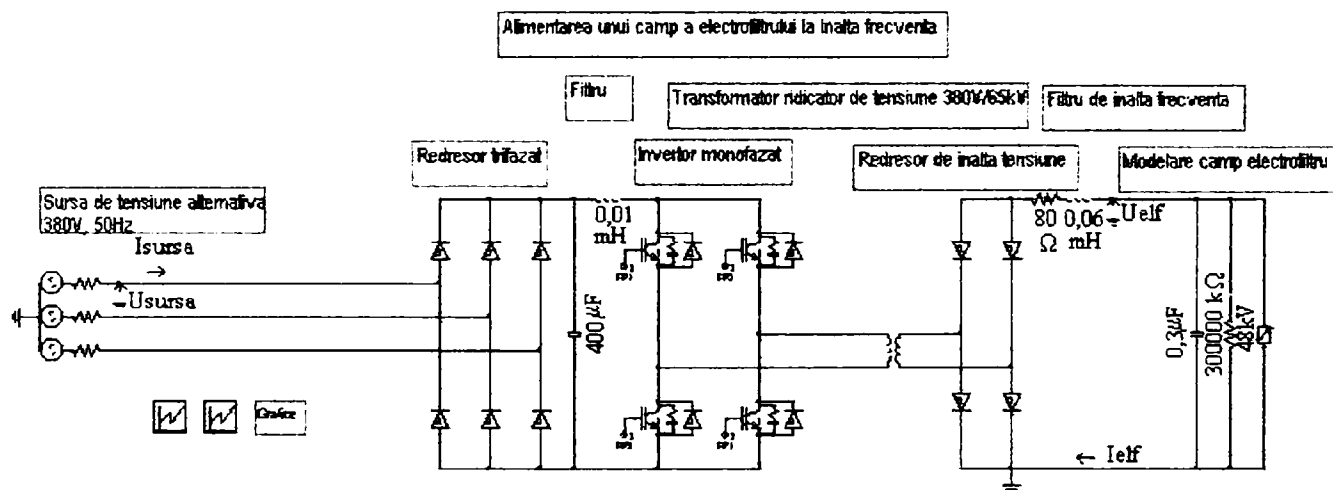


Fig.4.10.a. Instalația de forță a electrofiltrului alimentat la înaltă frecvență

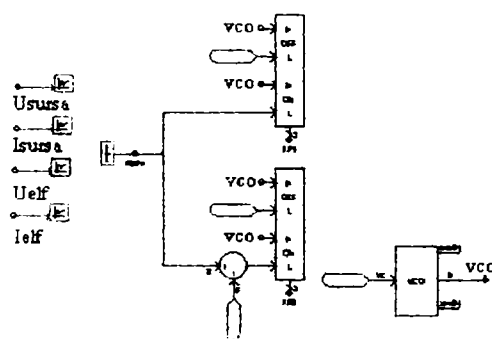


Fig.4.10.b. Schemele bloc de formare a impulsurilor de comandă a elementelor de putere din fig.4.10.a

În fig.4.11, pentru o frecvență de comutație a inverterului de 16kHz, s-au simulat tensiunea de alimentare (U_{sursa}), curentul (I_{sursa}), căderea de tensiune pe electrofiltru (U_{elf}) și curentul din electrofiltru (I_{elf}) pentru un unghi de amorsare de 30° . Curentul sursei este puternic deformat, de aceea se impune folosirea unor filtre pentru astfel de surse.

Căderea de tensiune pe electrofitru, este fără ripluri deci astfel de surse pot fi folosite la alimentarea cu tensiune a câmpurilor electrofiltrelor. Se poate controla fin tensiunea de ionizare maximă, fără însă să se ajungă la descărcări electrice în electrofiltru. La apariției unei descărcări

electrice, timpul de revenire este de minimum jumătate de perioadă (dacă $f=16\text{kHz}$, $t_{\text{revenire}}=31,2 \mu\text{s}$).

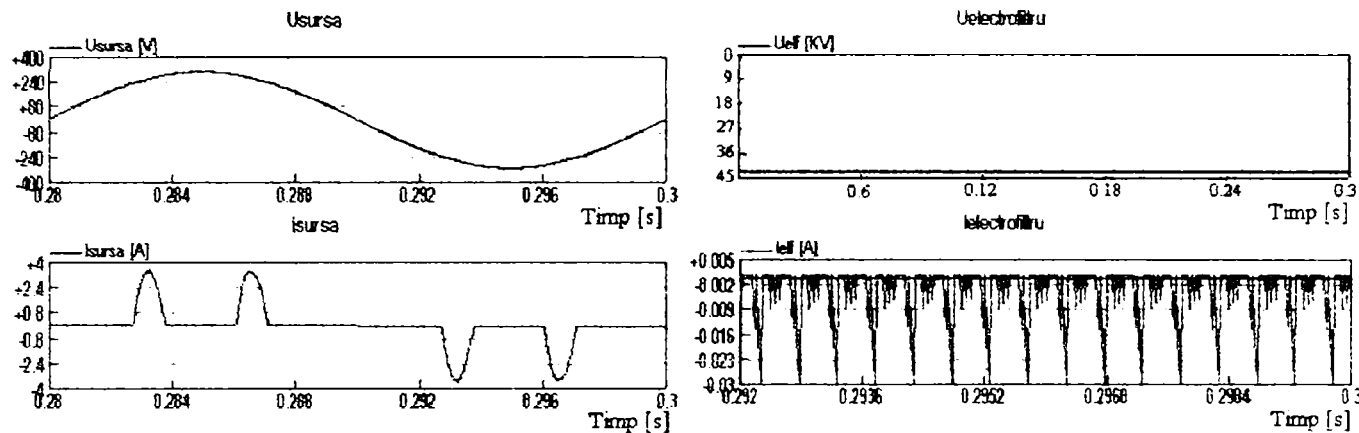


Fig.4.11. Simulări ale tensiunii de alimentare (U_{sursa}), ale curentului (I_{sursa}), a tensiunii pe electrofiltru (U_{elf}) și a curentului din electrofiltru (I_{elf}) pentru un unghi de amorsare de 30° , la frecvența de comutație a inverterului de 16kHz

Aceste simulări arată posibilitatea de utilizare a surselor de putere alimentate la înaltă frecvență datorită consumului mic de energie, a volumului mic și datorită posibilității de reglare a tensiunii optime (ripluri mici ale tensiunii) în câmpurile electrofiltrelor.

4.2. Simulări numerice ale potențialului și a intensității câmpului electric

Utilizând un program construit în C++ s-au determinat liniile de câmp ale potențialului și a intensității câmpului electric dintr-un electrofiltru cu plăci pentru câteva tipuri de electrozi de emisie (utilizați în practică) și un tip de electrod de colectare (tip CSV). Pentru realizarea simulărilor s-a ținut cont de dimensiunile reale (electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. [168]) ale electrozilor de emisie, de colectare și de distanțele dintre ei, păstrând astfel proporțiile. S-au simulat 20 de linii de câmp pentru repartizarea potențialului și a câmpului electric, și pentru fiecare simulare s-au utilizat doi electrozi de descărcare.

La determinarea liniilor de câmp se utilizează ecuațiile (3.79)-(3.83) [73,74,82,133].

Pentru toate graficele liniile, electrozii (suprafețele) de colectare, de culoare galbenă (deschisă) au potențialul zero fiind conectați la pământ, iar electrozii de emisie de culoare albastră (închisă) sunt conectați la potențialul maxim (V_{max}) al sursei de alimentare. Simulându-se 20 de linii de câmp, dacă potențialul electrodului de emisie este de 48kV , înseamnă că între două linii de câmp învecinate sunt $2,4\text{kV}$ [22,112,131].

Pentru simplificarea calculelor, domeniul potențialelor este normat la $[0,1]$ printr-o transformare liniară. Dacă se notează cu V potențialul într-o anumită zonă și cu v potențialul normat, cu V_{min} potențialul suprafeței colectoare și cu V_{max} potențialul electrodului de emisie, rezultă:

$$v = \frac{V - V_{\text{min}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} \tag{4.6}$$

$$V = V_{\text{min}} + (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) \cdot v \tag{4.7}$$

Conductoarele având potențial fix, se stabilește prin convenție ca acesta să fie reprezentat printr-o valoare negativă, în intervalul $[-1,0)$, pentru a-l distinge de potențialele variabile (care trebuie calculate). Pentru indicarea unui potențial fix nul, se folosește o valoare negativă foarte mică (-10^{-40}). Calculul pornește de la o rezoluție prestabilită mică. În cursul unei iterații, fiecărui punct din plan pentru care $v > 0$ i se atribuie valoarea mediei aritmetice a vecinilor săi imediați. Iterațiile continuă până când maximum diferenței dintre valoarea corespunzătoare a unui punct și valoarea din iterația precedentă este mai mică decât un număr prestabilit (de ex. 10^{-6}). Atunci se consideră că s-a ajuns la o situație de convergență. În etapa următoare, rezoluția se dublează atât pe verticală cât și pe orizontală (numărul de puncte crește de 4 ori).

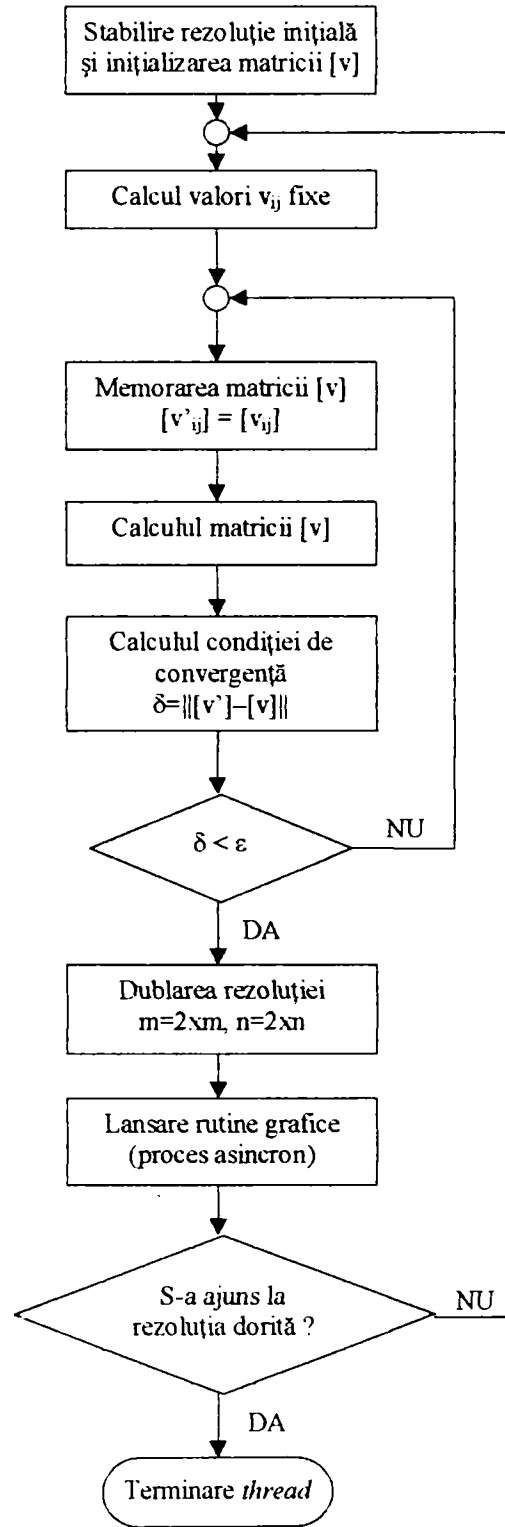


Fig.4.12. Ordinograma principală a programului

Deoarece atât calculul câmpului cât și rutinele grafice pot să dureze un timp îndelungat, ele rulează în fire de execuție (*threads*) separate față de cel al programului principal. Astfel, programul poate fi oprit în orice moment (altfel ar putea fi oprit numai prin Ctrl–Alt–Del, *task manager*-ul Windows-ului). De asemenea, rezultatul parțial al calcului poate fi afișat în orice moment.

Ordinograma prezintă simplificat numai procesul de calcul. Modelul orientat pe eveniment al sistemelor de operare avansate (Windows), programarea orientată pe obiect și în special *multithreading*-ul (executarea aparent simultană a mai multor porțiuni de program) fac o prezentare completă imposibilă. Discheta cu programul de simulare este atașată lucrării.

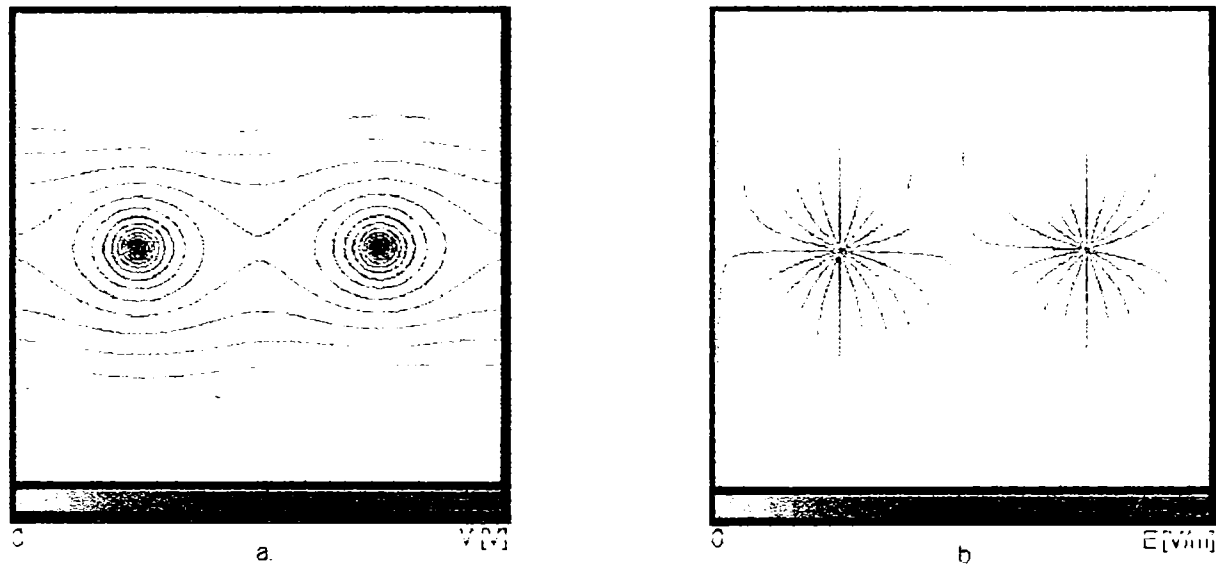


Fig.4.13. Potențialul electric (a) și intensitatea câmpului electric (b) pentru electrozi de descărcare cu secțiune circulară

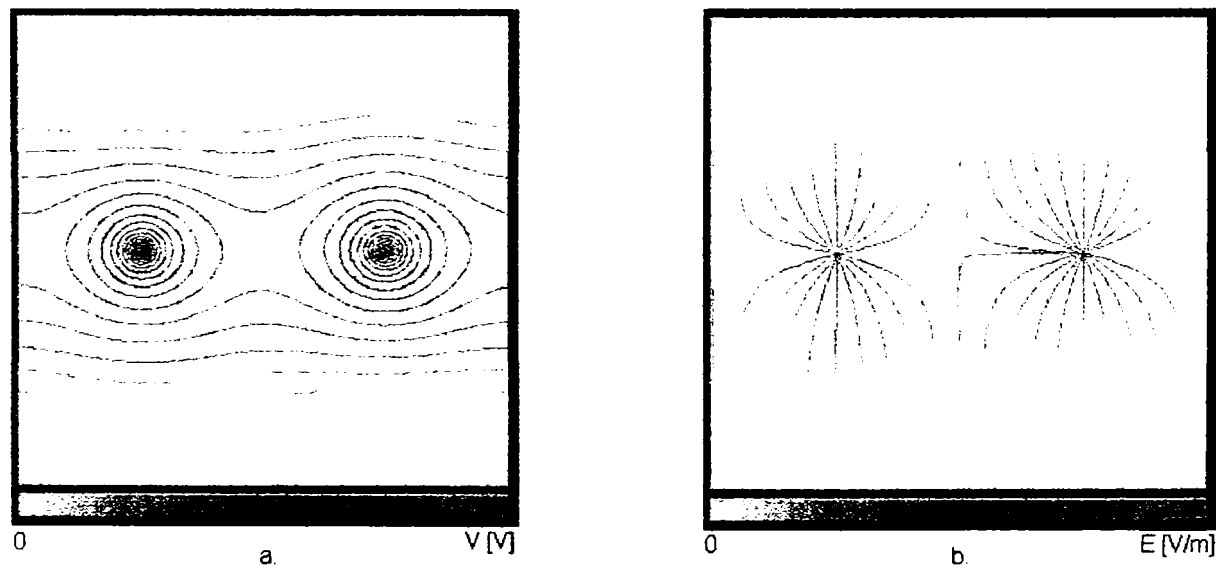


Fig.4.14. Potențialul electric (a) și intensitatea câmpului electric (b) pentru electrozi de descărcare cu secțiune stelată

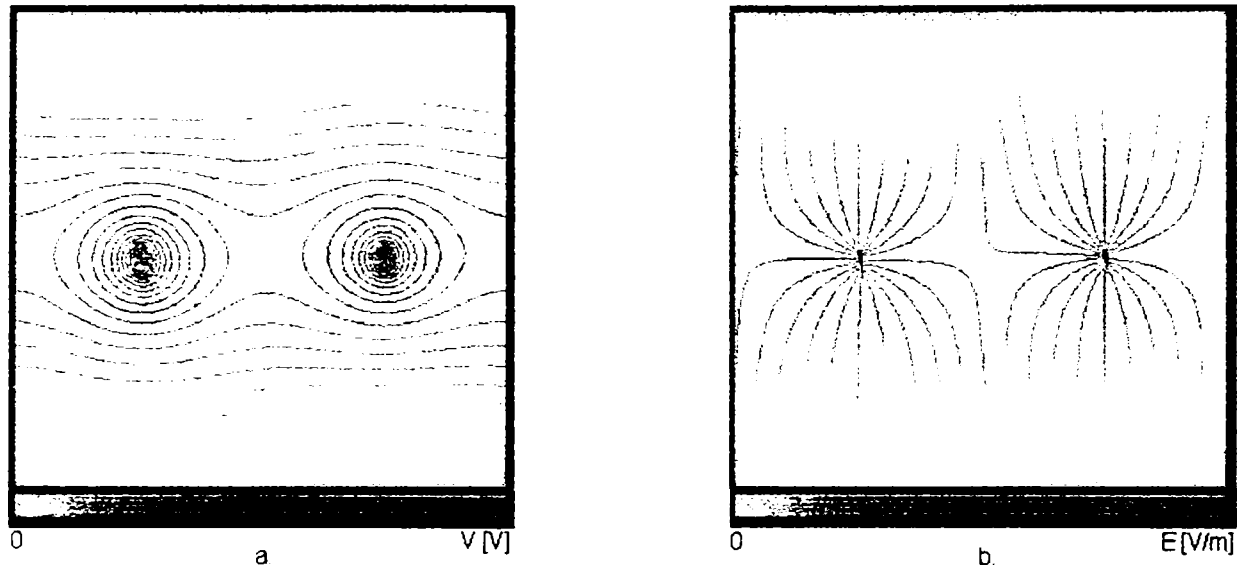


Fig. 4.15. Potențialul electric (a) și intensitatea câmpului electric (b) pentru electrozi de descărcare cu țepi

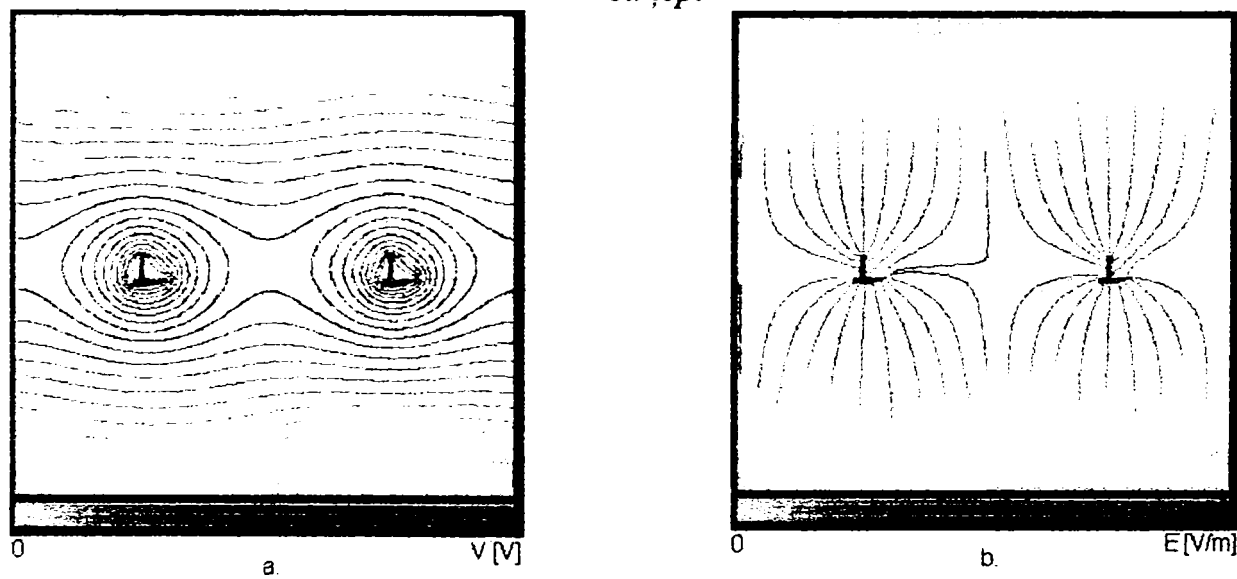


Fig. 4.16. Potențialul electric (a) și intensitatea câmpului electric (b) pentru electrozi de descărcare cornier cu țepi

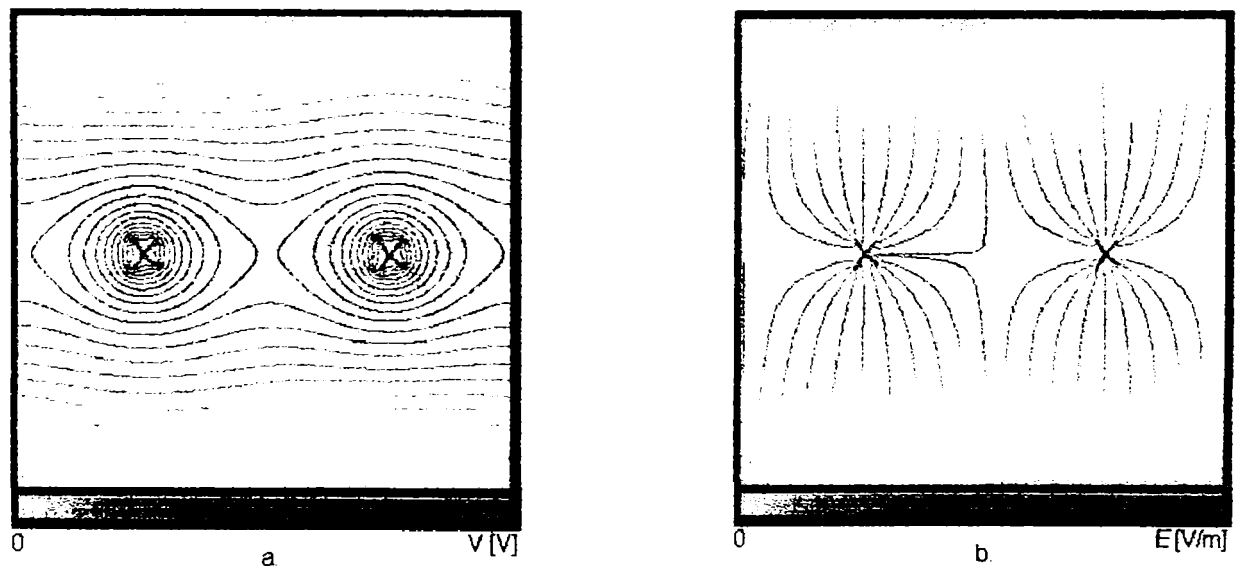


Fig. 4.17. Potențialul electric (a) și intensitatea câmpului electric (b) pentru electrozi de descărcare cu sârmă ghimpată

Cu ajutorul programului de simulare a câmpului electric realizat în C++ s-au determinat, la scară, liniile de câmp ale potențialului și a intensității câmpului electric pentru o secțiune din electrofiltru la un moment dat (model la scară cu cele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.). Studii asupra formelor curbelor echipotențiale ale câmpului electric s-au făcut în [12,20,73,75,145] în care se arată importanța liniilor de câmp, fiind mai puțin importantă valoarea lor (deși se determină simplu). Pentru a evidenția liniile de câmp în diferite cazuri s-au utilizat cinci tipuri de electrozi de emisie: cu secțiune circulară, cu secțiune stelată, cu țepi, cornier cu țepi și cu sârmă ghimpată (fig.4.13÷4.17), pentru același tip de suprafețe colectoare. Pentru a produce cât mai mulți ioni, zona activă trebuie să fie cât mai mare și totodată cât mai neregulată. Se observă că în cazul utilizării unor electrozi de emisie cu secțiune circulară și stelată zona în care potențialul este ridicat și cu intensitate a câmpului electric cât mai mare, este mult mai mică comparativ cu electrozii de emisie cu țepi, cornier cu țepi și cu sârmă ghimpată. Zona în care potențialul devine jumătate din potențialul maxim este de $(1/10)$ -s pentru electrozii de emisie circulari și stelați, $(1/4)$ -s pentru electrozii de emisie cu țepi, $(1/3)$ -s pentru electrozii de emisie cornier cu țepi și cu sârmă ghimpată (unde s este distanța între electrozii de emisie și cei de depunere). Acestea oferă informații despre tipurile de electrozi de emisie care trebuie folosiți pentru a obține o zonă activă cât mai mare.

4.3. Simulări ale parametrilor electrici și tehnologici ai electrofiltrelor cu plăci cu programul ESPVI 4.0.a

4.3.1. Generalități

Unul dintre programele de calcul utilizate pentru stabilirea performanțelor unui electrofiltru cu plăci, uscat, este programul ESPVI 4.0.a. Modelul specific utilizat în cadrul acestui program, este ultimul dintr-o multitudine de modele cercetate și aprobate de către United States Environmental Agency. Se menționează că în U.S.A. sunt cele mai drastice norme cu privire la protecția mediului. S-au utilizat diferite condiții de funcționare, inclusiv pentru prafuri de înaltă rezistivitate, prin utilizarea curentului redresat și a alimentării intermitente, pentru diferite dimensiuni și distribuții ale particulelor de praf (până la $60 \mu\text{m}$), cu detectarea efectului Corona invers (prin indicația densităților de curent de valoare ridicată), pentru diferite forme ale electrozilor de descărcare [96].

Programul ESPVI 4.0.a (Electrostatic Precipitators V-I Curves and Performance Model) este utilizat din 1992 și are o interfață DOS. Interfața DOS include: File Options, Data Entry, Calculate V-I, Performance, View Results, Output results, Graph Results, Utilities, Exit, fiecare dintre ele având alte submeniuri [157].

Programul are o flexibilitate ridicată deoarece pentru simulări se pot modifica:

a. Parametrii electrofiltrelor: suprafața de colectare specifică; suprafața de colectare; viteza gazului; numărul de secțiuni; lungimea electrofiltrului; lățimea electrofiltrului; înălțimea electrofiltrului; distanța între electrozi; lungimea secțiunilor; numărul de electrozi de emisie; diametrele electrozilor de emisie; amplasarea electrozilor de emisie; tipurile electrozilor de emisie.

b. Parametrii electrici pentru fiecare câmp în parte: tensiuni; densități electrice; raportul tensiune maximă/tensiune medie; tensiune maximă; curent maxim; regim de funcționare (continuu sau intermitent cu intermitența maximă 9).

c. Proprietățile curgerii gazului: temperatura gazului; presiunea; compoziția gazului; vâscozitatea dinamică.

d. Proprietățile particulelor de praf: rezistivitatea; densitatea particulelor; concentrația de praf la intrare; diametrul mediu al particulelor; distribuția particulelor de praf la intrare și la ieșire.

Se pot calcula: caracteristicile curent-tensiune pentru fiecare electrod în parte și fiecare câmp; punctele de funcționare (curent-tensiune) pentru fiecare câmp în parte; performanțele electrofiltrelor.

Se menționează că programul execută ajustări automat ale parametrilor pentru a respecta legăturile fizice dintre parametri. Pentru toți parametri există limitări fizice.

4.3.2. Simulări cu ESPVI 4.0.a

Pentru simulări a fost utilizat ca model electrofiltrul cu plăci 1A de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. care are principalele date constructive date în tabelul 4.2. Electrofiltrul 1B este identic cu electrofiltrul 1A, fiecare electrofiltru fiind împărțit în patru câmpuri (anexa 1).

Tabelul 4.2.

Caracteristici ale electrofiltrului 1A

Câmp	Suprafața de colectare [m ²]	Distanța între electrozii de descărcare și cei de emisie [m]	Lungimea [m]	Înălțimea [m]	Lățimea [m]
1	4868,5	0,175	4,32	12	16,1
2	4868,5	0,175	4,32	12	16,1
3	4868,5	0,175	4,32	12	16,1
4	4868,5	0,175	4,32	12	16,1

Principali parametri utilizați la simulări sunt dați în tabelele 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 și fig.4.18 [165,168].

Tabelul 4.3.

Parametrii generali ai prafului și ai gazului

Rezistivitatea [Ω·cm]	Debitul gazului [m ³ /s]	Viteza gazului [m/s]	Temperatura [°C]	Presiunea [atm]	Concentrația de praf la intrare [mg/m ³]	Vâscozitatea dinamică [kg/(m·s)]
2·10 ¹⁰	114,4	0,592	145	1	24,61	2,6·10 ⁻⁵

Tabelul 4.4.

Caracteristici electrice ale electrofiltrului 1A

Câmpul	Tensiunea [kV]	Densitatea de curent [nA/cm ²]	Tensiunea maximă de vârf [kV]	Curentul maxim [A]	Modul de alimentare
1	47	16	92	1.8	clasic
2	43	11	92	1.8	clasic
3	39	12.9	92	1.8	clasic
4	44	36.9	92	1.8	clasic

Tabelul 4.5.

Poziția electrozilor de emisie într-un canal al unui câmp a electrofiltrului

Număr element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distanța față de intrare [m]	0.09	0.23	0.37	0.51	0.65	0.79	0.93	1.07	1.21	1.35
Număr element	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Distanța față de intrare [m]	1.49	1.63	1.77	1.91	2.05	2.19	2.33	2.47	2.61	2.75
Număr element	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Distanța față de intrare [m]	2.89	3.03	3.17	3.31	3.45	3.59	3.73	3.87	4.01	4.15

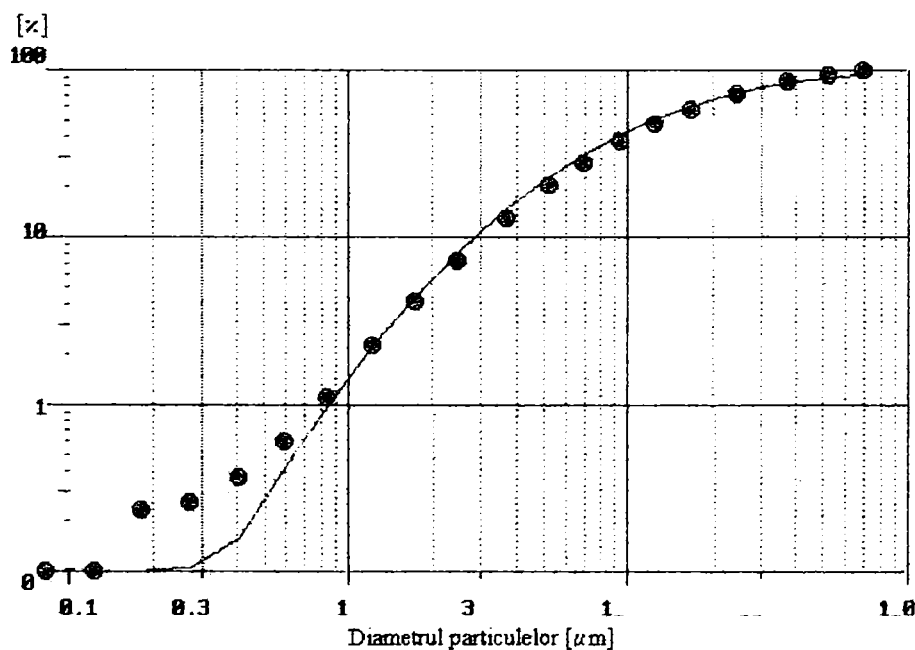


Fig.4.18. Distribuțiile maselor particulelor de praf (considerate a fi sferice) în funcție de diametrul mediu al particulelor de praf

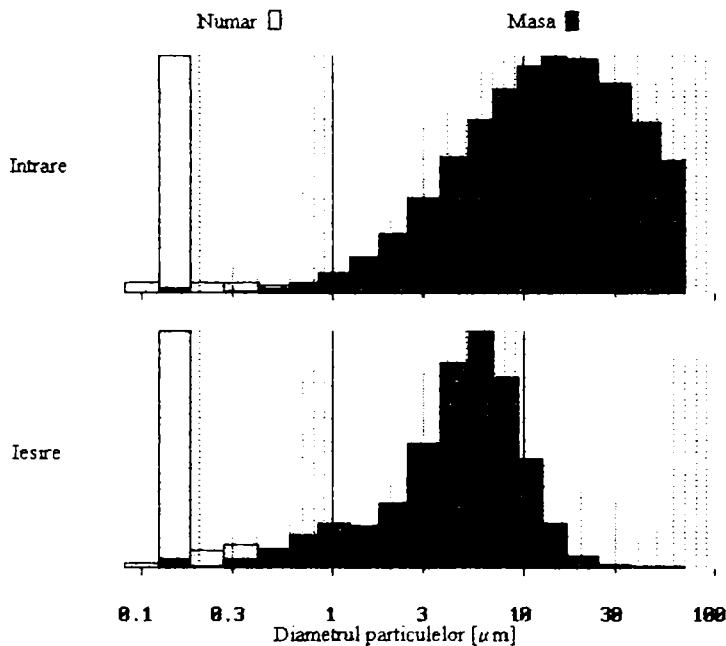


Fig.4.19. Distribuția particulelor de praf la intrare și la ieșire în funcție de numărul și masa lor, la alimentarea cu tensiune alternativă redresată bialternanță la frecvența de 50Hz

Ca marimi de intrare pentru simulări, s-au utilizat și distribuția maselor particulelor de praf în funcție de diametrul mediu al lor (pe clase de diametre). Din fig.4.18 și 4.19 se observă că masa cea mai mare o au particulele cu diametre cuprinse între 1μm și 60 μm. Deși particulele de praf cu diametru sub 1μm au masa mult mai mică decât masa celorlalte particule de praf, numărul lor este mult mai mare. Prin electrofiltru trec necolectate particulele cu diametre sub 10 μm (fig.4.19).

Frecvența tensiunii de alimentare este cea industrială (f=50Hz). La realizarea simulărilor s-au ținut cont de parametrii electrici și tehnologici ale electrofiltrelor de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. din tabelele 3.3 și 3.4, pentru electrofiltrele 1A și 1B. Alimentarea câmpurilor electrofiltrelor au fost simulate conform tabelului 4.6 [104].

Tabelul 4.6.

Alimentări utilizate la simularea funcționării electrofiltrelor

Câmpuri	Alimentare			
	Câmpul 1	Câmpul 2	Câmpul 3	Câmpul 4
Caz I	Redresare bialternanță (clasică)	Redresare bialternanță (clasică)	Redresare bialternanță (clasică)	Redresare bialternanță (clasică)
Caz II	Redresare bialternanță (clasică)	Redresare bialternanță (clasică)	Alimentare intermitentă 1/3	Alimentare intermitentă 1/3

Pentru primele 10 cazuri din tabelul 3.3 s-au măsurat și simulat eficiențele de colectare ale electrofiltrelor 1A și 1B în tabelul 4.7. Se menționează că pentru celelalte exemple din tabelul 3.3 nu s-au deținut suficienți parametrii pentru a efectua simulările.

În tabelul 4.7 s-au notat cu steluță cazurile simulate corespunzătoare realității. Erorile relative foarte mici ale eficienței de praf indică performanțele programului ESPVI 4.0.a în condițiile utilizării parametrilor reali tehnologici și electrici.

Tabelul 4.7.

Eficiența de colectare ale electrofiltrelor din tabelul 3.3 pentru câteva tipuri de alimentări prezentate în tabelul 4.6

Cazuri (tabelul 3.3)	Eficiența de colectare			Eroare relativă $\frac{ \eta_s - \eta_m }{\eta_m} \cdot 100 [\%]$
	Măsurată $\eta_m [\%]$	Simulată $\eta_s [\%]$		
		Caz I (tabel 4.6)	Caz II (tabel 4.6)	
ELF 1A cazI [168]	99,76	99,78*	99,83	0,02
ELF 1B cazI [168]	99,73	99,78*	99,82	0,05
ELF 1A cazII [168]	99,77	99,79*	99,82	0,02
ELF 1B cazII [168]	99,75	99,79*	99,82	0,04
ELF 1A cazIII [168]	99,69	99,8*	99,83	0,11
ELF 1B cazIII [168]	99,7	99,78*	99,83	0,08
ELF 1A cazIV [168]	99,7	99,8	99,83*	0,13
ELF 1B cazIV [168]	99,68	99,78	99,83*	0,15
ELF 1A cazV [168]	99,77	99,78	99,83*	0,06
ELF 1B cazV [168]	99,7	99,78	99,83*	0,13

Tensiunea alternativă redresată bialternanță este utilizată cel mai des la alimentarea câmpurilor electrofiltrelor cu plăci. Alimentarea intermitentă a câmpurilor necesită o comandă specială a dispozitivelor semiconductoare de putere (un puls de tensiune alimentează primarul transformatorului ridicător de tensiune, dintr-un număr impar de pulsuri - maxim 25 - care sunt blocate).

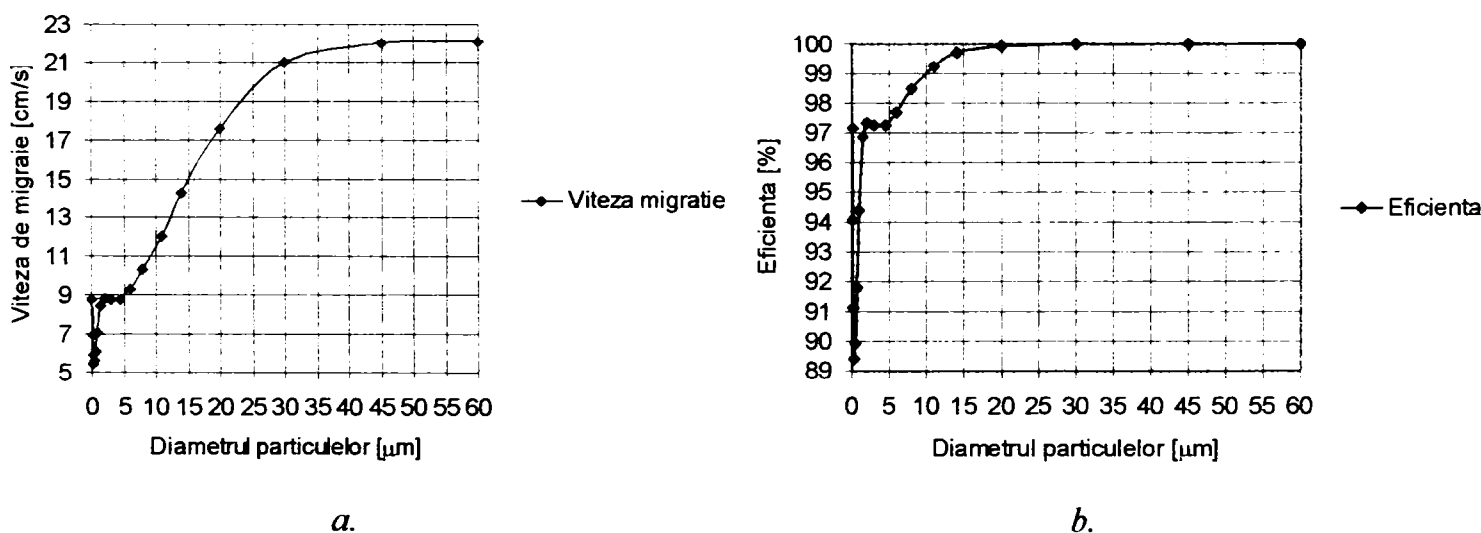


Fig.4.20. Viteza de migrație (a) și eficiența de colectare (b) în funcție de diametrul particulelor de praf, la alimentarea cu tensiune alternativă redresată bialternanță a câmpurilor electrofiltrului 1A

Viteza de migrație și eficiența de colectare sunt mici pentru particulele de praf cu diametre medii sub $5\mu\text{m}$, și mari pentru particulele de praf cu diametre medii mai mari de $10\mu\text{m}$. Deci, la alimentarea cu tensiune alternativă redresată bialternanță, colectarea particulelor de praf de diametre foarte mici (sub $5\mu\text{m}$) este scăzută.

S-au simulat eficiența de colectare (fig.4.21), tensiunile de setare (aparitie) a efectului Corona și de descărcare electrică (fig.4.22), densitățile de curent și intensitățile medii ale câmpului electric (fig.4.23) pentru câmpurile electrofiltrului 1A în funcție de numărul de electrozi de emisie. S-au păstrat aceleași dimensiuni geometrice cu cele ale electrofiltrului 1A, fiind modificate numai numărul de electrozi de emisie din câmpuri.

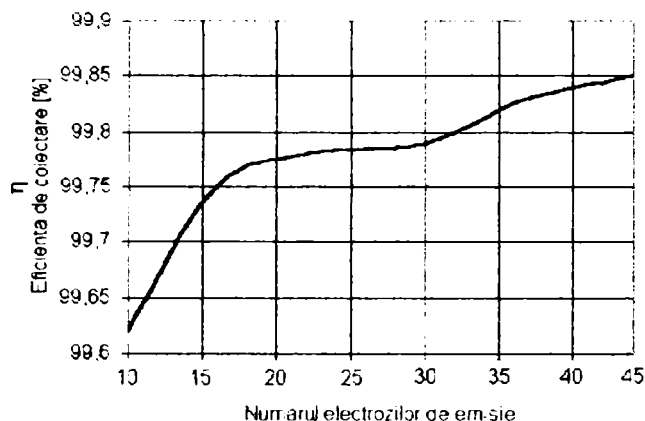


Fig.4.21. Eficiența de colectare a electrofiltrului 1A în funcție de numărul de electrozi de emisie dintr-un canal al câmpurilor

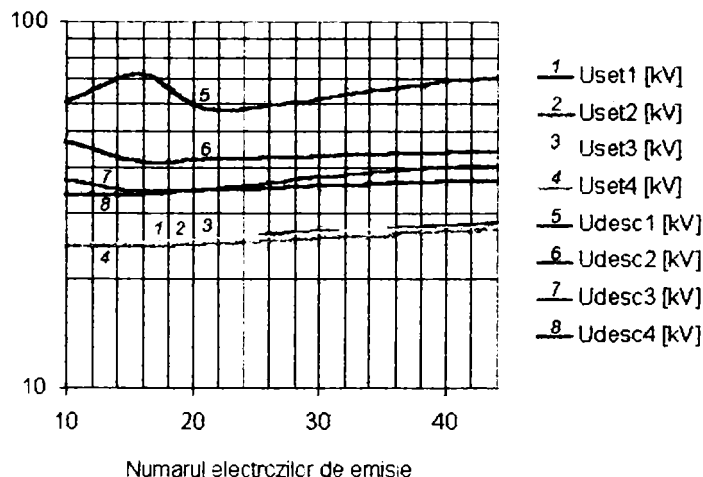


Fig.4.22. Tensiunile de setare Corona și tensiunile de descărcare electrică, pentru cele patru câmpuri în funcție de numărul de electrozi de emisie dintr-un canal al câmpurilor

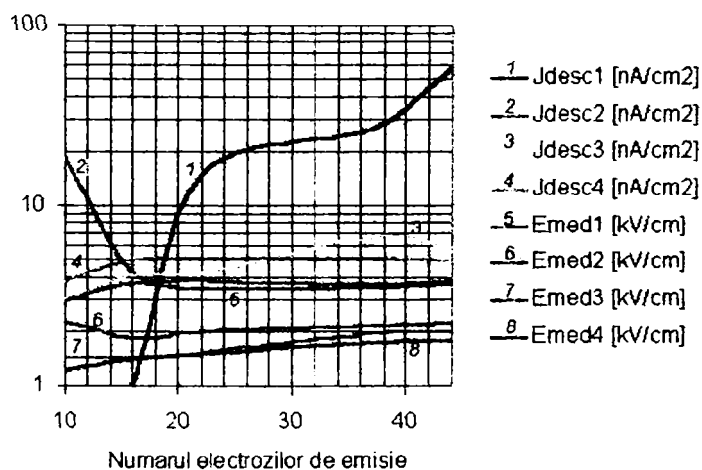


Fig.4.23. Densitățile de curent și intensitățile medii ale câmpurilor electrice, pentru cele patru câmpuri în funcție de numărul de electrozi de emisie dintr-un canal al câmpurilor

S-au simulat eficiența de colectare (fig.4.24), tensiunile de setare (aparitiie) a efectului Corona și de descărcare electrică (fig.4.25), densitățile de curent și intensitățile medii ale câmpului electric (fig.4.26) pentru câmpurile electrofiltrului 1A în funcție de distanța între electrozii de emisie și cei de depunere. S-au păstrat aceleași dimensiuni geometrice cu cele ale electrofiltrului 1A, fiind modificat spațiul între electrozii de emisie și cei de depunere.

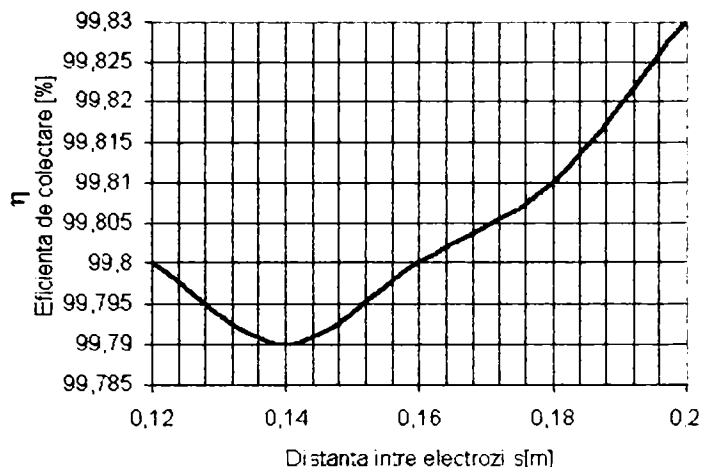


Fig.4.24. Eficiența de colectare a electrofiltrului 1A în funcție de distanța între electrozi

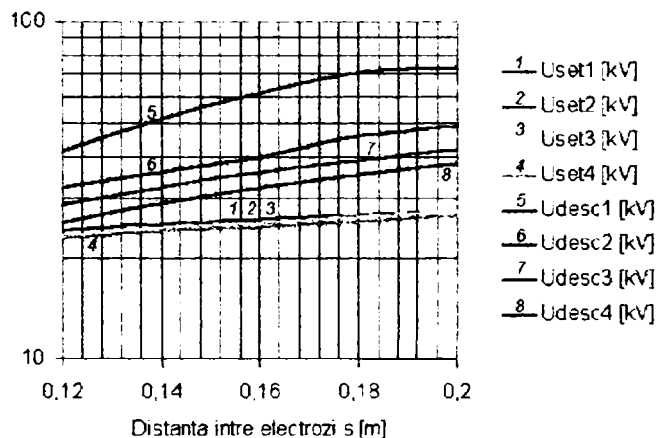


Fig.4.25. Tensiunile de setare Corona și tensiunile de descărcare electrică, pentru cele patru câmpuri în funcție de distanța între electrozi

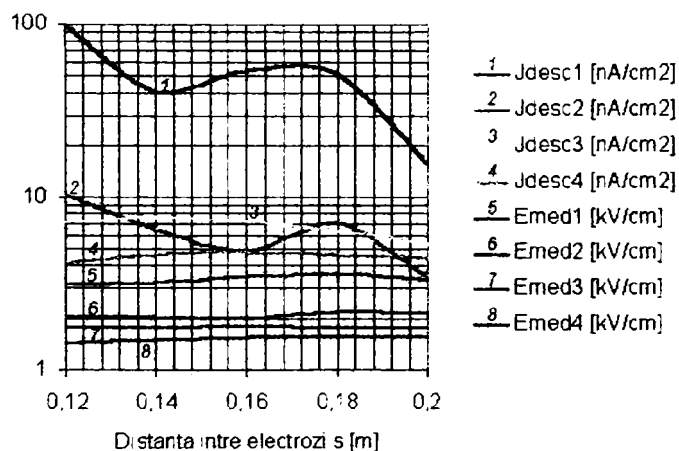


Fig.4.26. Densitățile de curent și intensitățile medii ale câmpurilor electrice, pentru cele patru câmpuri în funcție de distanța între electrozi

S-au simulat eficiența de colectare (fig.4.27), tensiunile de setare (aparitiie) a efectului Corona și de descărcare electrică (fig.4.28), densitățile de curent și intensitățile medii ale câmpului electric (fig.4.29) pentru câmpurile electrofiltrului 1A în funcție de modul de alimentare cu tensiune al câmpurilor electrofiltrului 1A. În fig.4.27, 4.28 și 4.29 s-au notat cu DC alimentare cu tensiune perfect continuă a electrofiltrelor, 1:01 alimentare cu tensiune redresată bialternanță, 1:02 alimentare cu tensiune redresată monoalternanță, 1:03 alimentare intermitentă de ordinul 3, etc.

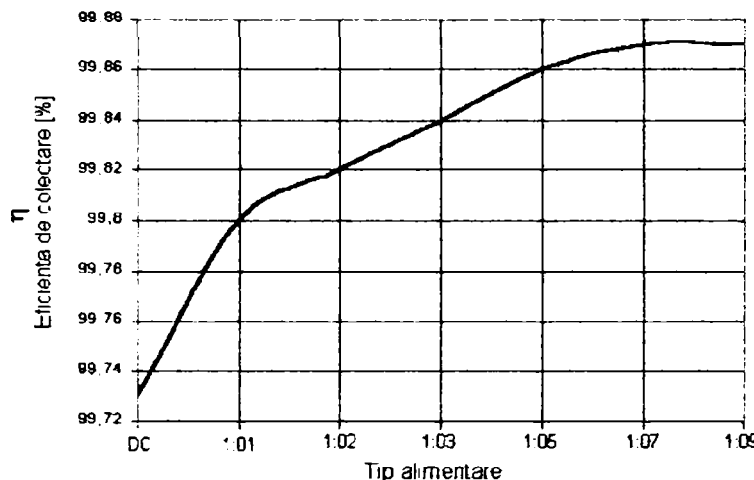


Fig.4.27. Eficiența de colectare în funcție de modul de alimentare a câmpurilor

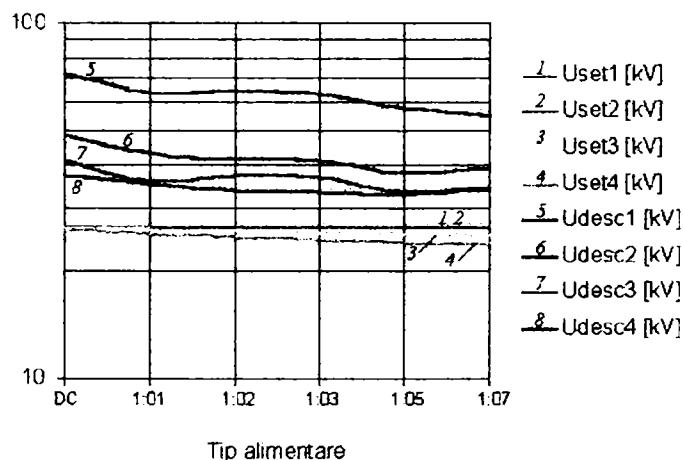


Fig.4.28. Tensiunile de setare Corona și tensiunile de descărcare electrică, pentru cele patru câmpuri în funcție de modul de alimentare al câmpurilor

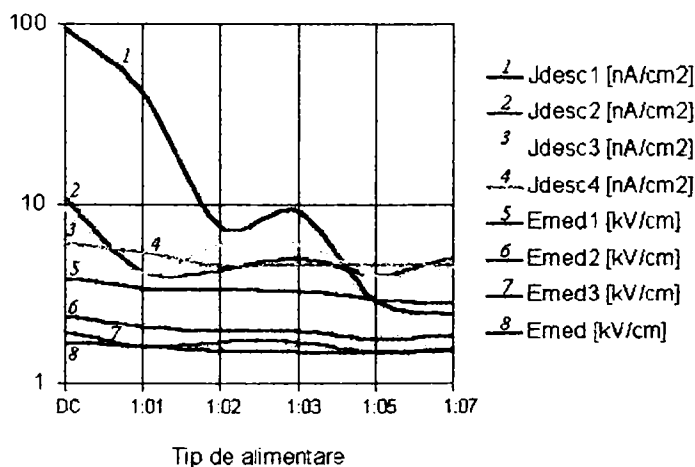


Fig.4.29. Densitățile de curent și intensitățile medii ale câmpurilor electrice, pentru cele patru câmpuri în funcție modul de alimentare al câmpurilor

Odată cu creșterea numărului de electrozi de emisie pe câmpuri crește și eficiența de colectare (fig.4.21). Pentru o anumită valoare a distanței între electrozi ($s=0,14$ m) se obține o valoare minimă a eficienței, după care o dată cu creșterea distanței crește și eficiența de colectare (fig.4.24). Cu creșterea intermitenței alimentării, crește eficiența de colectare (fig.4.27 și tabelul 4.7). Tensiunile de setare Corona cresc ușor odată cu creșterea numărului de electrozi de emisie (fig.4.22) și odată cu creșterea distanței între electrozi (fig.4.25). Pentru același număr de electrozi de emisie (fig.4.22) și aceeași distanță între electrozi (fig.4.25) tensiunile de setare Corona scad spre câmpul de la sfârșit: $U_{set1} > U_{set2} > U_{set3} > U_{set4}$, iar odată cu creșterea intermitenței tensiunile de setare Corona scad ușor (fig.4.28). Tensiunile de descărcare cresc odată cu creșterea numărului de electrozi de emisie (fig.4.22) și odată cu creșterea distanței între electrozi (fig.4.25). Tensiunile de descărcare sunt mai mari pe primele câmpuri decât pe ultimele: $U_{desc1} > U_{desc2} > U_{desc3} > U_{desc4}$ (fig.4.22, 4.25, 4.28). În a doua jumătate a electrofiltrului (câmpurile 3 și 4) densitățile de curent și intensitățile medii ale câmpului electric sunt aproximativ constante odată cu modificarea numărului de electrozi de emisie (fig.4.23) și a distanței între electrozi (fig.4.26). Densitățile de curent și intensitățile medii ale câmpului electric scad pe câmpuri odată cu creșterea intermitenței (fig.4.29). Din caracteristicile curent-tensiune reale (fig.3.22-3.29, măsurate la electrofiltrele 1A și 1B de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.) se observă aproximativ aceleași valori pentru tensiunile de setare Corona, pentru tensiunile de descărcare și a curenților pentru fiecare câmp în parte. Toate aceste simulări și compararea lor cu măsurătorile pe electrofiltre reale indică posibilitatea de a analiza electrofiltrele cu plăci cu ajutorul programului ESPVI 4.0.a, care este considerat la acest moment unul din cele mai performante programe de analiză a electrofiltrelor cu plăci industriale.

4.4. Simulări ale curgerii gazelor cu programul LISA 4.0.1

Pentru simulările curgerii gazelor printr-un electrofiltru cu plăci s-a utilizat programul LISA 4.0.1 (the Linear Static Analysis System). LISA este un pachet pentru analiza cu element finit care are o bază mare de elemente pentru rezolvarea problemelor mecanice, statice și dinamice, a transferului de căldură și a mecanicii fluidelor. LISA este ușor de folosit de utilizator. LISA are o interfață grafică prietenoasă cu utilizatorul și un meniu construit inteligent [158,163].

LISA utilizează metoda Coleski [158] pentru rezolvarea sistemului liniar de ecuații de analiză a elementului finit. Elementele de proiectare pentru două sau trei dimensiuni, sunt izoparametrice. Avantajul utilizării acestei metode este acela că elementele nu trebuie să păstreze unghiuri de 90° (rectangulare) în timpul modelării.

Fiecare element finit are propriul său număr. Acesta nu trebuie confundat cu numerele nodurilor globale care sunt afișate pe ecran. Numerele nodurilor locale sunt utilizate intern de program pentru a putea face calculele.

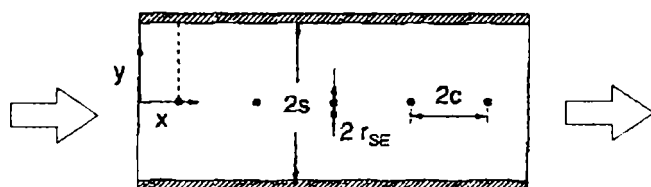
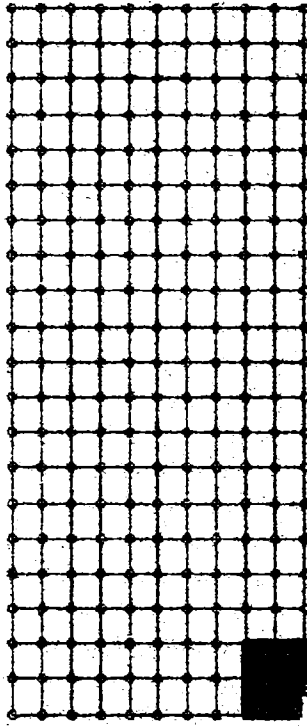


Fig.4.30. Secțiune printr-un canal al unui electrofiltru cu plăci

În fig.4.30 este prezentată o secțiune printr-un canal al unui electrofiltru cu plăci. Distanța între doi electrozi de depunere consecutivi este 2-s, distanța între doi electrozi de emisie consecutivi este 2-c, iar raza electrozilor de emisie este r_{SE} . Pentru electrofiltrele 1A și 1B de la S.C. Electrocentrale Deva S.A., fiecare câmp are 46 de canale.



Elementul care va fi simulat este în partea de sus-stânga din secțiunea transversală a canalului (suprafața dintre sistemul cartezian x-y și linia întrerupă-fig.4.30). Rețeaua este formată din 380 elemente și 435 noduri (fig.4.31) și pentru simulări s-a utilizat elementul ISO 72 (4 noduri). În regiunea electrodului de emisie (în partea de jos, dreapta a rețelei) rețeaua are o finețe mărită în comparație cu alte zone. Rețeaua reprezintă prima parte a canalului dintr-un electrofiltru cu plăci unde gazul intră în electrofiltru.

În general viteza gazului în electrofiltru este cuprinsă între 0,33...0,86 m/s [73,93,125] și depinde de debitul gazelor și de dimensiunile geometrice ale electrofiltrului. Curgerea gazului este sursa pentru deplasarea gazului în direcția 0-x. Curgerea secundară este produsă de electrodul de descărcare și determină deplasarea gazului pe direcția 0-y, cu viteza cuprinsă între 0,01...0,2 m/s (depinde de valoarea tensiunii înalte și de dimensiunile particulelor). Curgerea secundară (viteza de migrație) determină colectarea particulelor de praf din gaze.

Fig.4.31. Rețeaua zonei simulate

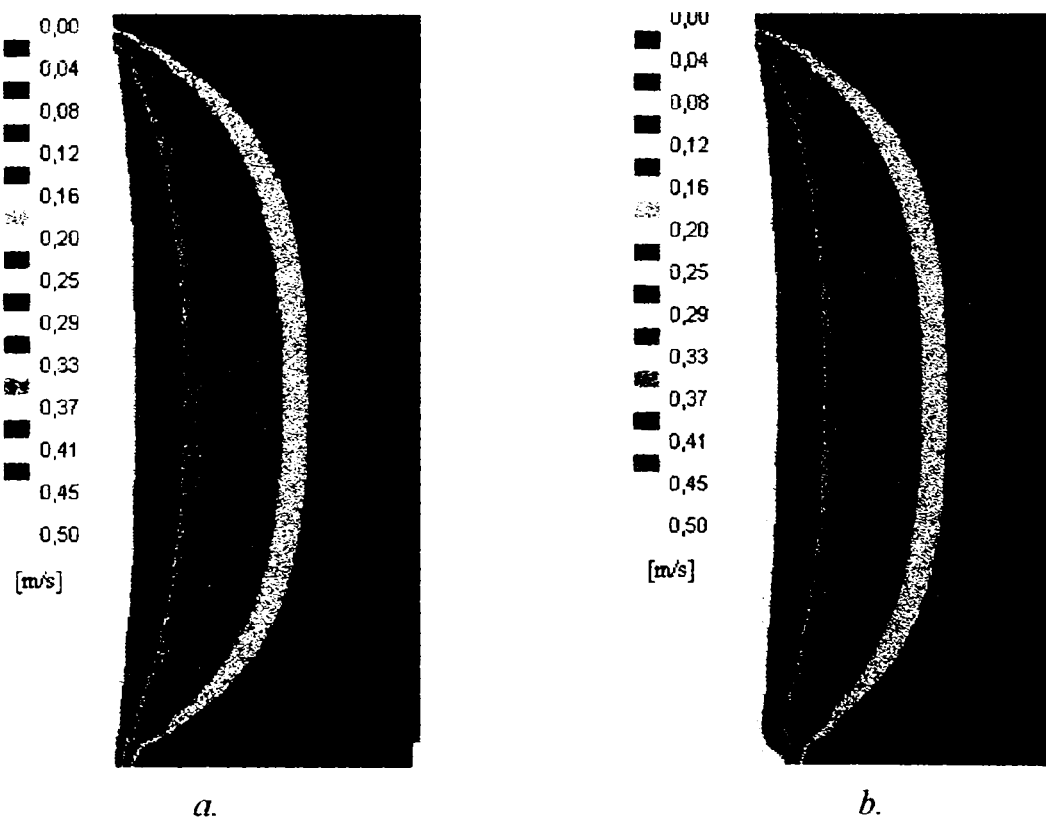


Fig.4.32. Simulări în canalul unui electrofiltru cu plăci în primele momente ale curgerii gazului

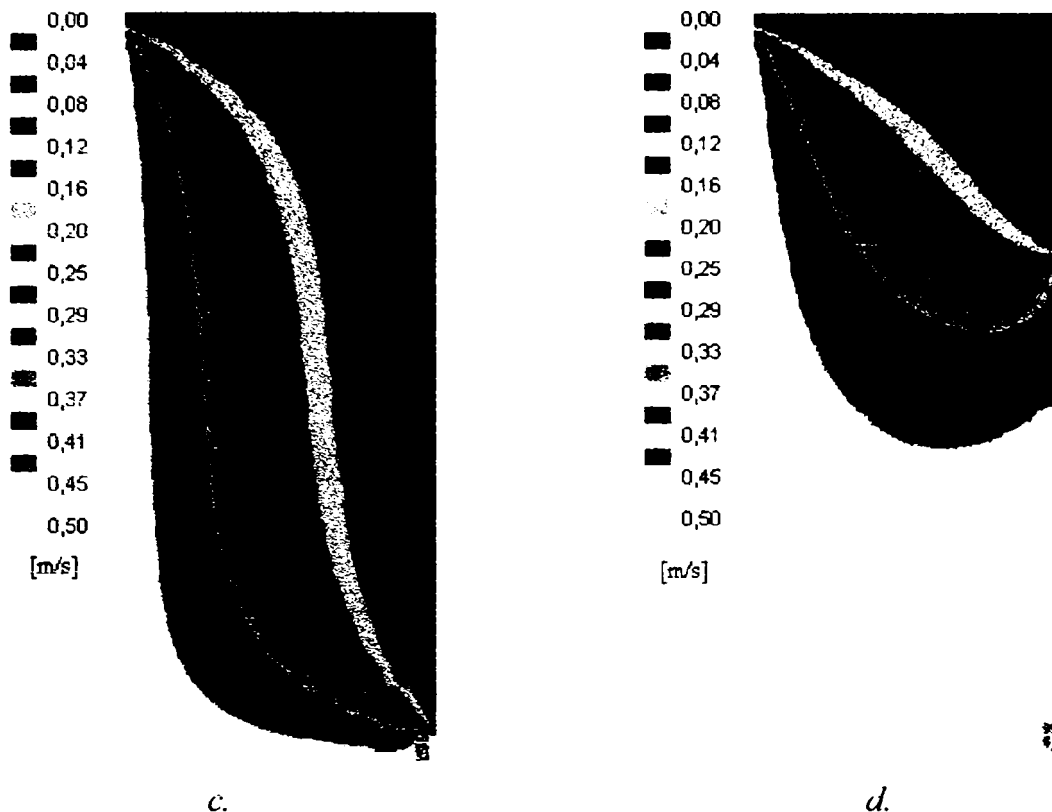


Fig.4.32. Simulări în canalul unui electrofiltru cu plăci în primele momente ale curgerii gazului

La simulări, viteza gazului la intrare s-a considerat uniformă având valoarea de 0,5 m/s, iar electrozii de descărcare determină o viteză de 0,1 m/s. Fig.4.32 (a, b, c, d) prezintă câteva simulări ale curgerii gazului la următoarele momente de timp de la intrarea gazului cu praf în canalul electrofiltrului: 0,01s (a), 0,03s (b), 0,15s (c) și 0,5s (d). Densitatea gazului a fost considerată 1,2 kg/m³, iar presiunea din electrofiltru de 1 atmosferă.

În partea superioară a fiecărei simulări se găsesc electrozii (plăcile) de colectare, iar în partea de jos-stânga electrodul de emisie. Dimensiunile zonei simulate sunt de 80x192 mm, iar pentru electrodul de emisie de 2x6,4 mm.

În realitate, viteza la intrarea în electrofiltru nu este constantă, aceasta modificându-se într-un domeniu mare ($\pm 30\%$) [123], pentru că distribuția de viteze la intrarea în electrofiltru este neuniformă [99].

Simulările din fig.4.32 indică distribuția vitezelor în primele momente ale intrării gazului în canalul electrofiltrului. La început, distribuția de viteze este ca în 4.32. a, b, c după care apare regimul stabilizat ca în fig.4.32.d unde majoritatea suprafeței indică viteză de 0,5 m/s. Electrozii de colectare utilizați sunt plani, dar pot avea și altă formă determinând alte distribuții de viteze [108].

Practic, distribuția de viteze în canalul electrofiltrului poate fi determinată cu anemometre laser, care este o metodă exactă, dar extrem de scumpă; ea se poate folosi numai dacă pereții canalului sunt construiți din material transparent [72,125].

Valoarea medie a debitului de gaze nu are importanță așa mare ca și fluctuațiile turbulente ale gazului care au o influență deosebită asupra eficienței electrofiltrelor, mai ales în cazul în care sunt necesare eficiențe de colectare foarte mari (>95%).

4.5 Concluzii

La simularea parametrilor electrici corespunzători sistemelor de alimentare cu energie electrică a unui câmp s-a utilizat programul PSCAD/EMTDC 3.0.8, pentru electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.. În aceste instalații (fig.4.1 a, b și c) se folosește un variator de tensiune alternativă, la frecvență industrială, cu două tiristoare conectate în antiparalel, partea de comandă a tiristoarelor și blocurile de măsurare și de analiză armonică a diferitelor mărimi. Pentru diferite unghiuri de amorsare s-au obținut prin simulare armonicile curentului (de 1 la 31, numai cele impare) și s-a trasat diagrama în mărimi relative din fig.4.2. Curentul absorbit de sistemul de alimentare va fi mai deformat odată cu creșterea unghiului de amorsare. Modelarea unui câmp electric dintr-un electrofiltru s-a realizat prin conectarea în paralel a unui condensator (capacitatea între electrozi), o rezistență (rezistența prafului) și un varistor (care reprezintă descărcările în electrofiltru). Importanță deosebită o au curentul prin sursă (pentru poluarea armonică) și tensiunea pe electrofiltru (pentru riplurile pe care le are, amplitudinea lor fiind dependentă de frecvența de alimentare). În electrofiltre este importantă menținerea tensiunii la o valoare cât mai apropiată de valoarea tensiunii Corona, fără să apară descărcări între electrozi. Riplul tensiunii la $f=50\text{Hz}$ este de aproximativ 4kV. La această frecvență după o descărcare, revenirea tensiunii se realizează în minimum 10 ms ($T/2$). La electrofiltrele cu multiple descărcări timpul pierdut este mare, iar căderea de tensiune pe electrofiltru are valori mici, care determină înrăutățirea colectării prafului. Utilizarea filtrelor electrice pasive este o soluție de reducere a armonicilor de curent. Un dezavantaj al filtrelor pasive, este acela că pot să apară rezonanțe între impedanța sursei și cea a filtrului pasiv, care determină amplificarea armonicilor.

S-a simulat același sistem de alimentare cu cel din fig.4.1 la care s-a conectat un filtru electric pasiv pentru armonicile 3, 5, 7, 9 și un filtru pentru armonicile superioare (fig.4.7). La simulare, armonicile de curent pentru diferite unghiuri de amorsare au valori mici (armonicile de ordin ridicat se anulează). Curenții devin sinusoidali, pentru orice unghi de amorsare, dar curentul este mai mare în valori efective decât în cazul precedent.

Micșorarea riplurilor de tensiune și micșorarea duratei de revenire a tensiunii constituie principalele motive pentru care s-au simulat sisteme de alimentare a electrofiltrelor la înaltă frecvență. În fig.4.10 s-a prezentat implementarea sistemului de alimentare cu energie electrică cu sursă trifazată, invertor la înaltă frecvență, transformator ridicător de tensiune la înaltă frecvență și punte redresoare de înaltă tensiune și frecvență. În cazul utilizării unui invertor, alimentat de la o sursă trifazată, curentul absorbit de la sursă este puternic deformat, căderea de tensiune pe electrofiltru nu mai prezintă ripluri (fiind cu atât mai mici cu cât frecvența este mai ridicată).

Analiza liniilor de câmp ale potențialului și ale intensităților câmpului electric s-a făcut prin realizarea unui program în C++ pentru o secțiune dintr-un canal al electrofiltrelor de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. S-au utilizat cinci tipuri de electrozi de emisie: cu secțiune circulară, cu secțiune stelată, cu țepi, cornier cu țepi și cu sârmă ghimpată (electrozi utilizați în practică) pentru același tip de suprafață colectoare (electrod tip CSV). Pentru realizarea simulărilor s-a ținut cont de dimensiunile reale ale electrozilor de emisie, ale electrozilor de colectare și de distanța dintre electrozi. Pentru a produce cât mai mulți ioni, zona activă trebuie să fie mai mare și neregulată. În cazul utilizării unor electrozi de emisie circulari sau stelați, zona în care potențialul este ridicat și cu

intensitate a câmpului electric mare, este mult mai mică comparativ cu electrozii de emisie cu țepi, cornier cu țepi sau cu sârmă ghimpată (fig.4.13-4.17). Electrozii cu cât mai multe proeminențe sunt mai utili pentru a realiza o zonă activă mare în electrofiltre.

Analiza performanțelor electrofiltrelor cu plăci de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. (electrofiltrele 1A și 1B) s-a realizat cu programul ESPVI 4.0.a. Acesta este un program care are un model performant al electrofiltrelor cu plăci fiind utilizat și aprobat de U.S. Environmental Agency. Pentru simulări s-a utilizat un electrofiltru de capacitate mare (electrofiltrele 1A și 1B) cu performanțele date în tabelele 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 și 4.6. Pentru a observa performanțele programului ESPVI 4.0.a s-au analizat zece cazuri de funcționare a electrofiltrelor 1A și 1B de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. (tabelul 3.3), erorile relative ale eficienței (față de măsurătorile reale) fiind foarte mici (tabelul 4.7). Aceste erori indică performanțele modelului utilizat la realizarea programului ESPVI4.0.a. Viteza de migrație (fig.4.20.a) și eficiența de colectare (fig.4.20.b) au valori mici pentru particulele cu diametre sub 5 μm și valori mari pentru particulele cu diametre mai mari de 10 μm la alimentarea cu tensiune alternativă redresată bialternanță. Colectarea particulelor de praf cu diametre sub 10 μm constituie o problemă greu de rezolvat [66,67,73]. S-au realizat simulări pentru electrofiltrele 1A și 1B pentru a observa influențele numărului de electrozi de emisie din câmpurile electrofiltrelor (fig.4.21, 4.22, 4.23) și a distanței între electrozi (fig.4.24, 4.25, 4.26). Creșterea numărului de electrozi de emisie are un efect pozitiv asupra performanțelor electrofiltrelor, însă implică creșteri economice importante și dificultate de realizare și întreținere. Distanța mai mare între electrozi determină creșteri ale eficienței de colectare a prafului, dar implică surse de alimentare care să utilizeze tensiuni mai mari. Creșterea intermitenței la alimentarea câmpurilor determină creșteri ușoare ale eficienței de colectare. Tensiunile de setare Corona, de descărcare electrică, densitățile de curent și a intensităților medii ale câmpului electric, au aproximativ aceleași valori cu cele măsurate la electrofiltrele 1A și 1B de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. Determinarea parametrilor utilizați la simulări se face greu și cu anumite aproximații din cauza fenomenele electrice și mai ales a celor tehnologice.

Curgerea gazului printr-un canal al unui electrofiltru cu plăci s-a determinat cu programul LISA 4.0.1 cu ajutorul elementului finit. Zona simulată este prima parte dintr-un canal unde gazul intră în electrofiltru. Zona conține și un electrod de emisie. S-a considerat viteza cazului uniformă la intrarea în canal. Simulările indică distribuțiile vitezelor în primele momente ale trecerii gazului prin canalul electrofiltrului (fig.4.32.a, b, c), după care apare regimul stabilizat (fig.4.32.d). Pentru îmbunătățirea eficienței de colectare ale electrofiltrelor sunt importante diminuarea fluctuațiilor turbulente ale gazului, mai ales când se doresc colectări ale prafului peste 95%.

5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE ALE PARAMETRILOR ELECTRICI ȘI TEHNOLOGICI AI ELECTROFILTELOR

5.1. Analiza parametrilor electrici ai electrofiltrelor

Sursele de alimentare cu tensiune ale câmpurilor electrofiltrelor, utilizate în prezent, sunt variatoare de tensiune alternativă fiind considerate generatoare de putere deformantă. Ele produc poluarea armonică a sistemului electroenergetic. Producerea de perturbații în sistemul electroenergetic se realizează prin distorsionarea formei de undă a curentului [9,10,34,41].

S-au realizat măsurători ale curentului și tensiunii primare pentru două tipuri de instalații de alimentare a electrofiltrelor la S.C. Electrocentrale Deva S.A. (electrofiltrele nr.1 și 5). Date referitoare despre aceste electrofiltre se dau în tabelul 4.2 și anexa 1.

La grupul energetic nr. 1 există două electrofiltre (1A și 1B) care pot filtra împreună până la 1300000 m³/h. Fiecare electrofiltru are patru câmpuri, fiecare câmp fiind alimentat de la câte o sursă separată cu următoarele caracteristici [168]:

- tensiunea de alimentare $U_a=380$ V, 50 Hz;
- curentul nominal $I_a=437$ A;
- puterea aparentă maximă $S_a=166$ kVA;
- tensiunea secundară de vârf $U_{sv}=92$ kV c.c.;
- curentul secundar mediu $I_{smed}=1800$ mA c.c.;
- tensiunea secundară 62 kV c.c.

Pentru a asigura o flexibilitate ridicată, fiecare câmp este împărțit în două secțiuni. Un electrofiltru are mii de electrozi de emisie care se pot rupe din diferite cauze și care ar scoate din funcțiune zona respectivă. Astfel, dacă apare un defect, zona respectivă din electrofiltru se izolează. Pentru alimentarea celor două electrofiltre se folosesc 8 grupuri (câte un grup pentru fiecare câmp, fig.2.14). Distanța (pasul) între electrozii de depunere este de 350 mm.

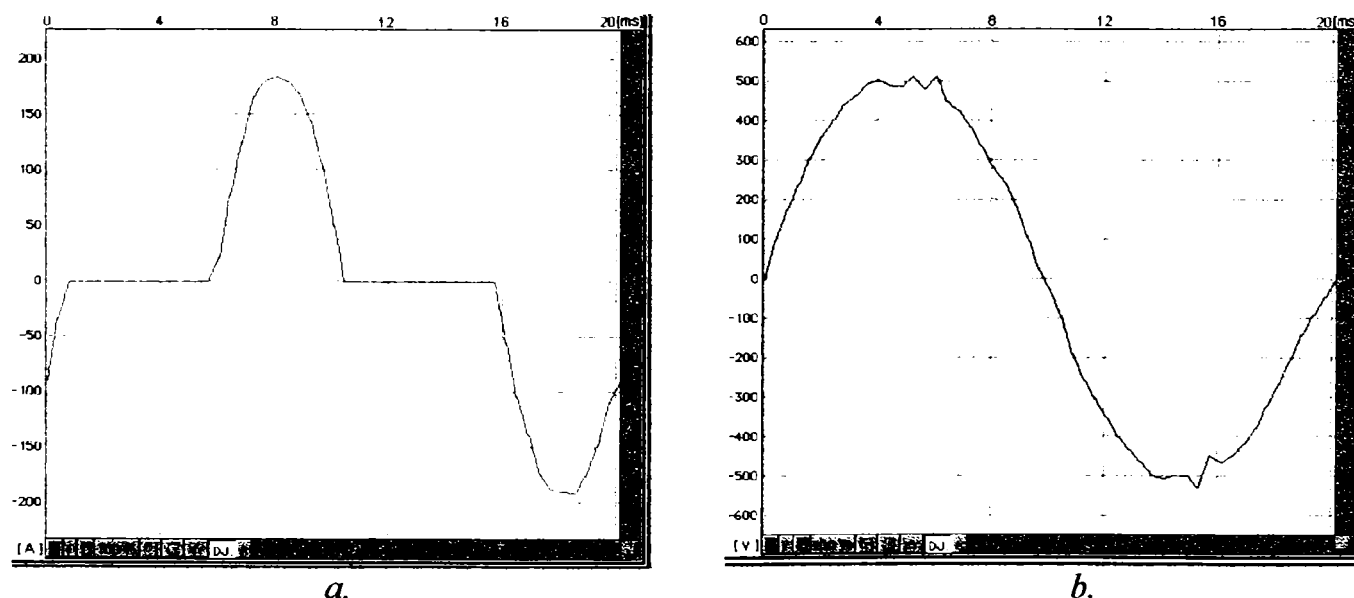


Fig.5.1. Curentul prin sursă (a) și tensiunea de alimentare (b) în cazul I

Sursele de alimentare cu tensiune a electrofiltrelor din grupul energetic nr. 1 sunt comandate prin sisteme cu microprocesor, una dintre comenzi realizându-se în funcție de limitarea curentului secundar. Structura sursei de alimentare este ca în fig.2.14. La realizarea măsurătorilor s-a utilizat un bloc de adaptare și de condiționare a semnalelor (pentru măsurarea tensiunilor cu ajutorul divizoarelor rezistive, iar pentru măsurarea curenților LEM-uri), o placă de achiziție ADA 3100 (cu softul SignalView 1.3) și un calculator personal. Semnalele achiziționate au fost verificate cu ajutorul unui osciloscop cu memorare Hameg 402 care are și posibilitatea de tipărire a semnalului vizualizat. Analiza armonică s-a realizat cu softul NextView 1.01. Măsurătorile următoare s-au efectuat în cazul în care curentul secundar I_s s-a limitat la valoarea maximă de 902 mA c.c în electrofiltru (cazul I). Pornind de la formele de undă ale curentului și tensiunii, s-a calculat puterea aparentă (pe o perioadă), apoi utilizându-se transformata Fourier rapidă s-au determinat amplitudinile pentru primele 40 de armonici atât pentru curent cât și pentru tensiune.

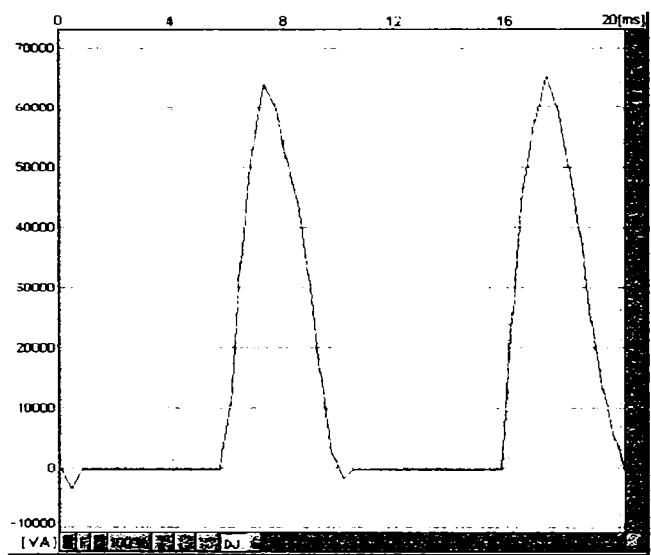


Fig.5.2. Puterea aparentă în cazul I

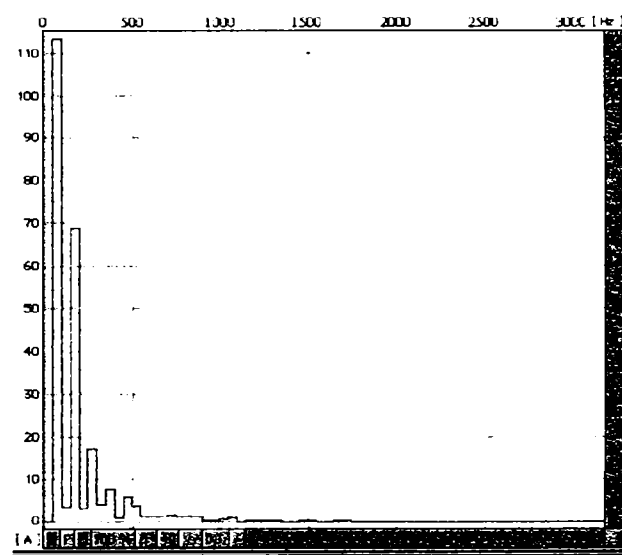
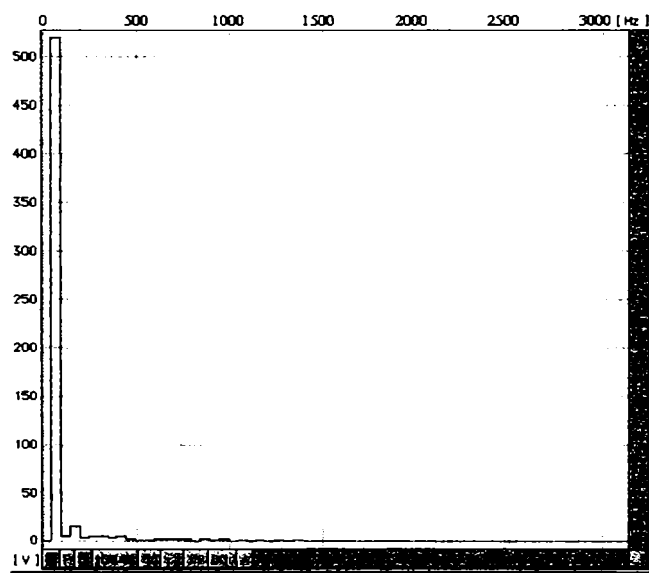
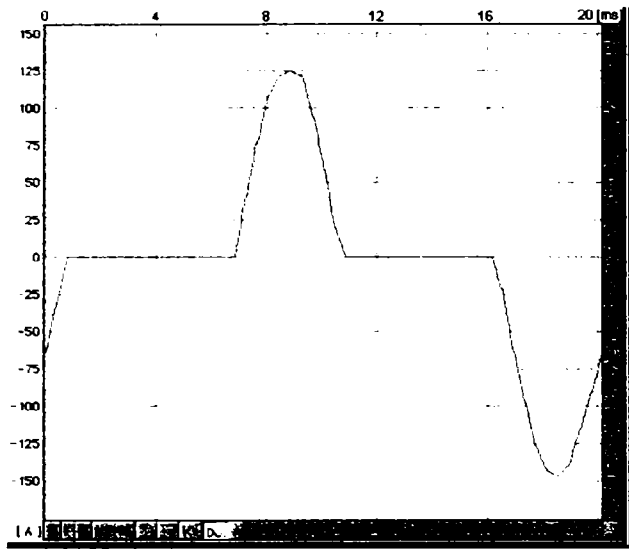


Fig.5.3. Amplitudinile armonicilor curentului prin sursă în cazul I

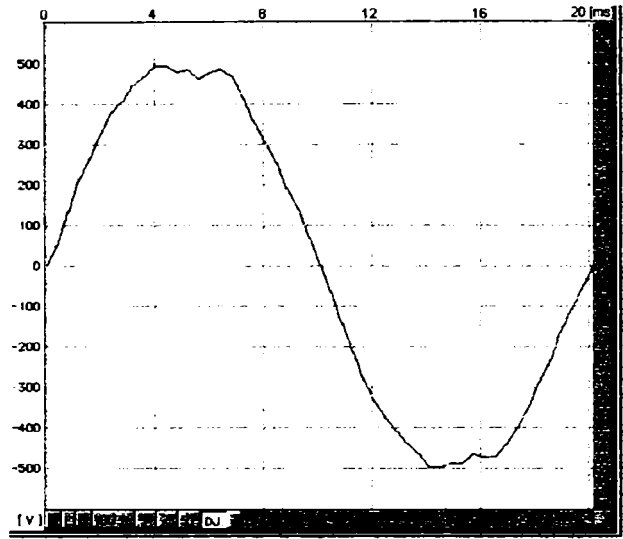


5.4. Amplitudinile armonicilor tensiunii de alimentare pentru cazul I

Al doilea caz, utilizează o limitare a curentului secundar I_s la valoarea maximă de 589 mA c.c în electrofiltru (cazul II).



a.



b.

Fig.5.5. Curentul prin sursă și tensiunea de alimentare în cazul II

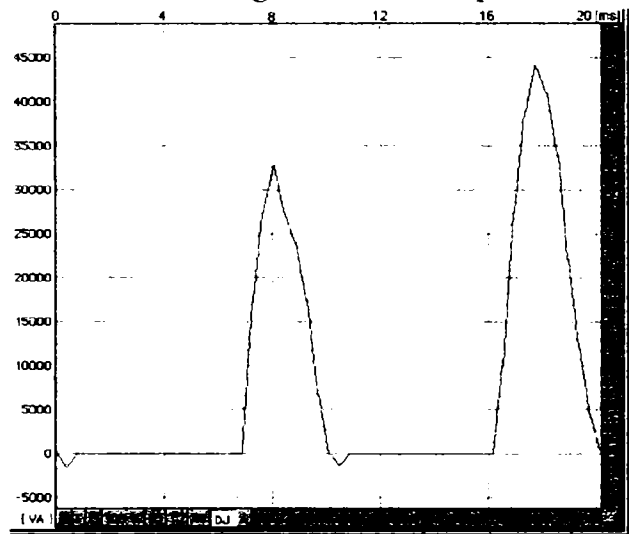


Fig.5.6. Puterea aparentă în cazul II

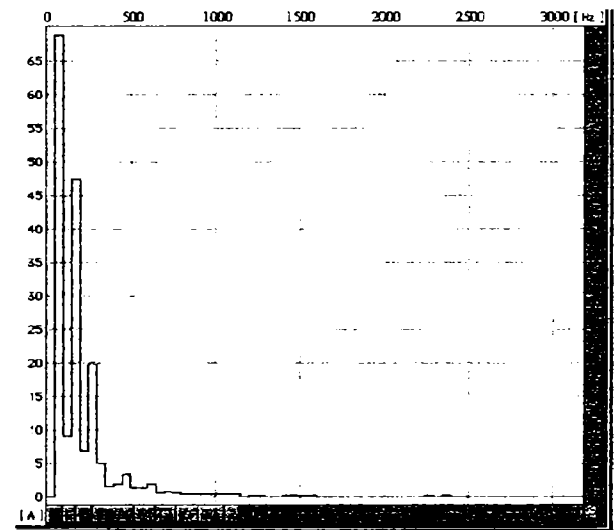


Fig.5.7. Amplitudinile armonicelor curentului prin sursă cazul II

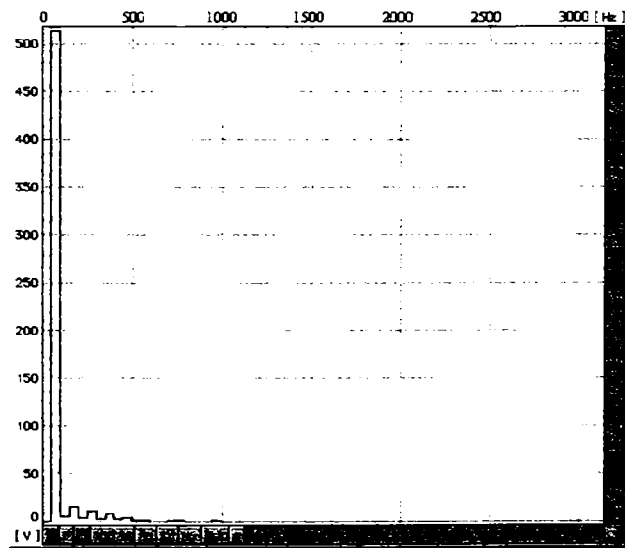


Fig.5.8. Amplitudinile armonicelor tensiunii de alimentare cazul II

Valoarea efectivă a unei mărimi periodice, în cazul general este [116]:

$$F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2 dt} \quad (5.1)$$

Această mărime (tensiune sau curent) se poate calcula și în funcție de amplitudinile componentei continue și a armonicilor:

$$F = \sqrt{F_0^2 + F_1^2 + F_2^2 + \dots + F_n^2} \quad (5.2)$$

Puterea activă pentru fundamentală este:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (5.3)$$

Puterea aparentă a fundamentalei este:

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 \quad (5.4)$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{(U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1)^2 + (U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1)^2} \quad (5.5)$$

Relația între factorul de distorsiune global k_{dp} [-], factorul de putere al fundamentalei k_{pf} [-] și factorul de putere deformant k_{pd} [-] este [41]:

$$k_{dp} = k_{pf} + k_{pd} = \frac{P_1}{S_1} + \frac{P_d}{S_1} \quad (5.6)$$

unde P_d [W] este puterea activă reziduală deformantă:

$$P_d = \sqrt{P^2 - P_1^2} \approx \sqrt{P_2^2 + P_3^2 + \dots + P_n^2} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} P_n^2} \quad (5.7)$$

Curentul rezidual deformant este:

$$I_d = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (5.8)$$

Tensiunea reziduală deformantă este:

$$U_d = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \quad (5.9)$$

Coeficientul de distorsiune (pentru curent sau tensiune) care sunt utilizați la interpretarea distorsiunii armonice:

$$k_d = \frac{F_d}{F_1} = THD \quad (5.10)$$

Tabelul 5.1.

Mărimi determinate pentru cele două cazuri (cazul I și II)

	I [A] (5.2)	P ₁ [kW] (5.3)	S ₁ [kVA] (5.4)	P _d [kW] (5.7)	k _{pf} [-] (5.6)	k _{pd} [-] (5.6)	k _{dp} [-] (5.6)	k _{di} [-] (5.10)	k _{du} [-] (5.10)
Cazul I	94,65	16,017	30,227	0,514	0,529	0,017	0,546	0,628	0,037
Cazul II	61,48	7,526	17,81	0,159	0,422	0,0089	0,431	0,775	0,036

Se face o comparație între amplitudinile armonicilor de curent și de tensiune măsurate și nivelurile limită admise pentru stabilirea efectului regimului deformant conform PE-143/94 - RENEL (norma românească PE 143/94) [41].

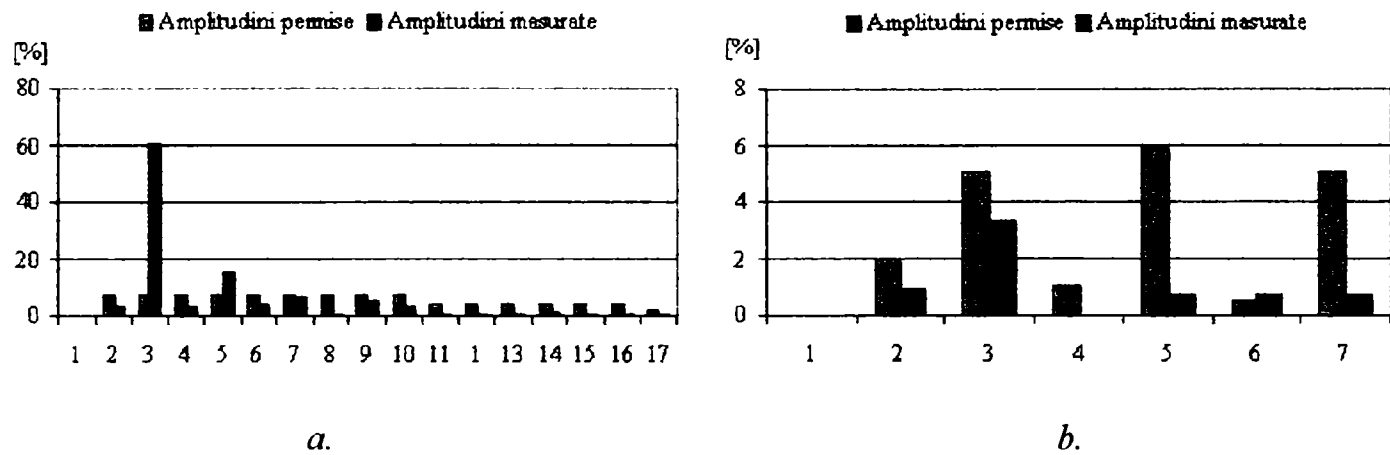


Fig.5.9. Analiza armonicilor de curent (a) și de tensiune (b) în cazul I

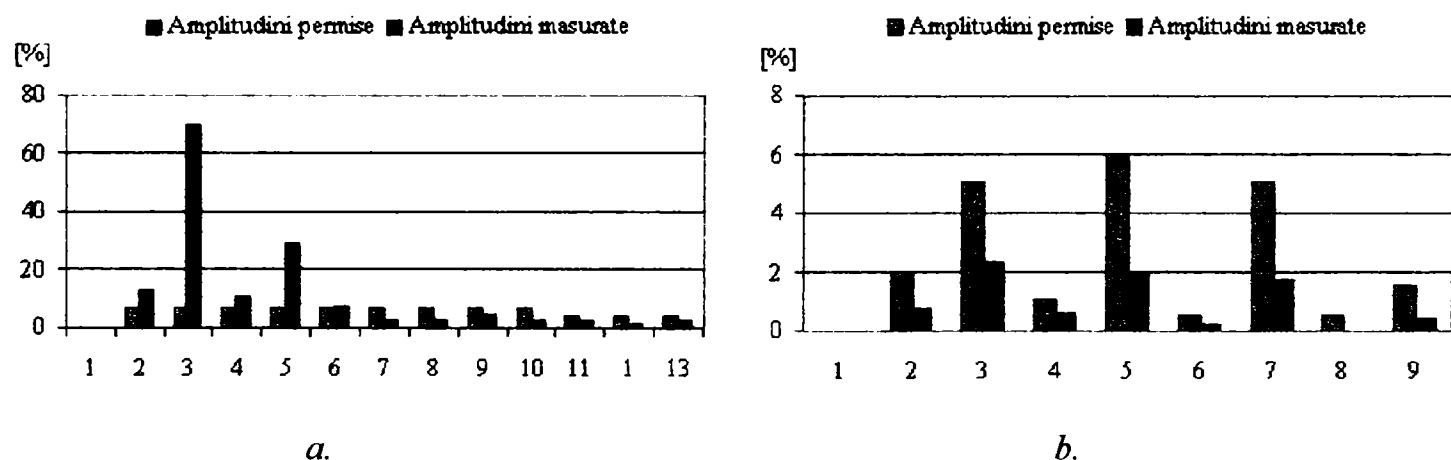


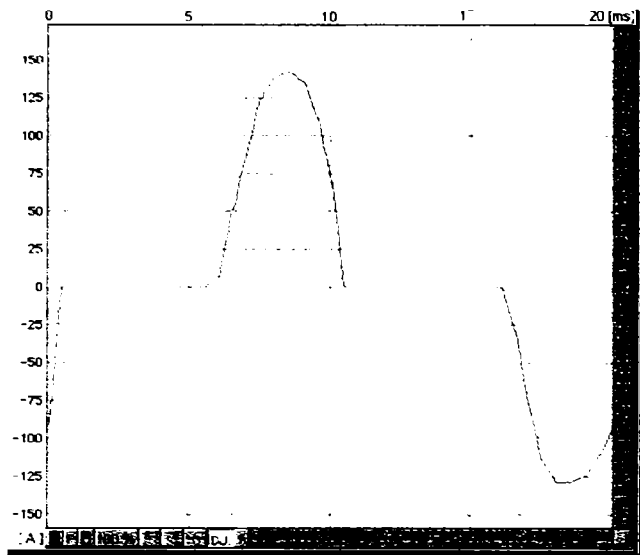
Fig.5.10. Analiza armonicilor de curent (a) și de tensiune (b) în cazul II

Măsurătorile s-au efectuat asupra câmpului nr.4 al electrofiltrului 1A.

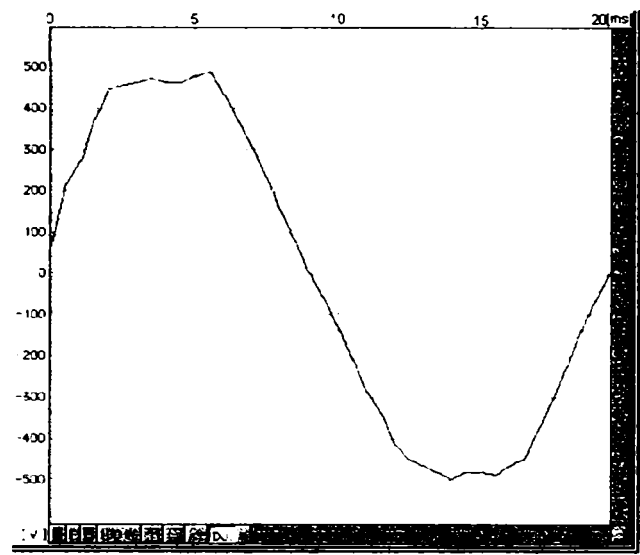
La grupul energetic nr. 5 există două electrofiltre (5A și 5B) care pot filtra împreună până la 1500000 m³/h (anexa 1). Fiecare electrofiltru are trei câmpuri, fiecare câmp fiind alimentat de la câte o sursă separată cu următoarele caracteristici [166]:

- tensiunea de alimentare $U_a=380$ V, $\pm 10\%$, 50 Hz;
- curentul nominal $I_a=595$ A;
- puterea aparentă maximă $S_a=238$ kVA;
- tensiunea secundară de vârf $U_{sv}=111$ kV c.c.;
- curentul secundar mediu $I_{smed}=2000$ mA c.c.;
- tensiunea secundară 65 kV c.c.

Pentru alimentarea electrofiltrelor se folosesc 6 grupuri. Distanța între electrozii de emisie și cei de depunere este de 300 mm. Sursele de alimentare cu tensiune a electrofiltrelor din grupul energetic nr.5 sunt comandate prin sisteme analogice fabricate în țară. Se prezintă în continuare măsurători la electrofiltrele grupului energetic nr.5 (cazul III).



a.



b.

Fig.5.11. Curentul sursei (a) și tensiunea de alimentare (b) în cazul III

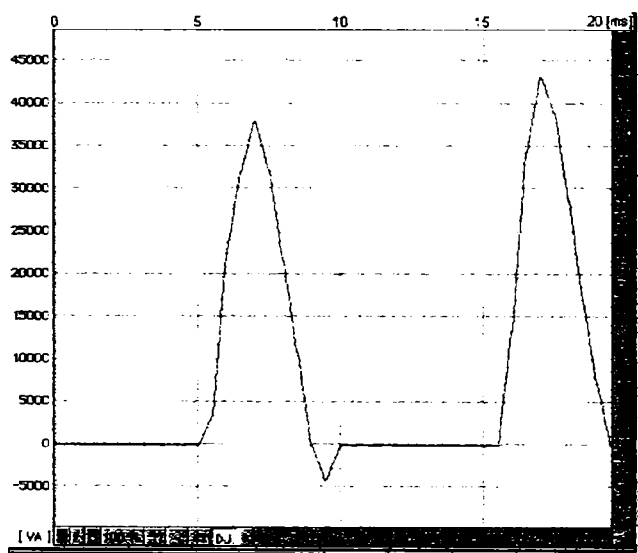


Fig.5.12. Puterea aparentă în cazul III

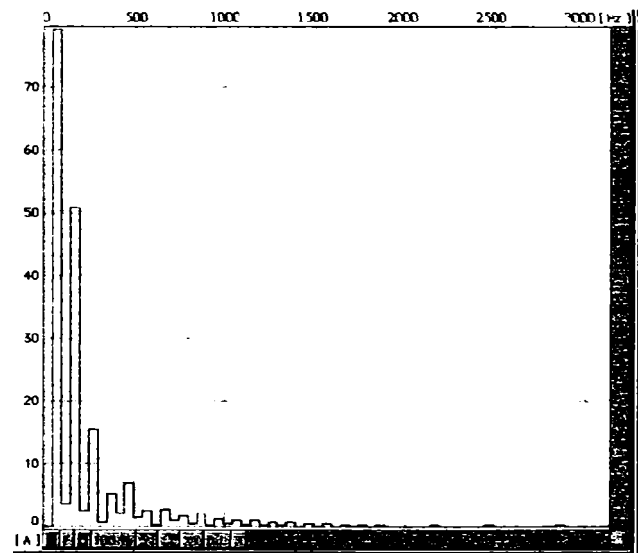


Fig.5.13. Amplitudinile armonicilor curentului sursei în cazul III

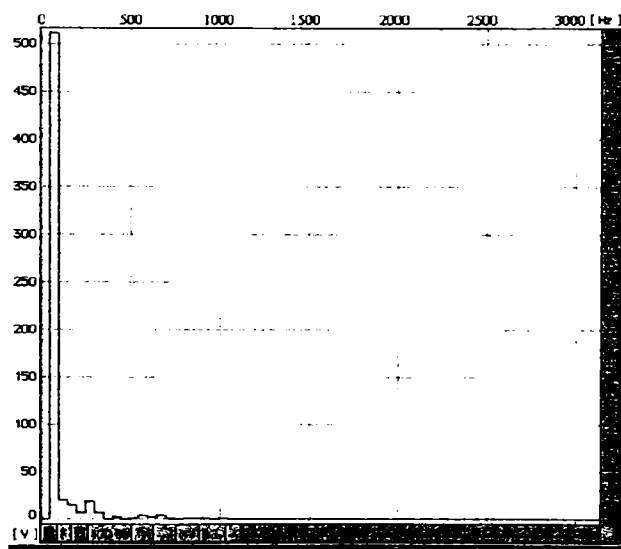


Fig.5.14. Amplitudinile armonicilor tensiunii de alimentare în cazul III

Tabelul 5.2.

Mărimi determinate pentru cazul III

	I [A] (5.2)	P ₁ [kW] (5.3)	S ₁ [kVA] (5.4)	P _d [kW] (5.7)	k _{pf} [-] (5.6)	k _{pd} [-] (5.6)	k _{dp} [-] (5.6)	k _{di} [-] (5.10)	k _{du} [-] (5.10)
Cazul III	63.38	8.886	20.272	0.339	0.438	0.0167	0,455	0.686	0.068

Se analizează amplitudinile armonicilor curentului și tensiunii comparativ cu cele limită.

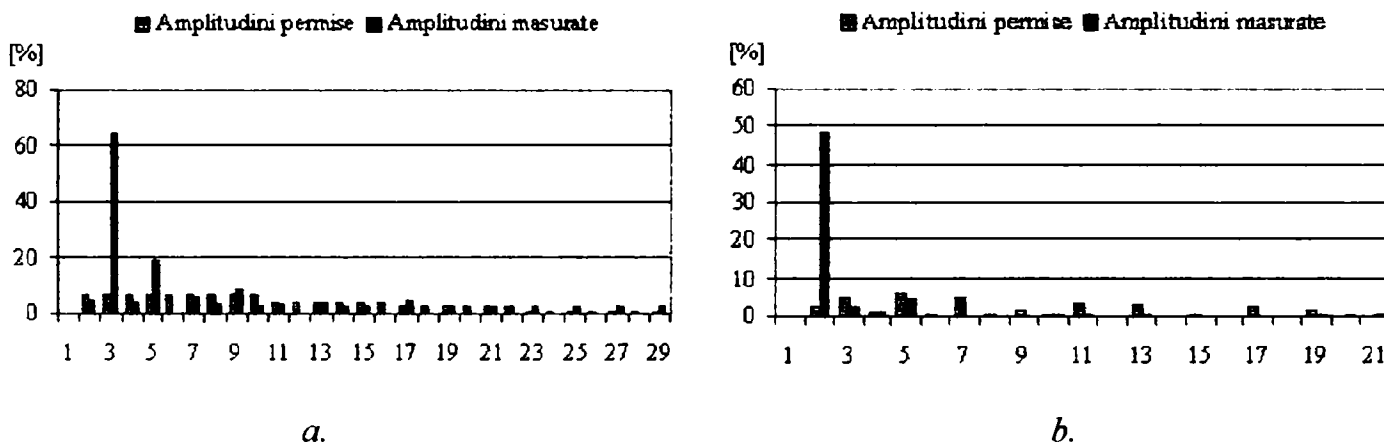


Fig.5.15. Analiza armonicilor de curent (a) și de tensiune (b) în cazul III

Măsurătorile s-au efectuat asupra câmpului nr.1 al electrofiltrului 5A.

5.2. Analiza parametrilor tehnologici ai electrofiltrelor

Pentru determinarea distribuției particulelor de praf se folosește sortarea prin strecurare (cernere - SR EN 244971). Analiza se efectuează cu ajutorul seriilor de site standarnizate, site executate din sârmă împletită (din bronz sau alamă). O serie de site formează un ansamblu dispus în ordinea creșterii fineții ochiurilor și prevăzut cu un colector la partea inferioară și un capac la partea superioară. Calculul conținutului procentual al fracțiunilor pe fiecare sită (A_i) se face raportând greutatea diferitelor fracțiuni (a_i) la suma lor:

$$A_i = \frac{a_i}{\sum_{j=1}^n a_j} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.11)$$

unde a_j [kg], $j = \overline{1, n}$ sunt masele fracțiunilor de pulbere.

Pornind de la datele furnizate prin cernere, se poate calcula diametrul mediu al particulelor de praf (se face simplificarea că particulele de praf au formă sferică și în cadrul unei fracțiuni de pulbere, distribuția particulelor de praf în funcție de dimensiune se supune legii distribuției lui Gauss). Teoretic diametrul mediu al particulelor de praf se calculează cu:

$$d_{pmed} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_{pi} \quad (5.12)$$

d_{pmed} [mm] - diametrul mediu al fracțiunilor de pulbere din proba analizată, d_{pi} [mm] - diametrul echivalent real a unei particule de pulbere, n - numărul de particule de pulbere.

În realitate, pentru determinarea diametrului mediu pe fiecare fracție, se utilizează valorile minime d_{min} (diametrul ochiurilor sitei de cernere) și a valorii maxime d_{max} (diametrul ochiurilor sitei de cernere superioare).

$$d_{pmed} = \frac{d_{pmin} + d_{pmax}}{2} \tag{5.13}$$

Diametrul mediu al particulelor de praf pentru toată proba se determină cu:

$$d_{pmed} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{d_{pmedi}}} \tag{5.14}$$

Pentru a determina curgerea pulberii, o anumită cantitate de praf se introduce într-un cilindru fără fund, care este așezat pe o sticlă. La ridicarea cilindrului se formează un con de diametru d [cm] și înălțime h [cm].

$$tg\varphi = \frac{2 \cdot h}{d} \tag{5.15}$$

unde φ [°] se numește unghi de taluz.

Electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. au caracteristicile prezentate în anexa 1. Fiecare grup energetic (notat simbolic cu 1, 2, ...,6) are câte două electrofiltre notate cu A și B și fiecare electrofiltru are două ramuri pentru a asigura o distribuție mai bună a vitezelor gazului.

Caracteristicile combustibilului folosit de S.C. Electrocentrale Deva S.A. [166]:

- Tip combustibil: huilă și mixte
- Putere calorifică inferioară: 3200 Kcal/kg
- Cenușă: 48 %
- Umiditate: 10 %
- Sulf: 1,2-2 %
- Nears: 2 %.

Tabelul 5.3.

Compoziția chimică ale cenușii din buncărele electrofiltrelor [165]

Elemente determinate	U.M. [%]
SiO ₂	54,2
Fe ₂ O ₃	8,95
Al ₂ O ₃	21,8
CaO	3,6
MgO	2,15
Alte elemente	9,3

Unghiul de taluz se determină cu relația (5.15): $\varphi=40^{\circ}$. Utilizând date din [166,172] obținute cu sisteme prin cernere s-a determinat distribuția pe fracții granulometrice a prafului colectat de electrofiltrele nr.1A (fig.5.16) cu patru câmpuri și nr.5A (fig.5.17) cu trei câmpuri.

Pentru electrofiltrul nr.1A, cu ajutorul relației (5.14) s-au determinat diametrele medii ale particulelor de praf colectate pe câmpuri:

- câmpul 1 $d_{pmed1}=92,6 \mu\text{m}$;
- câmpul 2 $d_{pmed2}=72,1 \mu\text{m}$;
- câmpul 3 $d_{pmed3}=60,8 \mu\text{m}$;
- câmpul 4 $d_{pmed4}=45,7 \mu\text{m}$.

Pentru electrofiltrul nr.5A, cu ajutorul relației (5.14) s-au determinat diametrele medii ale particulelor de praf colectate pe câmpuri:

- câmpul 1 $d_{pmed1}=73,4 \mu\text{m}$;
- câmpul 2 $d_{pmed2}=45,5 \mu\text{m}$;
- câmpul 3 $d_{pmed3}=50,1 \mu\text{m}$.

Distribuția particulelor de praf, analizat pe fracții granulometrice, sunt prezentate în fig.5.16 și 5.17.

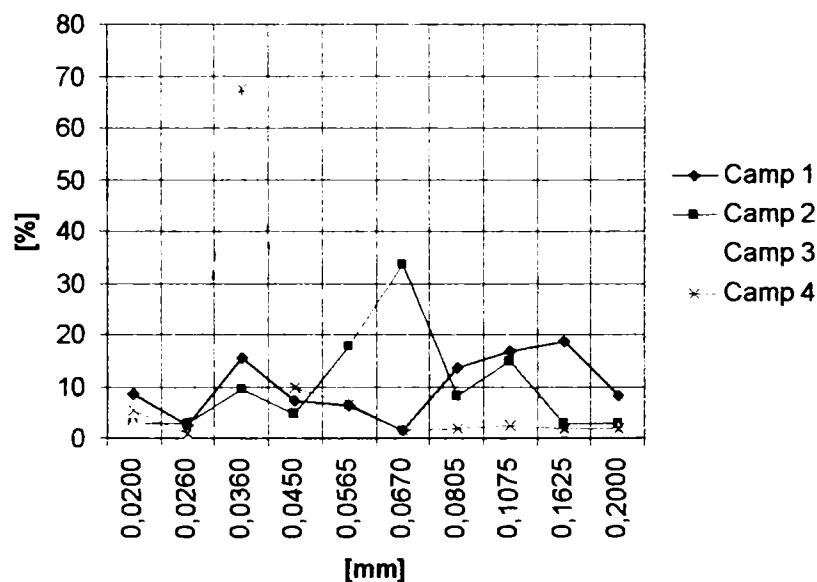


Fig.5.16. Distribuția pe fracții granulometrice ale prafului pentru electrofiltrul 1A

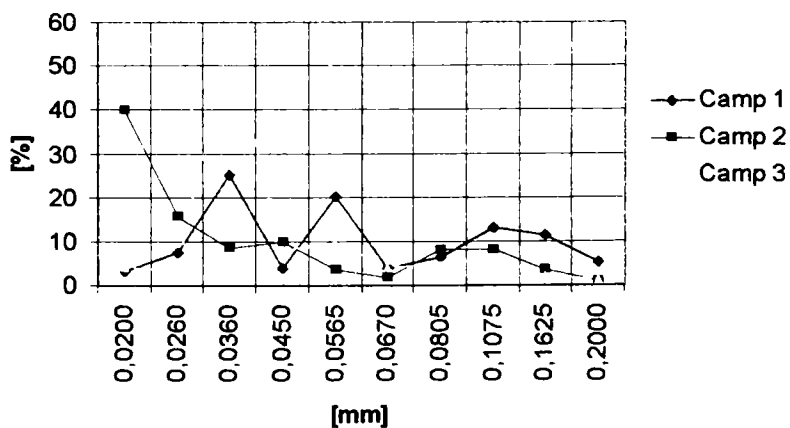


Fig.5.17. Distribuția pe fracții granulometrice ale prafului pentru electrofiltrul 5A

Pentru o mărire a eficienței electrofiltrelor trebuie luați în considerare și parametrii tehnologici [138]: modul cum se zdrobește combustibilul, calitatea combustibilului, cum se realizează arderea în cazane, compoziția chimică a prafului, caracteristicile fizice ale prafului și nu în ultimul rând modul constructiv al electrofiltrului.

În urma analizei chimice a prafului depozitat în buncăre s-a constatat o concentrație mare de SiO_2 care determină rezistivitatea mare a prafului, și implicit o tensiune de alimentare mai mare a câmpurilor electrofiltrelor. Utilizarea unui combustibil cu conținut mare de cenușă (48%) determină mai mult praf în gazele rezultate în urma arderii. Umiditatea crescută a combustibilului face ca arderea să fie incompletă.

La electrofiltrele nr. 1A și 5A, în urma analizei distribuției pe fracții granulometrice (fig. 5.16 și 5.17) se trag următoarele concluzii:

- dimensiunile particulelor sunt mici, sub $200 \mu\text{m}$;
- câmpurile de intrare colectează particule de praf cu diametre mai mari (peste $50 \mu\text{m}$);
- câmpurile de ieșire colectează particule de praf cu diametre mai mici (sub $50 \mu\text{m}$);
- particulele cu diametre sub $20 \mu\text{m}$ (care sunt cele mai numeroase) se colectează cel mai puțin;
- pentru electrofiltrul 1A, cu patru câmpuri, se constată o filtrare a particulelor de praf cu diametre din ce în ce mai mici spre ieșire ($d_{pmed1} > d_{pmed2} > d_{pmed3} > d_{pmed4}$);
- pentru electrofiltrul 5A, cu trei câmpuri, se constată că nu se mai respectă o colectare a prafului cu diametre din ce în ce mai mici odată cu trecerea prin câmpuri, aceasta datorându-se unei alimentări defectuase a câmpurilor electrofiltrului.

Pentru electrofiltrele S.C. Electrocentrale Deva S.A., se face o analiză a distribuției vitezelor gazului în racordurile de intrare și de ieșire la electrofiltrele nr. 1 și 5 [166,168].

În fig. 5.18 se prezintă amplasarea sondelor pentru măsurarea vitezei gazului din electrofiltrului nr. 1 (măsurarea vitezei gazului se realizează la fel pentru electrofiltrului nr. 5). Intrarea gazelor în electrofiltru se face prin două ramuri separate, ramura 1 și 2. Temperatura de intrare a gazului este de 150°C . S-a ales soluția cu două ramuri la intrare, pentru o mai bună distribuție a vitezelor gazului, cu condiția ca debitele de pe cele două ramuri să fie aproximativ egale. Vitezele gazului în diferite puncte, s-au măsurat în planul y-z (fig. 5.18), la intrare și la ieșire, cu ajutorul tubului Pitot-Prandtl și micromanometru diferențial în prizele de măsură amplasate pe ramurile de intrare și ieșire, măsurătorile efectuându-se în 10 zone pe fiecare priză (în direcția z, H_1, H_2, \dots, H_{10} , fig. 5.18). Viteza medie a gazului nu se poate măsura în interiorul electrofiltrului cu aparate de măsură clasice. În ramurile 1 și 2 de la intrare s-au efectuat măsurători în 5 zone pe fiecare ramură (în direcția y, L_1, L_2, \dots, L_5 , fig. 5.18), iar la ieșire în 12 zone ramură (în direcția y, L_1, L_2, \dots, L_{12} , fig. 5.18). Tubul Pitot-Prandtl, măsoară presiunea totală p_0 și presiunea statică p_s , presiuni care sunt determinate de curgerea gazului prin conducte. Micromanometrul diferențial măsoară diferența de presiune $p_0 - p_s$ care este proporțională cu viteza.

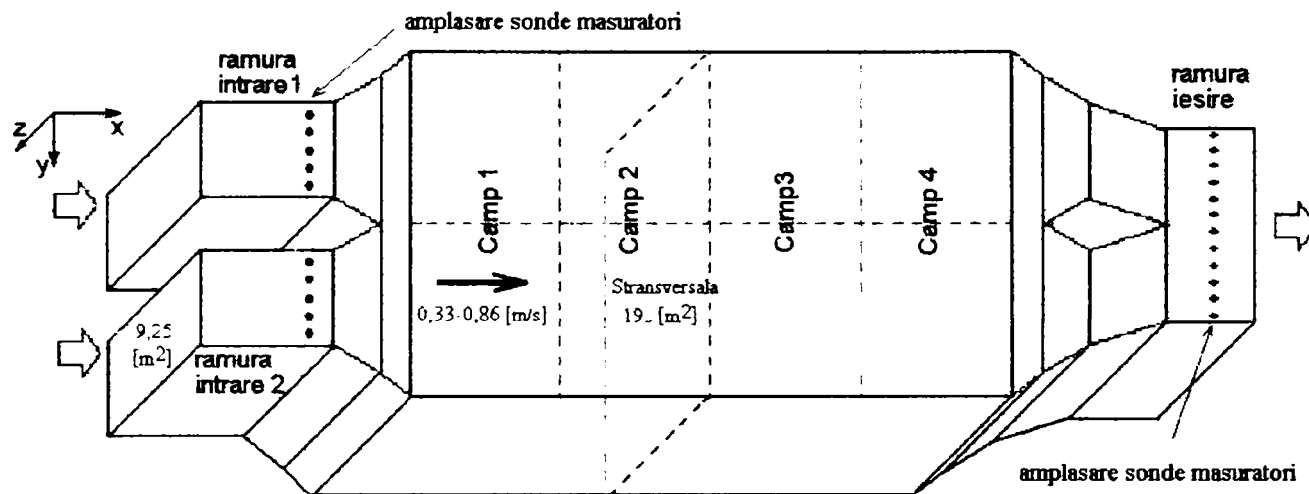


Fig.5.18. Modul de amplasare a sondelor în electrofiltrul nr.1 (vedere de sus)

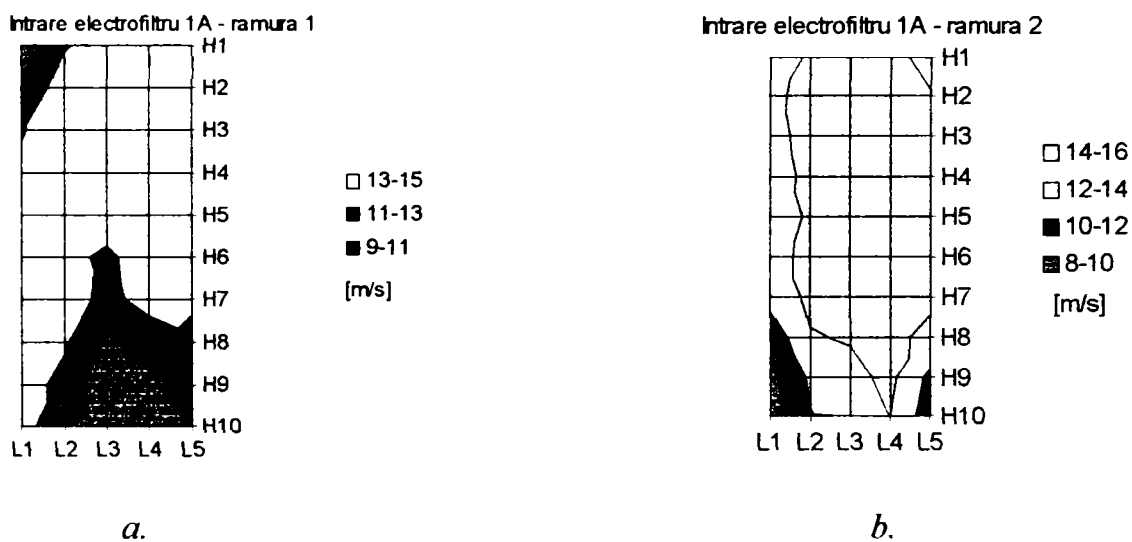


Fig.5.19. Distribuția vitezelor în ramurile de intrare 1 și 2 ale electrofiltrului nr.1A

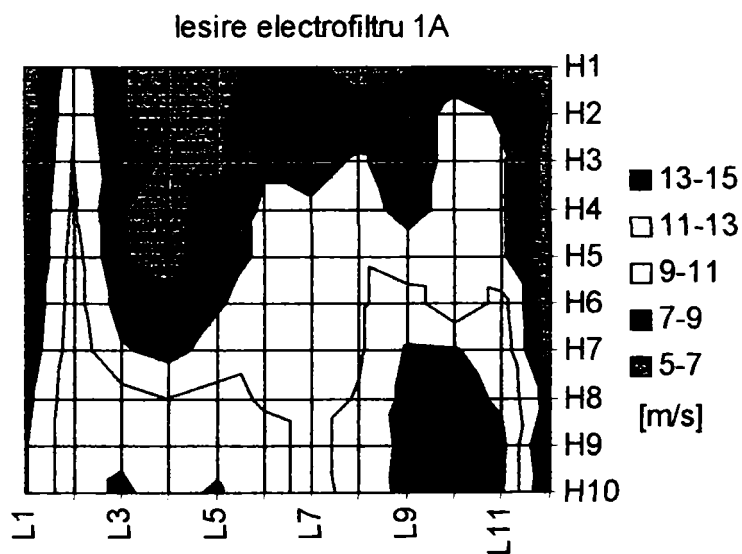


Fig.5.20. Distribuția vitezelor în ramura de ieșire a electrofiltrului nr.1A

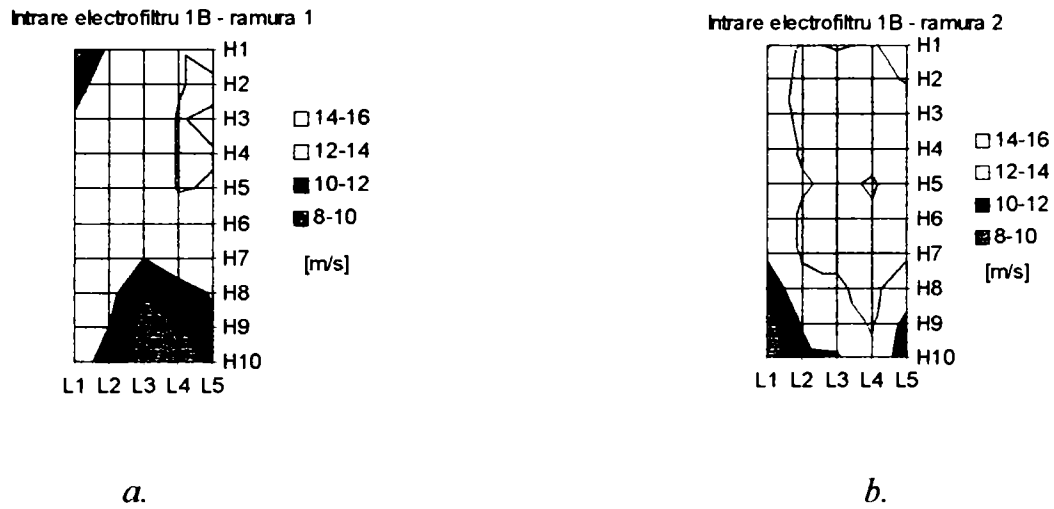


Fig.5.21 . Distribuția vitezelor în ramurile de intrare 1 și 2 ale electrofiltrului nr.1B

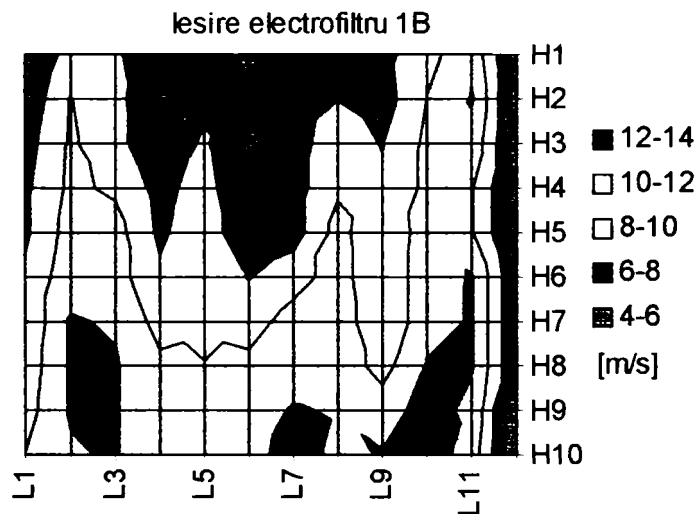


Fig.5.22. Distribuția vitezelor în ramura de ieșire a electrofiltrului nr.1B

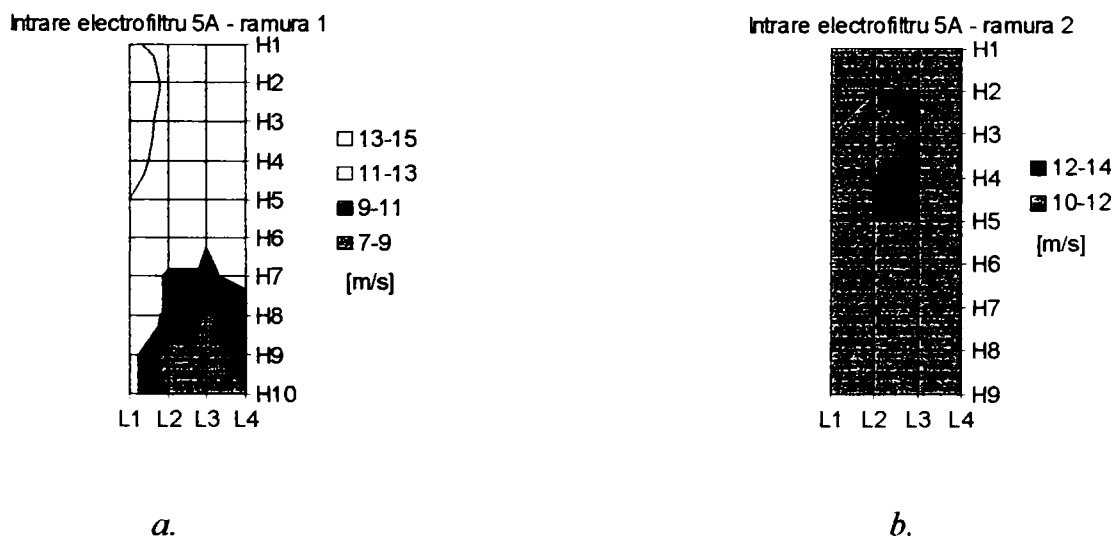


Fig.5.23. Distribuția vitezelor în ramurile de intrare 1 și 2 ale electrofiltrului nr.5A

iesire electrofiltru 5A

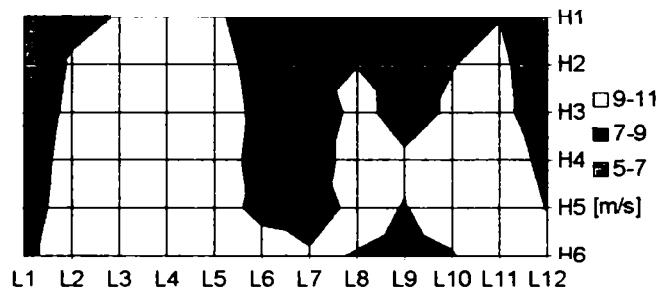
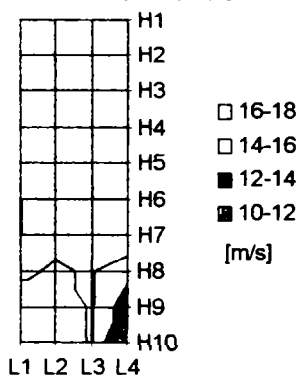


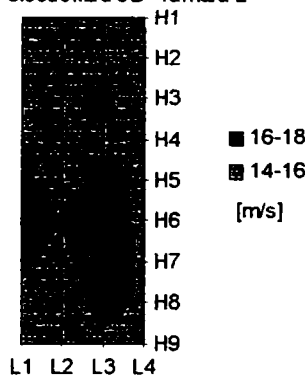
Fig.5.24. Distribuția vitezelor în ramura de ieșire a electrofiltrului nr.5A

Intrarea electrofiltru 5B - ramura 1



a.

Intrarea electrofiltru 5B - ramura 2



b.

Fig.5.25. Distribuția vitezelor în ramurile 1 și 2 și la ieșirea electrofiltrului nr.5B

iesire electrofiltru 5B

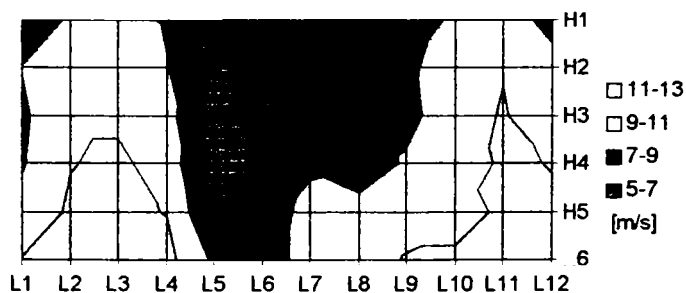


Fig.5.26. Distribuția vitezelor în ramura de ieșire a electrofiltrului nr.5B

Cu ajutorul datelor din [166,168] s-au trasat graficiile din fig.5.19-5.26.

În urma analizei distribuției vitezelor gazului în ramurile electrofiltrelor grupului energetic nr.1 (A și B) (fig.5.19,5.21) se pot trage concluziile:

- vitezele de intrare au valori cuprinse între 8-16 m/s;
- în partea de sus și de mijloc ale ramurilor, vitezele sunt cele mai mari față de cele din partea inferioară;
- datorită vâscozității gazului se observă că spre periferia și partea de jos a ramurilor vitezele sunt din ce în ce mai mici;
- datorită distribuțiilor de viteze este posibil ca partea centrală și partea de sus a electrofiltrelor să fie solicitate mai mult (atât mecanic cât și electric), deci acestea trebuie să fie dimensionate corespunzător;
- la ieșirile electrofiltrelor se constată o distribuție mai mare a vitezelor, chiar dacă vitezele sunt mai mici 4-15 m/s, ceea ce demonstrează o turbulență crescută datorată descărcărilor care au loc în electrofiltru și a trecerii gazului pe lângă panourile de depunere profilate.

În urma analizei distribuției vitezelor în ramurile electrofiltrelor grupului energetic nr.5 (A și B) (fig.5.23-5.26) se pot trage concluzii asemănătoare cu cele prezentate la electrofiltrele nr.1 cu câteva deosebiri:

- domeniul de viteze pentru ramurile de intrare este cuprins între 10-18 m/s;
- distribuția vitezelor nu mai este asemănătoare pe ramurile de același rang;
- pe ramura 2 se constată un domeniu mai mic de viteze, care indică turbulențe mai scăzute;
- la ieșire vitezele sunt cuprinse între 5-13 m/s, dar ele sunt distribuite mult mai uniform decât la electrofiltrele grupului energetic nr.1 și se datorează unui număr mai mic de descărcări în electrofiltre, ceea ce arată o urmărire mai slabă a sistemului de automatizare care comandă alimentarea cu tensiune a câmpurilor electrofiltrelor.

Din analiza făcută, se observă pentru ramurile de la intrare, o comportare turbulentă a gazelor, ceea ce este dăunător asupra eficienței de colectare a electrofiltrelor [5,16,99].

Echipamentul electric al unui electrofiltru mărește gradul de separare numai în condițiile unor distribuții uniforme a vitezelor particulelor de praf.

5.3. Studii experimentale ale descărcării Corona în electrofiltre

5.3.1. Studiul descărcării Corona la frecvență industrială

5.3.1.1. Studiul optic

Pentru efectuarea experimentărilor s-a utilizat un sistem de electrozi de descărcare prezentat în fig.5.27, care reprezintă un model fizic de laborator, la scara 1:5, pentru un sistem electrod de emisie-placă (electrod de emisie ISODYN B5). Acest stand experimental a fost construit pentru a analiza efectul Corona din electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.

Electrozii modelului fizic de laborator sunt de două tipuri:

- un electrod de emisie, cu cinci colțuri, de tip ISODYN B5 (fiind o parte dintr-un electrod de emisie a electrofiltrelor de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.);
- un electrod plan, care este conectat permanent la pământ.

Distanța între electrozi se poate modifica între 0 și 100 mm.

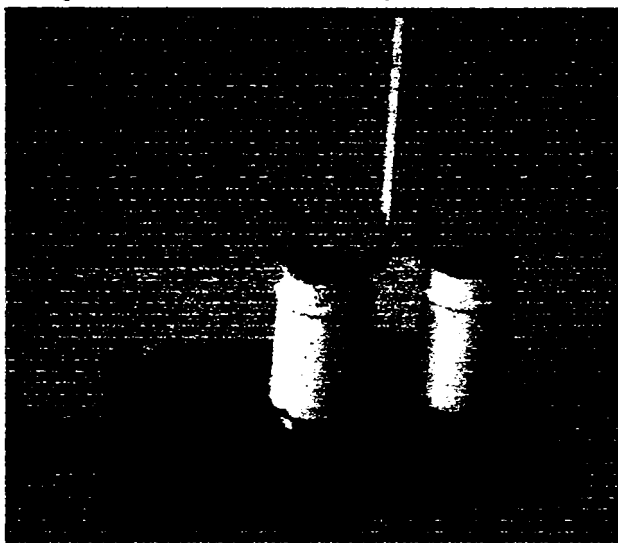


Fig.5.27. Sistem de electrozi de descărcare utilizați la experimentări

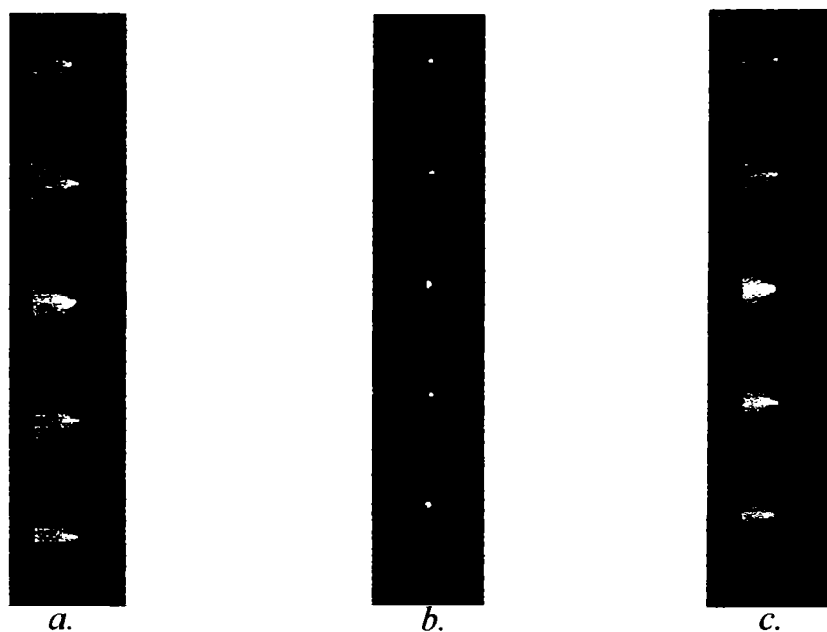


Fig.5.28. Descărcarea Corona la $f=50\text{Hz}$: a. pozitivă; b. negativă; c. alternativă

Sistemul de electrozi este conectat la un montaj electric care furnizează tensiune continuă pozitivă (potențialul + la electrodul de emisie și - la pământare), tensiune continuă negativă (potențialul - la electrodul de emisie și + la pământare) și tensiune alternativă.

În fig.5.28 sunt prezentate descărcările Corona obținute în cazul alimentărilor:

- continuă pozitivă, $U^+=10\text{kV}$, distanța între electrozi $d=18\text{ mm}$;
- continuă negativă, $U=10\text{kV}$, distanța între electrozi $d=10\text{ mm}$;
- alternativă, $U^a=10\text{kV}$, distanța între electrozi $d=15\text{ mm}$.

Distanțele între electrozi s-au reglat, pentru aceiași tensiune de alimentare, până la limita apariției descărcării electrice între electrozi. Descărcările Corona au fost fotografiate de la distanța de 0,8m cu un timp de expunere de 20 minute.

În cazul descărcării Corona pozitivă (fig.5.28.a) are loc o descărcare violentă prin strimeri, însoțită de zgomot puternic, iar culoarea descărcării este albastruie-violetă de intensitate luminoasă mare (cea mai mare din cele trei cazuri). La creșterea tensiunii se semnalează șocuri de curent.

La descărcarea Corona negativă (fig.5.28.b) pentru tensiuni mici, șocurile scurte de curent nu sunt regulate, iar descărcarea este obscură și neautonomă. La tensiuni mai mari apar șocuri de curent, a căror frecvență crește cu amplitudinea tensiunii. Șocurile sunt localizate în mici pete catodice (ale vârfurilor electrodului de emisie), care se mențin atâta timp cât se păstrează șocurile. La tensiuni mai ridicate descărcarea capătă un caracter autonom, stabilă (uniformă), iar intensitatea luminoasă a descărcării, pentru aceiași tensiune de alimentare, este mult mai slabă decât în cazul descărcării Corona pozitivă. Nu apar strimeri.

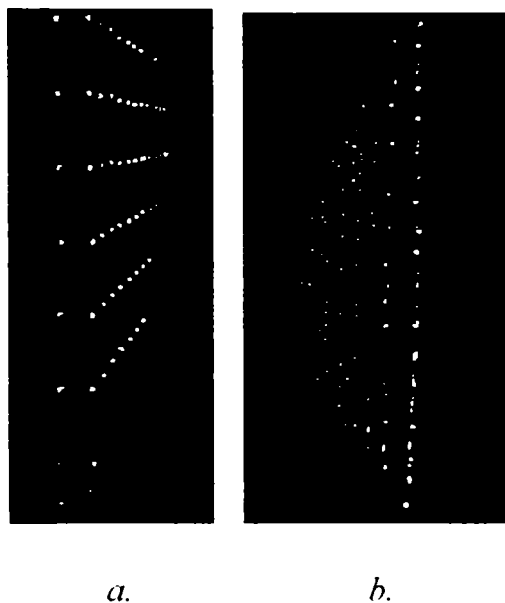
Alimentarea cu tensiune alternativă a electrozilor (fig.5.28.c), până la apariția descărcării Corona, este un caz intermediar între celelalte două cazuri. Practic descărcarea Corona alternativă, poate fi descompusă în două descărcări: la semialternanța pozitivă (+ la electrodul de emisie) are loc descărcarea Corona pozitivă prin strimeri, iar la semialternanța negativă (- la electrodul de emisie) are loc descărcarea Corona negativă prin apariția petelor catodice la vârfuri. Asupra descărcării Corona alternativă, cel mai puternic efect îl are descărcarea Corona pozitivă. Descărcarea este mai puțin zgomotoasă și instabilă decât în cazul descărcării Corona pozitivă.

Deși s-au alimentat cu aceleași tensiuni sistemul de electrozi în cele trei cazuri, s-au utilizat distanțe diferite între electrozi pentru a obține o intensitate luminoasă maximă.

Prin aceste experimente s-a arătat utilitatea alimentării electrofiltrelor la tensiune Corona negativă, fiind o descărcare controlabilă.

Achiziționarea și analiza descărcării Corona se poate realiza și prin dispozitive opto-electronice [33,59,60]. Dispozitivele opto-electronice pot fi alcătuite dintr-un sistem de lentile care focalizează pe o zonă de fototranzistoare. Se obține astfel, o apreciere a descărcării Corona în funcție de intensitatea luminoasă. În locul zonei cu fototranzistoare, dacă se focalizează lumina pe o punte de măsurare cu termistoare se poate măsura descărcarea cu ajutorul unui voltmetru electronic. Puntea de măsurare cu termistoare se poate alimenta pe o diagonală cu o tensiune la o frecvență de ordinul kHz, iar în cealaltă diagonală semnalul este amplificat, filtrat, redresat și măsurat cu un voltmetru electronic.

În fig.5.29 se prezintă descărcarea Corona negativă într-un electrofiltru cu plăci [78].



*Fig.5.29. Descărcarea Corona negativă într-un electrofiltru cu plăci
a.vedere de sus; b. vedere laterală*

5.3.1.2. Studiul curentului Corona

Pentru experimentări s-a utilizat montajul din fig. 5.30.

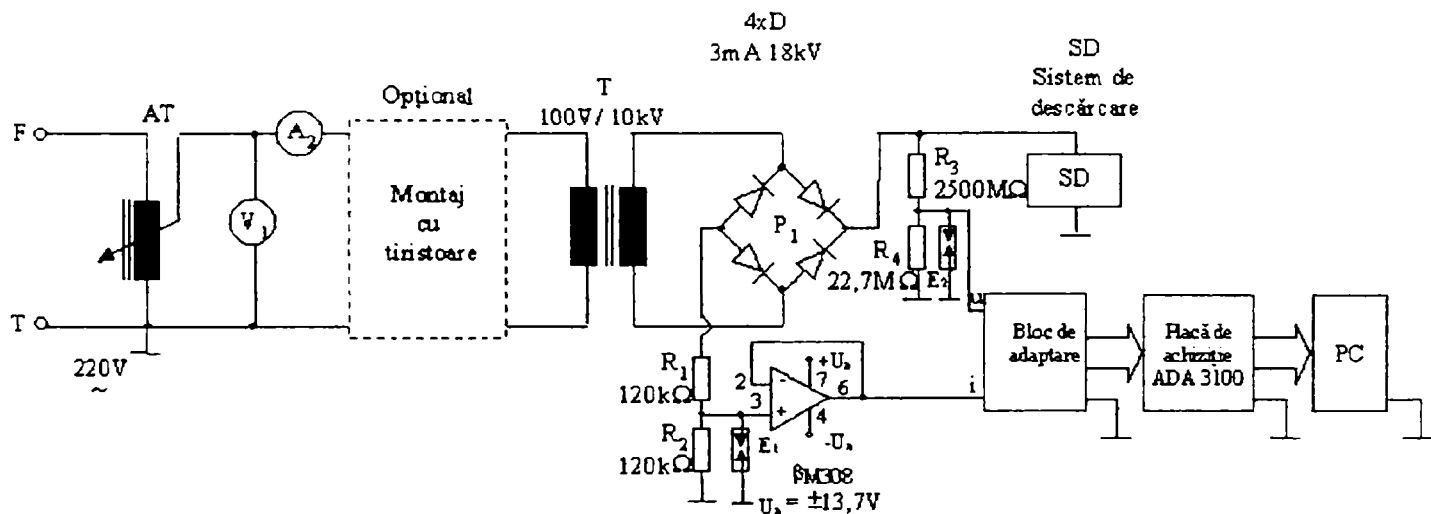


Fig. 5.30. Schema electrică și electronică utilizată la măsurarea curentului și a tensiunii la frecvență industrială

În fig. 5.30 se utilizează un autotransformator (AT) pentru a modifica în limite largi tensiunea pe sistemul de descărcare (SD) cu electrozi. Opțional, se poate utiliza un montaj cu tiristoare, montate în paralel pentru comanda în fază sau intermitentă (fig. 5.31). Pentru a obține descărcarea Corona în sistemul descărcare cu electrozi, se folosește un transformator ridicător de tensiune (100V/10kV). La experimentări s-au experimentat trei cazuri:

- descărcarea Corona pozitivă (se folosește puntea redresoare de înaltă tensiune P_1 din fig. 5.30);
- descărcarea Corona negativă (puntea P_1 se inversează față de cazul din fig. 5.30);
- descărcarea Corona alternativă (fără puntea P_1 din fig. 5.30).

Curentul și tensiunea Corona se măsoară cu ajutorul unui bloc de adaptare și de condiționare a semnalelor (pentru a asigura separarea galvanică și domeniul corespunzător de tensiune pentru placa de achiziție), placa de achiziție ADA 3100 și un calculator personal (care are softul SignalView a plăcii de achiziție ADA3100).

Măsurarea curentului se realizează cu un divizor rezistiv (R_1 - R_2) și un repetor de tensiune ($\beta M308$), iar măsurarea tensiunii cu un divizor rezistiv special de înaltă tensiune (R_3 - R_4). Pentru protecția aparatelor de măsurare s-au utilizat eclatoare (E_1 , E_2) în paralel cu rezistențele conectate la pământ a divizoarelor rezistive, atât pentru curent cât și pentru tensiune [17,90,109].

Montajul opțional cu tiristoare (partea de forță și de comandă) este prezentat în fig. 5.31. [10,11,17,132]. Circuitul integrat $\beta AA 145$ este special construit pentru comanda în fază a tiristoarelor și triacelor. Integratul are un detector de nul care sesizează trecerile prin zero ale tensiunii de sincronizare V_s , pentru a putea realiza impulsurile de comandă pe poarta tiristoarelor conectate în antiparalel T_1 și T_2 . Reglajul unghiului de amorsare se realizează cu potențiometrul conectat la pinul 8. Reglarea fazei nu se poate realiza într-un domeniu larg, datorită sarcinii inductive (primarul transformatorului ridicător de tensiune). Durata impulsului se realizează cu potențiometrul conectat la pinul 11, iar funcționarea generatorului de tensiune liniar variabilă se

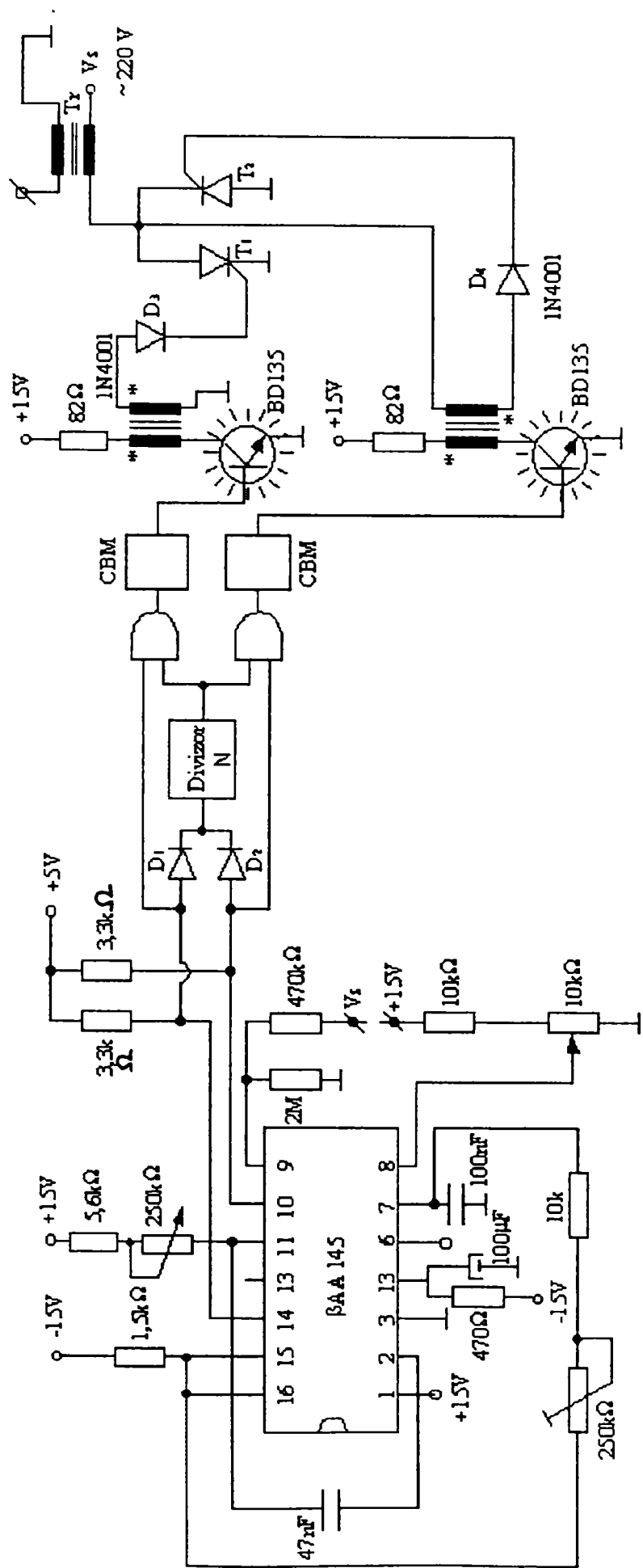


Fig.5.31. Montaj opțional cu tiristoare utilizat în schema din fig.5.30

ajustează cu potențiometrul conectat între pinii 7 și 15. Regalarea în fază a tiristoarelor se realizează prin aplicarea unor impulsuri pe porțile a două tranzistoare de medie putere (BD 135). Comanda în fază pentru semialternața pozitivă a tensiunii se realizează prin pinul 14, iar pentru semialternața negativă a tensiunii se realizează prin pinul 10.

Alimentarea intermitentă a sistemului de electrozi se poate realiza cu montajul din fig.5.31 prin însumarea celor două impulsuri de comandă (pentru semialternața pozitivă și negativă) cu diodele D_1 și D_2 . Semnalul rezultat, se aplică la intrarea în divizorul cu N (fig.5.31). Divizorul cu N (fig.5.32) are la bază un numărător binar reversibil (CDB 4193), care este astfel conectat încât să funcționeze ca numărător în jos [84,111,140]. Relația de legătură între frecvența de ieșire și cea de la intrarea numărătorului este:

$$f_{out} = \frac{f_{in}}{N} = \frac{f_{in}}{1 \cdot A + 2 \cdot B + 4 \cdot C + 8 \cdot D} \quad (5.16)$$

unde A, B, C, D sunt intrări digitale care setează numărătoarea. D este cel mai semnificativ bit, iar A este cel mai puțin semnificativ.

Numărarea în jos se realizează prin conetarea pinului 5 (count up) la 1 logic, pinul 14 (clear) la 0 logic, pinul 13 (borrow) la pinul 11 (load), iar la pinul 4 se aplică semnalul care trebuie divizat cu N. Pentru că la ieșirea 13 se obține un semnal negat față de intrarea 4, la ieșire se conectează un inversor. Numărul N poate fi cuprins între 0 și 15 (fiind 4 intrări, se obține un număr binar maxim 1111). Deoarece impulsurile trebuie să fie alternative, atât pe semialternața pozitivă, cât și pe cea negativă, numărul N poate lua numai valori impare. Setarea valorii N se realizează prin grupul de comutatoare (S_4, S_3, S_2, S_1), iar corespondența între poziția comutatoarelor și valoarea divizorului este prezentată în tabelul 5.4.

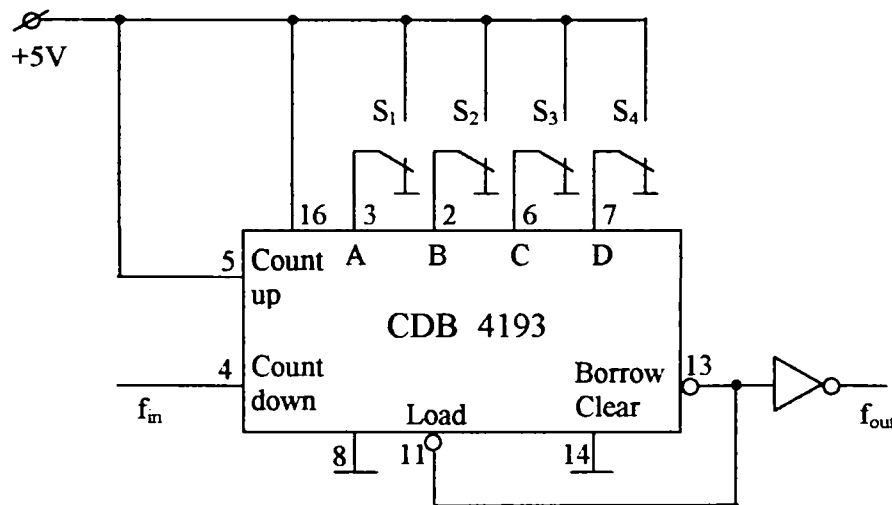


Fig.5.32. Numărător binar reversibil, funcția numărător în jos, cu circuitul integrat CDB 4193

Logica de comandă este asigurată de două porți ȘI (fig.5.31), care determină aplicarea corectă a impulsurilor. La ieșirea porților ȘI din fig.5.31, impulsurile nu au durata corespunzătoare pentru a fi aplicate pe porțile celor două tiristoare. Se utilizează două circuite basculante monostabile (CBM, fig.5.31) pentru a asigura o durată corespunzătoare impulsurilor de amorsare. Un circuit basculant monostabil poate fi construit cu circuitul integrat CDB 4121 E (fig.5.33) [84,113,140].

Tabelul 5.4.

Corespondența între poziția comutatoarelor (S_4, S_3, S_2, S_1) și valoarea divizorului cu N

Divizor cu N	S_4 (D)	S_3 (C)	S_2 (B)	S_1 (A)
1	0	0	0	1
3	0	0	1	1
5	0	1	0	1
7	0	1	1	1
9	1	0	0	1
11	1	0	1	1
13	1	1	0	1
15	1	1	1	1

Valoarea duratei semnalului de ieșire se calculează cu [113]:

$$t_1 = R \cdot C \cdot \ln 2; t_1 = 0,693 \cdot R \cdot C \tag{5.17}$$

Pentru a avea loc amorsarea tiristoarelor, durata impulsului de comandă trebuie să fie de minimum $0,1 \cdot T$ [132]. Dacă se alege un condensator cu pierderi cât mai mici de $0,1 \mu F$ și dacă se impune ca $t_1 \geq 1ms$ (pentru frecvența de 50 Hz), cu ajutorul relației (5.17) se determină valoarea normalizată a rezistenței $R=15k\Omega$. Se recalculează timpul și se obține $t_1=1,039ms$.

Semnalele de la ieșirea circuitelor basculante monostabile (fig.5.31) se aplică în baza tranzistoarelor de medie putere BD 135 în a căror baza sunt legate transformatoare de impulsuri (cu rol de separare galvanică și de a forma impulsurile). Secundarele transformatoarelor de impulsuri sunt conectate între poarta și catodul fiecărui tiristor.

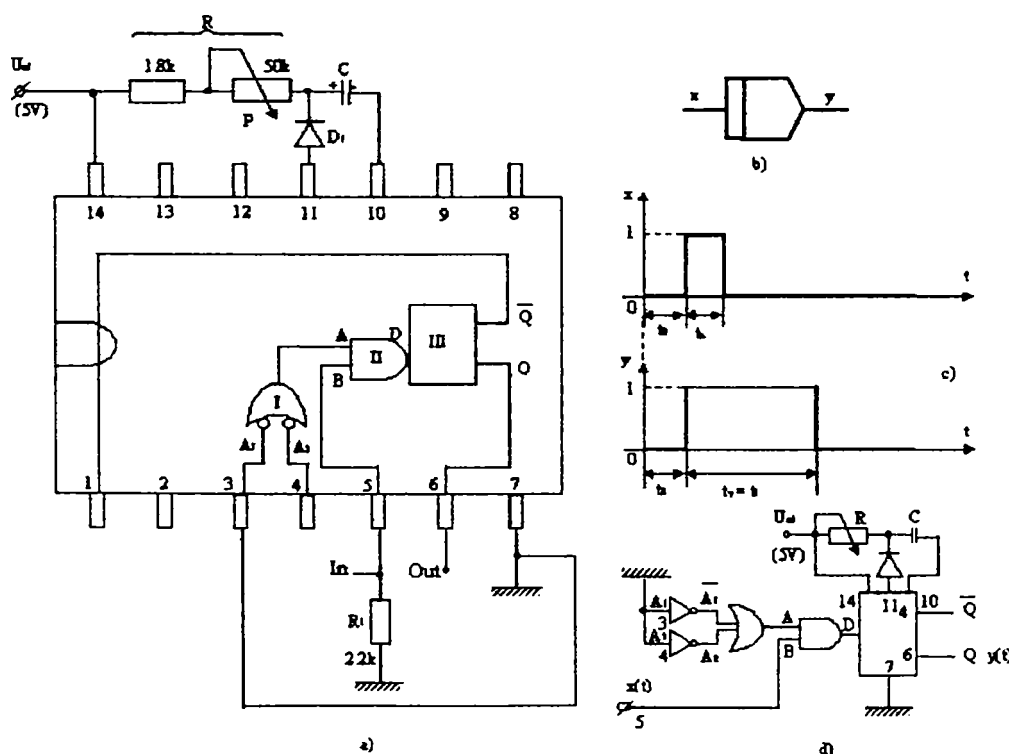


Fig.5.33. a. Diagrama bloc utilizând circuitul monostabil CDB 4121 E; b. simbolul; c. diagramele semnalului de intrare și de ieșire; d. diagrama simplificată

Se face observația că, dacă potențiometrul de reglare al unghiului de amorsare al tiristoarelor din fig.5.31 este reglat pentru valoare minimă și divizorul cu N este setat pe valoarea N=1, atunci montajul din fig.5.31 se comportă ca și cum nu ar fi montajul cu tiristoare. Pentru acest caz s-au efectuat și măsurătorile.

Efectuarea de măsurători la tensiuni înalte, în cazul descărcărilor Corona și electrice, constituie un risc pentru echipamentele electronice de măsurare. Fenomenele de descărcare Corona care se studiază sunt comparabile sau mai rapide în viteză cu răspunsul circuitelor de protecție (prin separare galvanică) și de măsură uzuale. De aceea se impun condiții de măsurare deosebite. Toate părțile componente ale echipamentelor și aparatelor din fig.5.31 sunt bine conectate la pământ [37,86].

În cazul descărcării Corona, tensiunile care trebuie măsurate sunt mari (de ordinul kV sau zecilor de kV), iar curenții Corona au valori mici (de ordinul μA), ceea ce determină dificultăți la efectuarea măsurătorilor.

Pentru măsurarea curenților Corona s-a adoptat soluția utilizării unui divizor rezistiv în vederea realizării conversiei curent-tensiune (pentru a putea fi aplicat semnalul pe blocul de adaptare) format din două rezistențe R_1 și R_2 cu valorile de 120 k Ω . Căderea de tensiune pe rezistența R_2 se aplică la intrarea unui circuit operațional de precizie. Circuitul βM308 are o derivă termică redusă. Conexiunea realizată cu circuitul integrat βM308 este aceea de repetor de tensiune. Ieșirea integratului s-a conectat la blocul de adaptare pentru a putea fi măsurată [17,47,57,58,117].

Măsurarea tensiunii s-a realizat cu divizorul rezistiv R_3 - R_4 , care are valorile $R_3=2500\text{M}\Omega$ și $R_4=22,7\text{M}\Omega$. Rezistorul R_3 este special destinat măsurătorilor până la 25kV, fiind ecranat pentru a micșora capacitățile parazite care intervin în măsurători la înaltă tensiune [19,36].

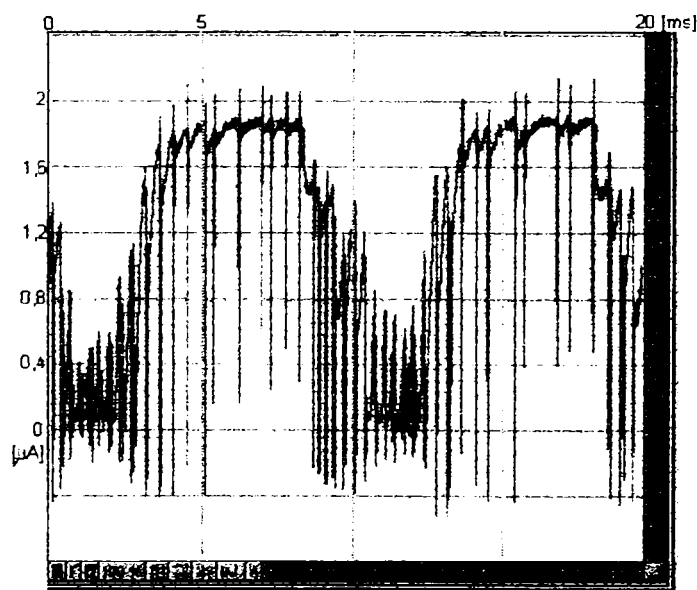


Fig.5.34. Curentul Corona în cazul $U^+ : d=2\text{cm}, U^+ =8\text{kV}$

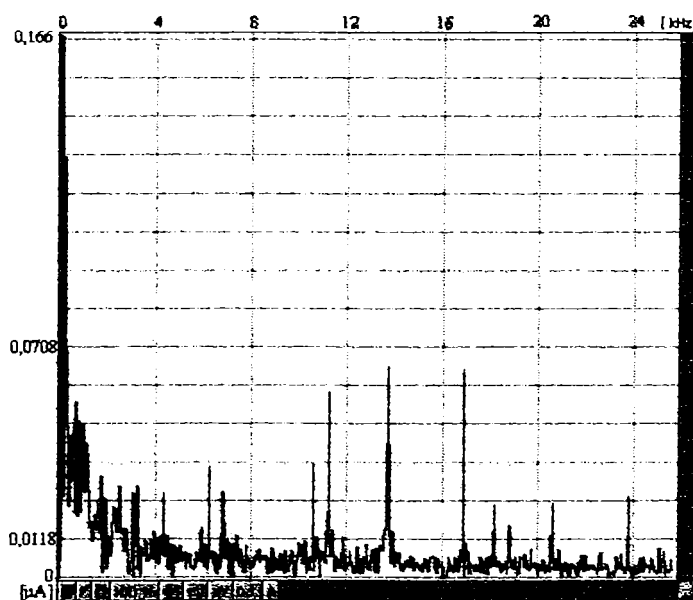
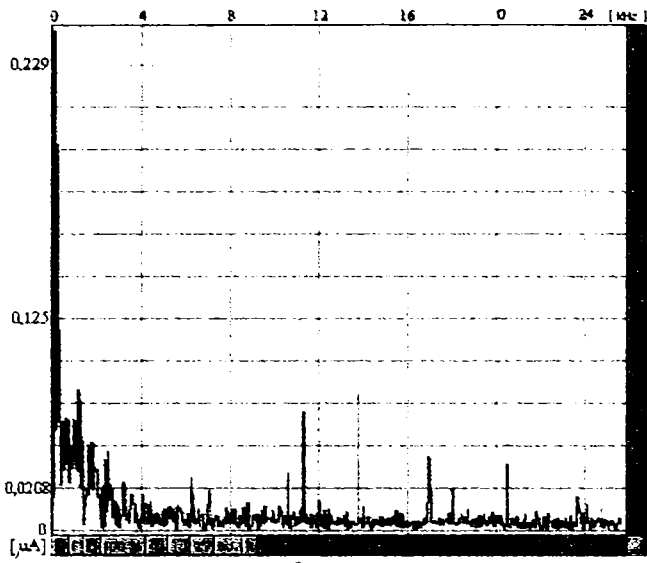
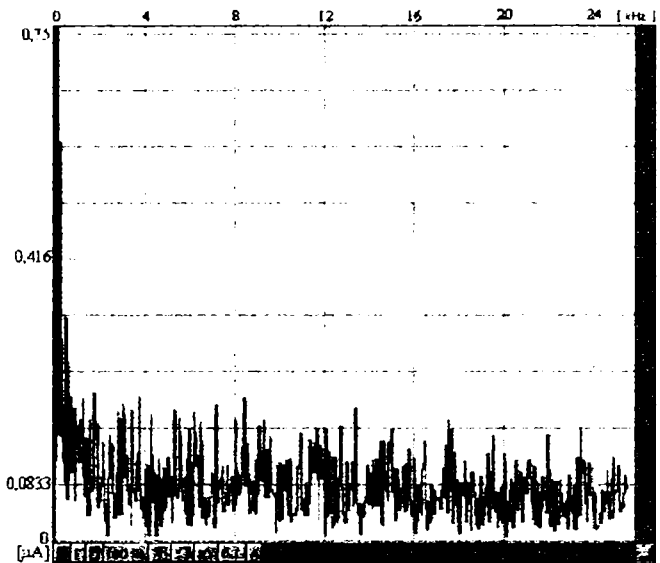


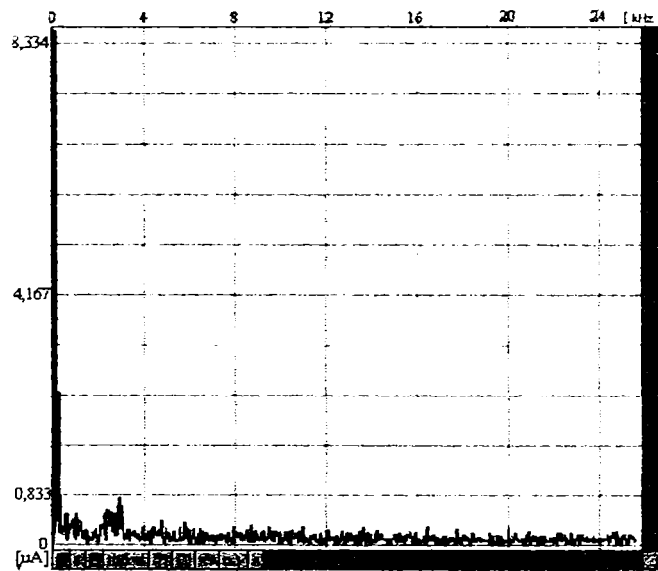
Fig.5.35. Analiza armonică a curentului Corona în cazul $U^+ : a.d=2\text{cm}, U^+ =4\text{kV}$



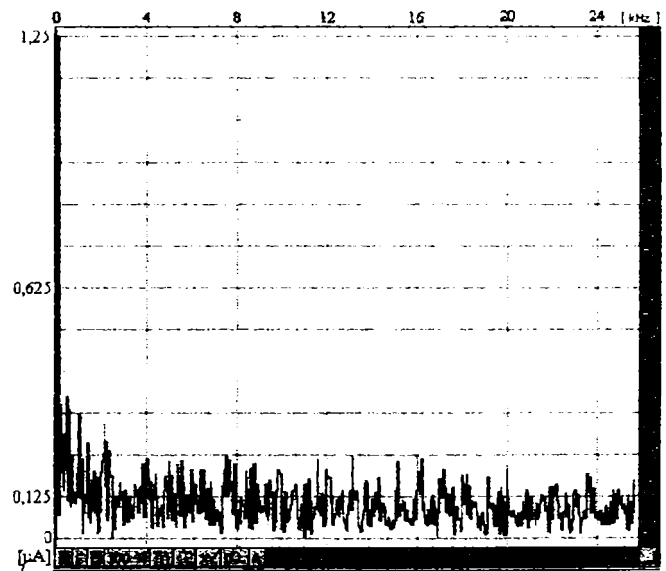
b.



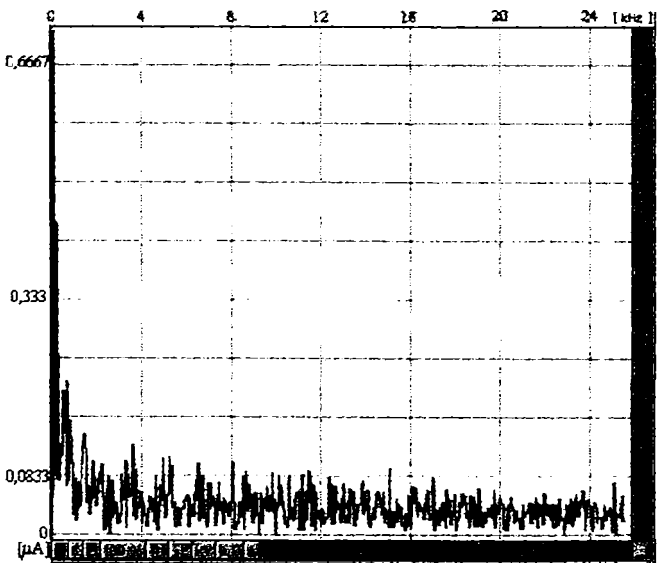
c.



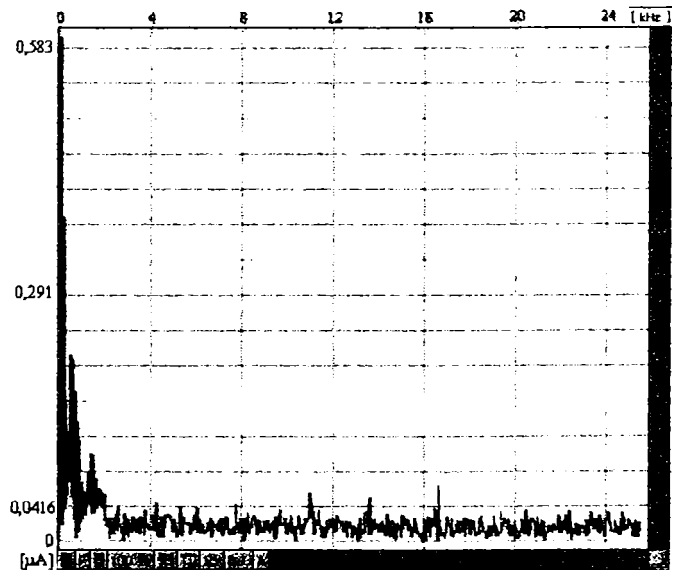
d.



e.



f.



g.

Fig.5.35. Analiza armonică a curentului Corona în cazul U^- : b. $d=2\text{cm}$, $U^- = 6\text{kV}$; c. $d=2\text{cm}$, $U^- = 8\text{kV}$; d. $d=2\text{cm}$, $U^- = 10\text{kV}$; e. $d=3\text{cm}$, $U^- = 10\text{kV}$; f. $d=4\text{cm}$, $U^- = 10\text{kV}$; g. $d=5\text{cm}$, $U^- = 10\text{kV}$

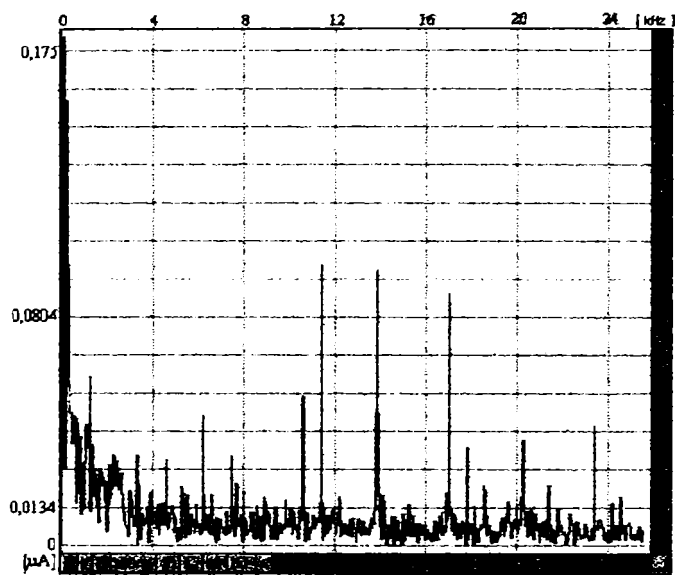
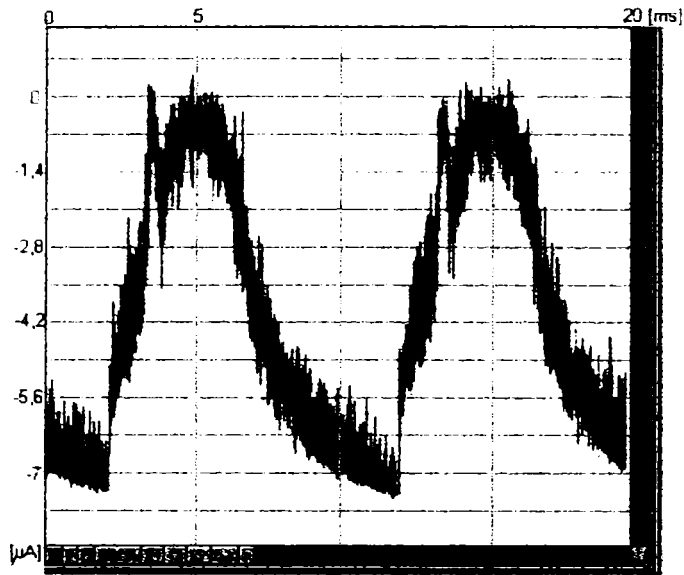
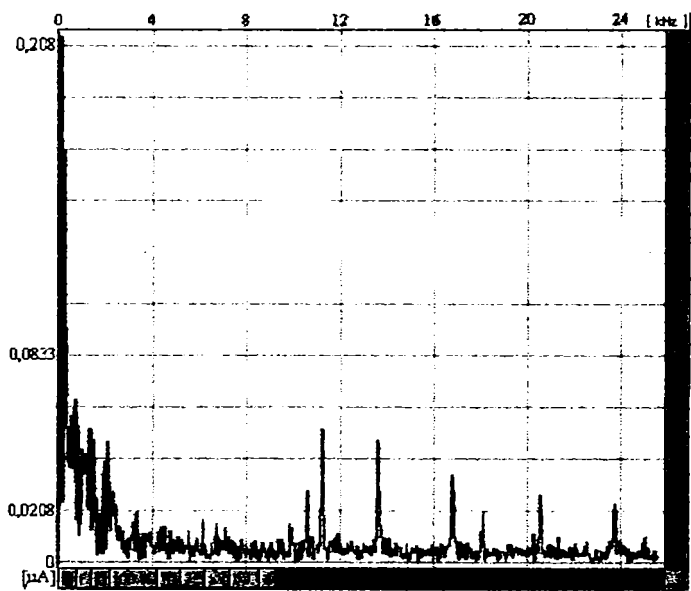
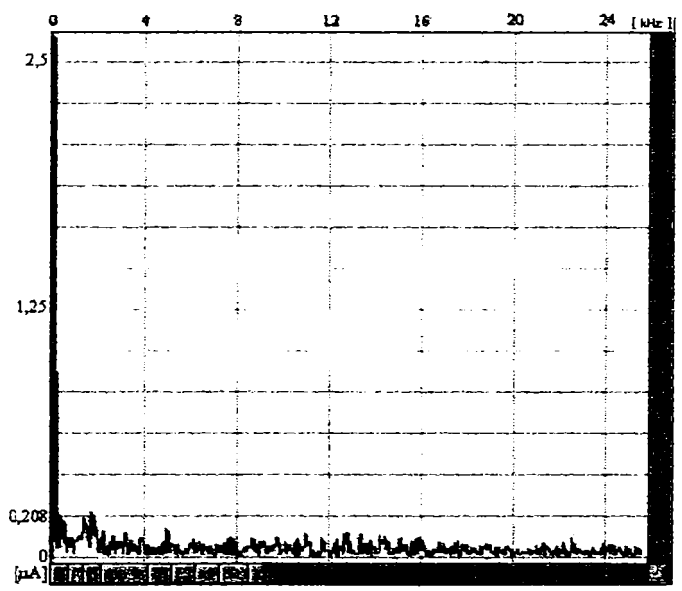


Fig.5.36. Curentul Corona în cazul $U^- : d = 2\text{cm}, U^- = 8\text{kV}$

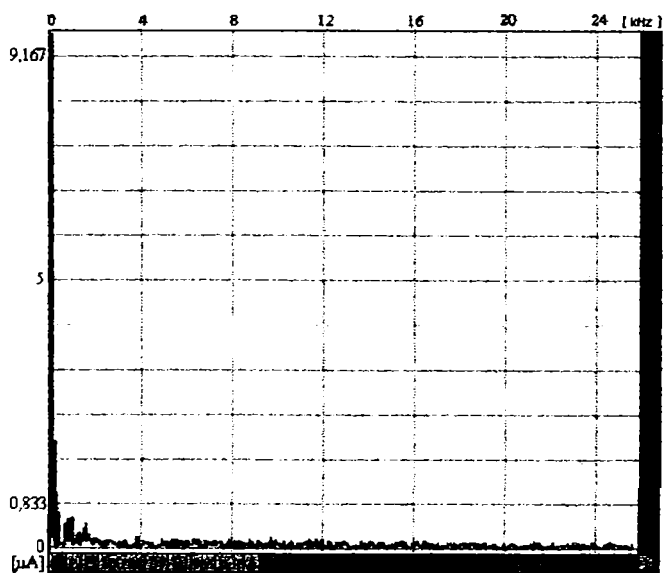
a.



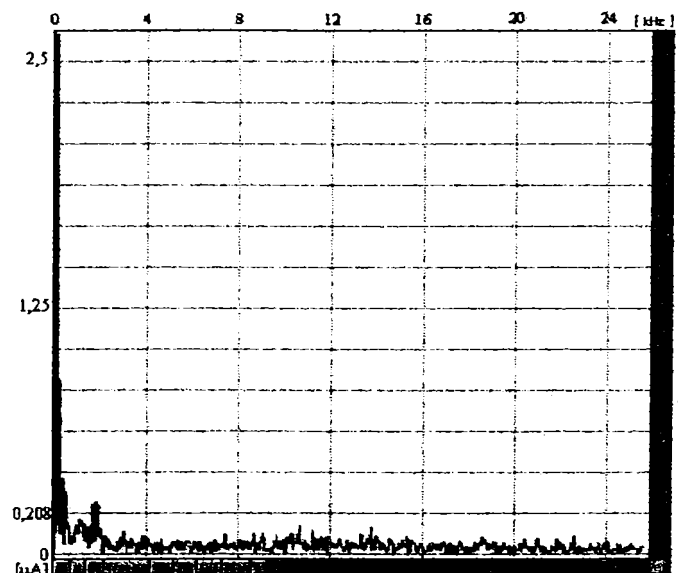
b.



c.



d.



e.

Fig.5.37. Analiza armonică a curentului Corona în cazul U^- : a. $d = 2\text{cm}, U^- = 4\text{kV}$; b. $d = 2\text{cm}, U^- = 6\text{kV}$; c. $d = 2\text{cm}, U^- = 8\text{kV}$; d. $d = 2\text{cm}, U^- = 10\text{kV}$; e. $d = 3\text{cm}, U^- = 10\text{kV}$

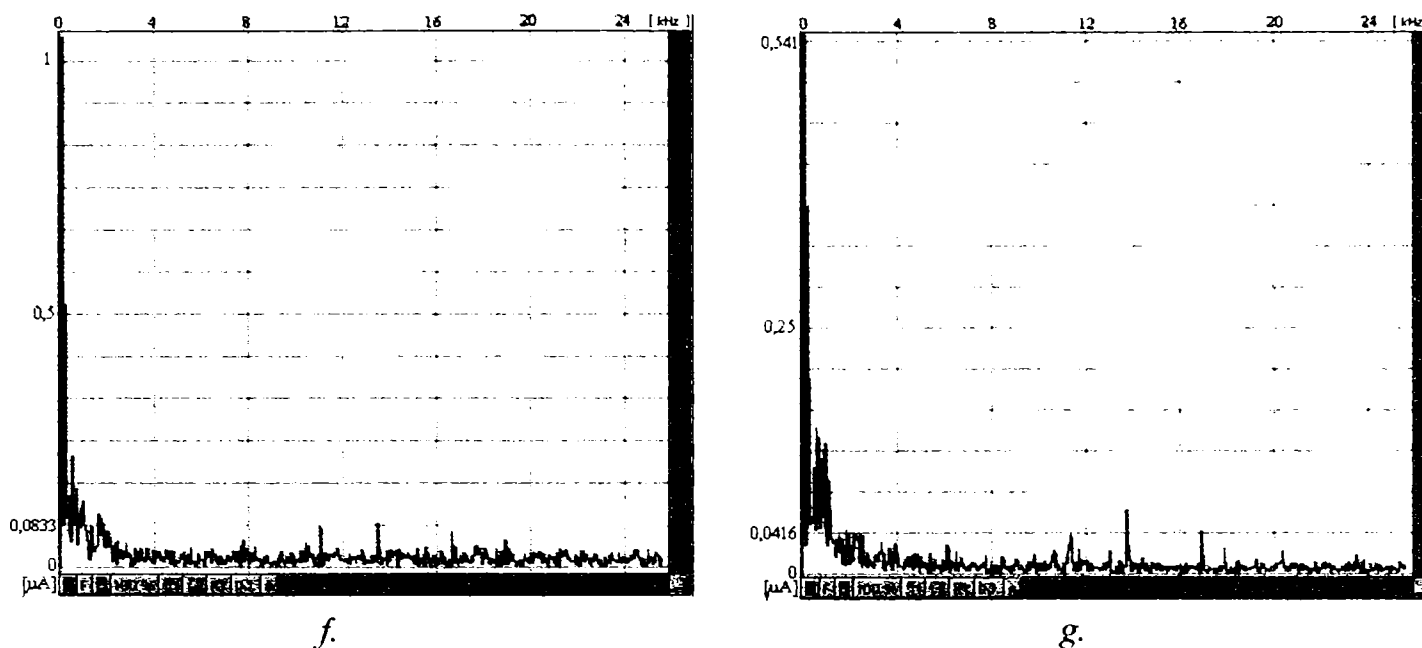


Fig.5.37. Analiza armonică a curentului Corona în cazul U^+ : f. $d=4\text{cm}$, $U^+ = 10\text{kV}$;
g. $d=5\text{cm}$, $U^+ = 10\text{kV}$

Măsurătorile efectuate au notațiile: d -distanța între electrozi, U^+ - tensiune continuă cu polaritatea + pe electrodul de emisie, U^- - tensiune continuă cu polaritatea - pe electrodul de emisie, iar U^a - tensiune alternativă. Montajul din fig.5.30 a fost alimentat la 220 V c.a. ($f=50$ Hz).

Analiza armonică a curentului Corona în cazul alimentării U^+ , U^- , pentru diferite distanțe între electrozi a fost necesară în vederea stabilirii concluziilor referitoare la descărcarea Corona corespunzătoare diferitelor moduri de alimentare cu tensiune.

În fig.5.35 (a,b,c,d,e,f,g) sunt prezentate analizele armonice ale curentului Corona la alimentarea cu tensiune U^+ , iar în fig.5.37 (a,b,c,d,e,f,g) sunt prezentate analizele armonice ale curentului Corona la alimentarea cu tensiune U^- , pentru diferite distanțe între electrozi și amplitudini ale tensiunii de alimentare.

Pentru aceeași distanță între electrozi și aceeași tensiune aplicată se trag următoarele concluzii:

- până când nu apare efectul Corona (manifestat prin zgomot), fundamentala curentului în cazul alimentării negative este mai mică decât în cazul alimentării pozitive. Armonicile superioare în cazul alimentării negative sunt mai mari;

- la apariția efectului Corona, fundamentala curentului în cazul alimentării negative este mai mare decât în cazul celei pozitive, iar armonicile în cazul alimentării negative sunt mai mici decât în celălalt caz. Cu cât distanța este mai mică, la aceeași tensiune, fenomenul este mai pronunțat.

În cazul alimentării pozitive la distanța de 1 cm și tensiunea de 7kV, apare arc electric, în schimb la alimentarea negativă la distanța de 1 cm între electrozi nu apare arc electric nici la 10kV (tensiunea maximă obținută cu montajul din fig.5.30).

Tensiunile în secundarul transformatorului ridicător de tensiune, nu prezintă modificări pentru cele două cazuri.

5.3.1.3. Studiul sunetului Corona

Studiul vântului Corona este un efect al interacțiunii dintre descărcarea electrică și mediu. În cazul alimentării cu "-" a electrozilor de emisie, dacă tensiunea este destul de mică au loc două procese fundamentale: avalanșa de electroni, urmată de o mișcare lentă a ionilor negativi spre anod. Cele două procese au creșteri exponențiale, cu constante de timp diferite între ele. La creșterea tensiunii de alimentare, curentul care apare determină pulsuri a căror frecvență este [61]:

$$f_p = k_w \cdot i \tag{5.18}$$

unde f_p [Hz] este frecvența pulsurilor, i [A] este curentul Corona, iar k_w [A/s] este o constantă care depinde de diametrul vârfului de descărcare, conform tabelului 5.5 [61,130].

Tabelul 5.5.

Valori experimentale ale parametrului k_w [A/s] în funcție de diametrul vârfului Corona

Diametru vârf Corona [mm]	k_w [A/s]
0,03	$1,36 \cdot 10^4$
0,5	$2,21 \cdot 10^4$
1,5	$8,75 \cdot 10^4$
4,73	$4 \cdot 10^8$

Emisia acustică Corona negativă are două componente: zgomotul alb și semnalul Trichel, care sunt în domeniul audio. Spectrul curentului Trichel este suprapus peste zgomotul alb. În domeniul timp pulsurile Trichel au aceeași formă tipică pentru semnale exponențiale și sunt repetitive.

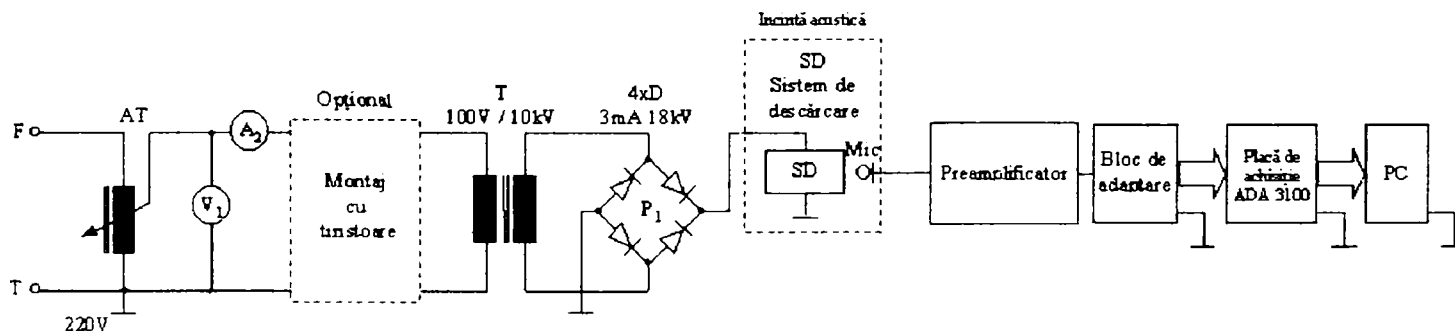


Fig.5.38. Schema electrică și electronică utilizată la măsurarea sunetului Corona la frecvență industrială

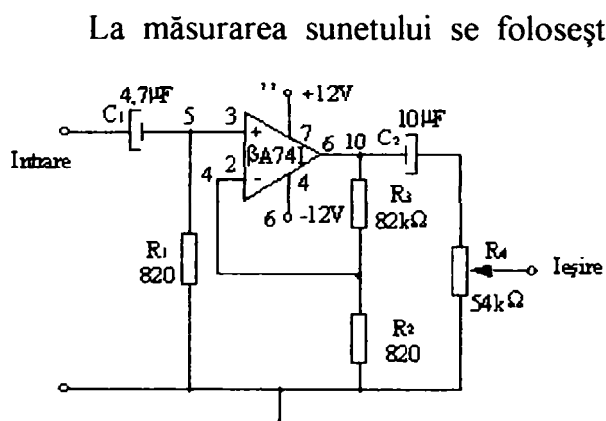


Fig.5.39. Montajul preamplificatorului utilizat

La măsurarea sunetului se folosește același montaj cu cel din fig.5.30, numai partea de a.e (..g... 9). M...a.ea descărcării Corona s-a realizat cu ajutorul unui preamplificator, bloc de adaptare (pentru placa de achiziție), o placă de achiziție ADA 3100 și un PC. Pentru ca sunetul să nu fie perturbat din exterior, sistemul de electrozi a fost introdus într-o incintă acustică. Preamplificatorul asigură o de câștig la 100 reglabil... di... R4.

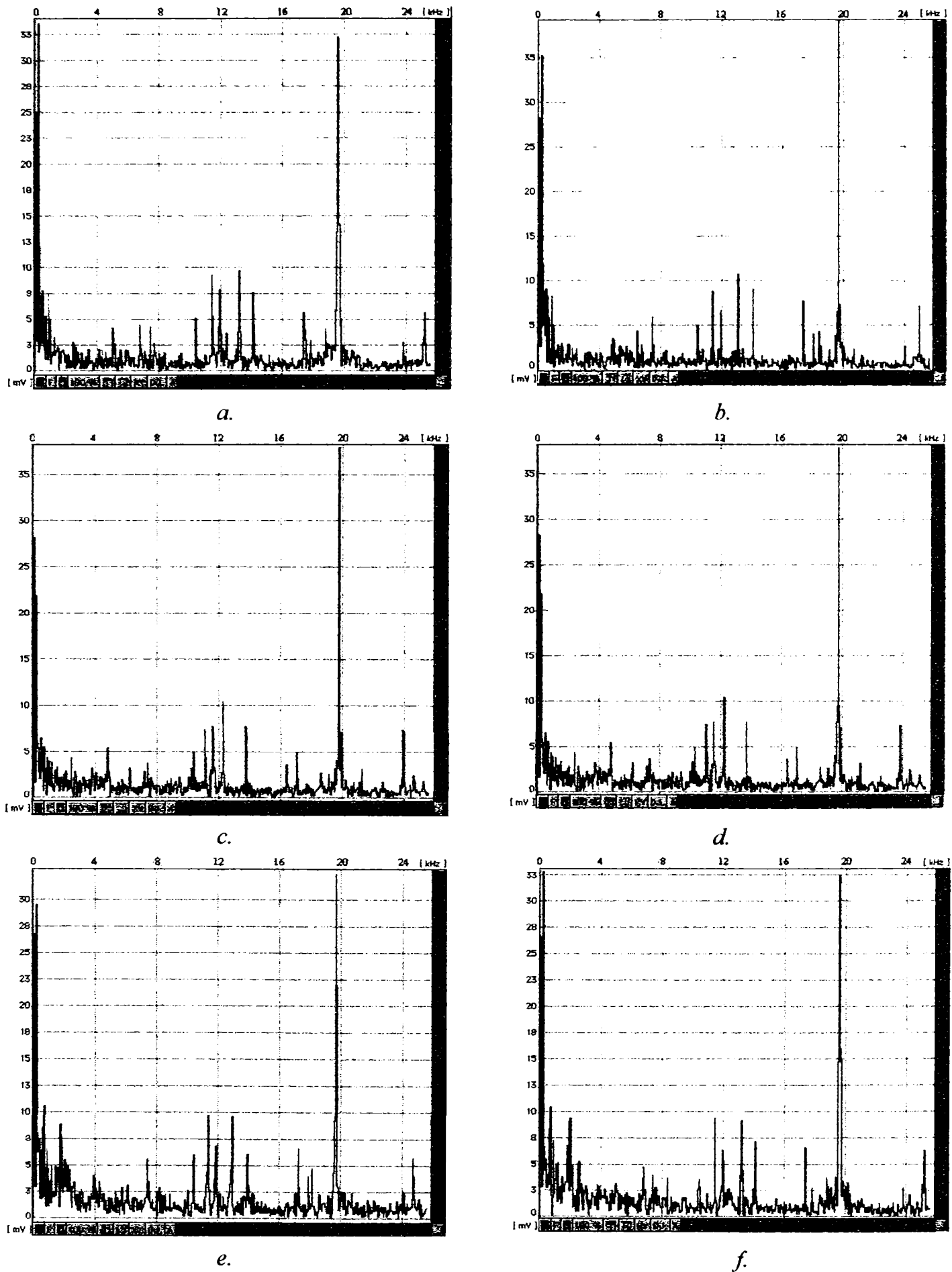
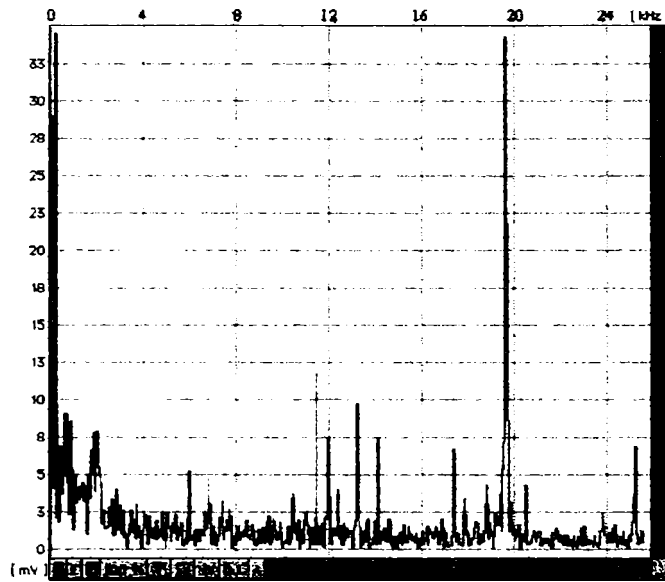
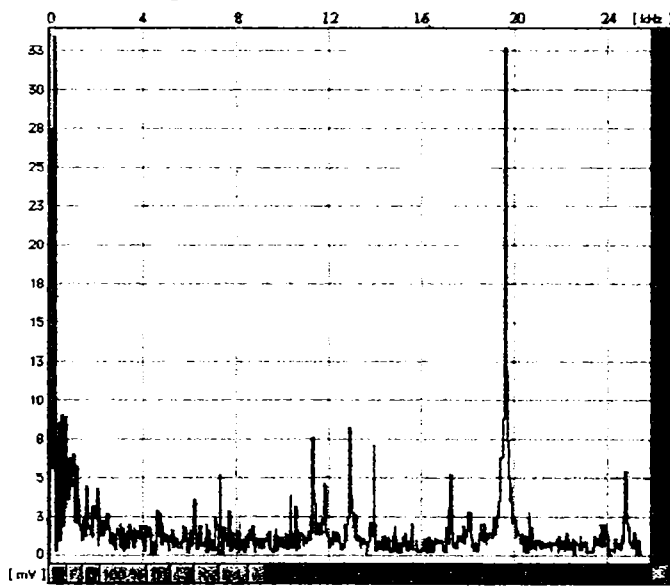


Fig.5.40. Analiza armonică a sunetului Corona în cazul U^+ : a. $d=2\text{cm}$, $U^+=4\text{kV}$; b. $d=2\text{cm}$, $U^+=6\text{kV}$; c. $d=2\text{cm}$, $U^+=8\text{kV}$; d. $d=2\text{cm}$, $U^+=10\text{kV}$; e. $d=3\text{cm}$, $U^+=10\text{kV}$; f. $d=4\text{cm}$, $U^+=10\text{kV}$

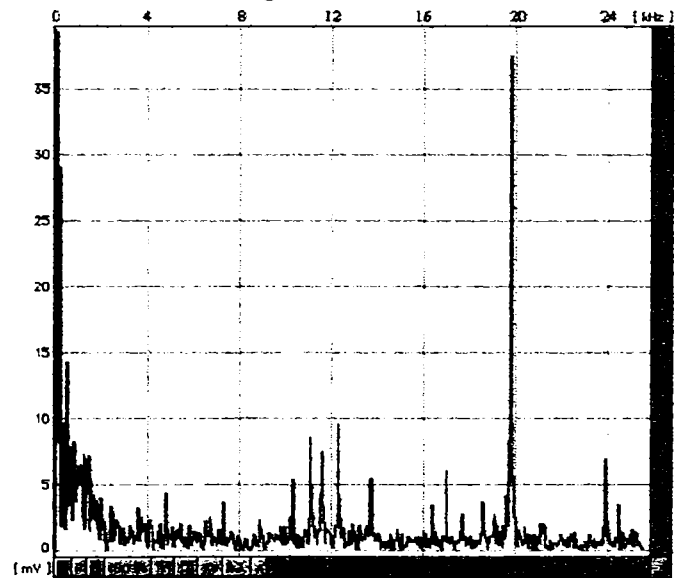


g.

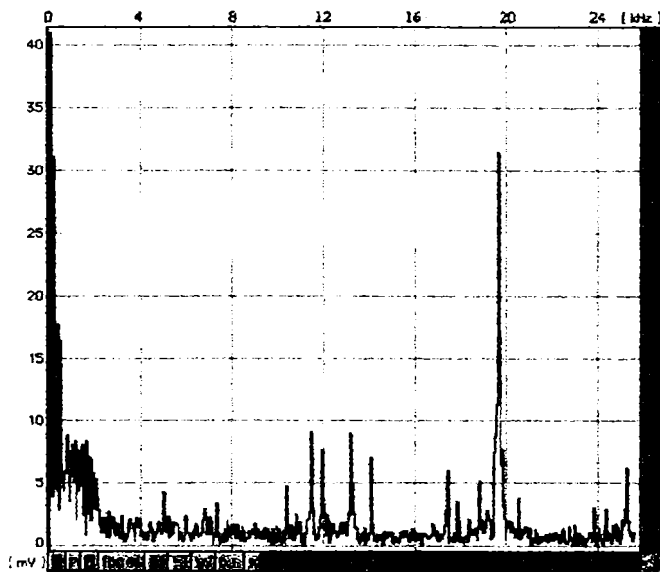
Fig.5.40. Analiza armonică a sunetului Corona în cazul U^r ; g. $d=5\text{cm}$, $U=10\text{kV}$



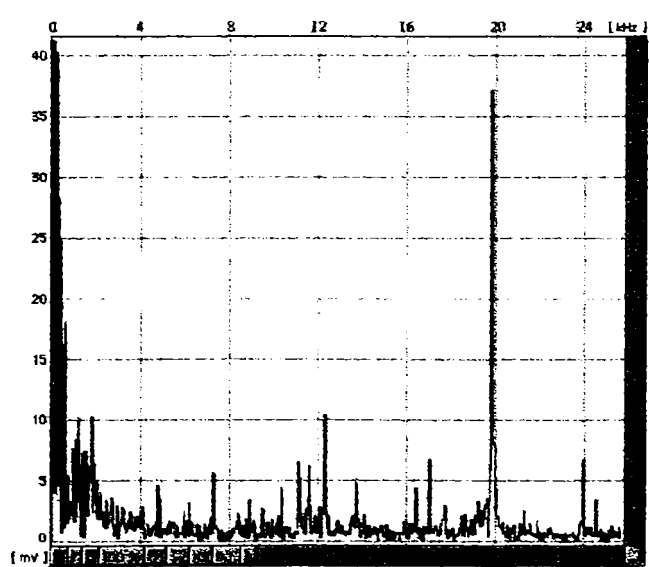
a.



b.



c.



d.

Fig.5.41. Analiza armonică a sunetului Corona în cazul U : a. $d=2\text{cm}$, $U=4\text{kV}$; b. $d=2\text{cm}$, $U=6\text{kV}$; c. $d=2\text{cm}$, $U=8\text{kV}$; d. $d=2\text{cm}$, $U=10\text{kV}$

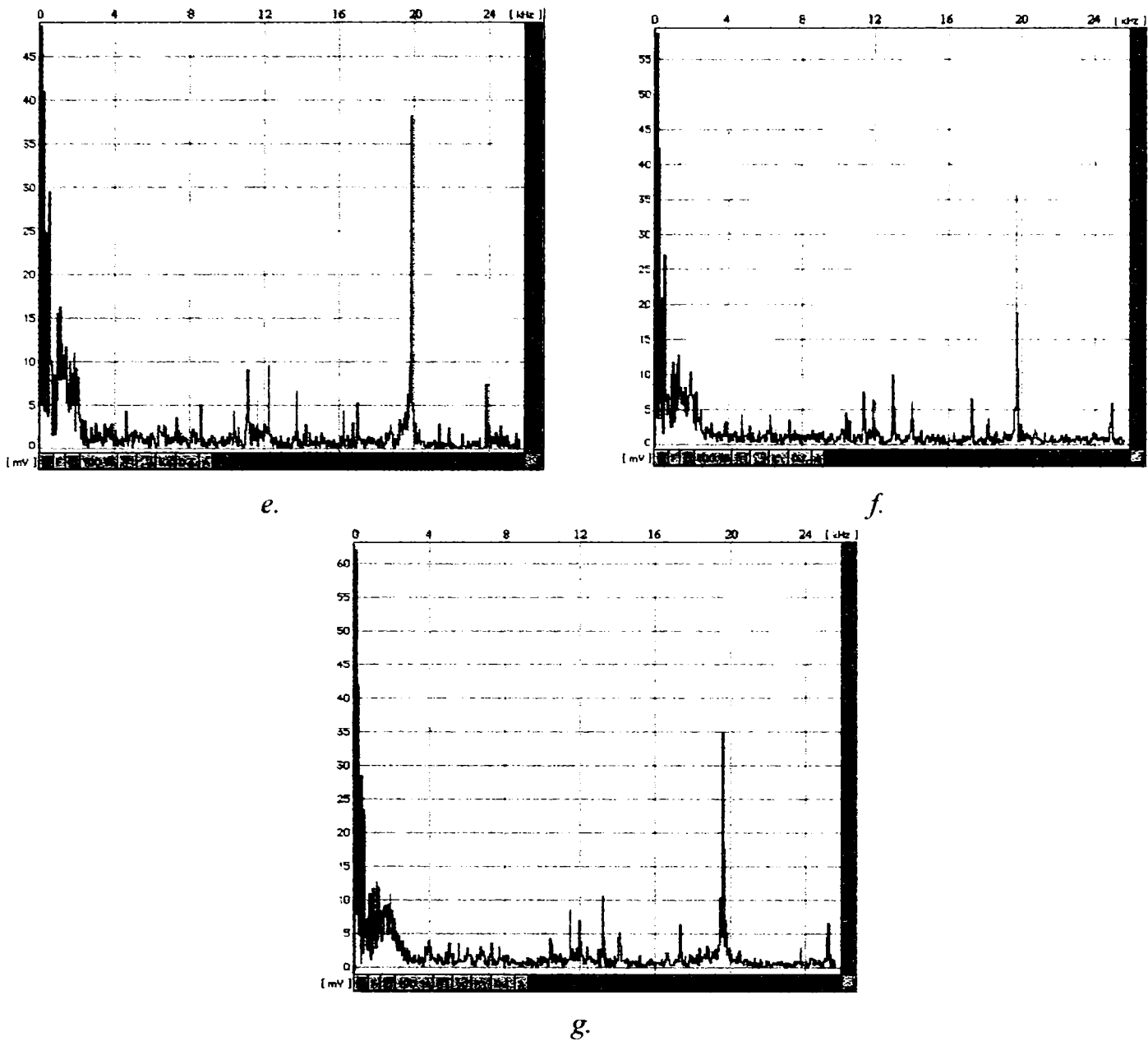


Fig.5.41. Analiza armonică a sunetului Corona în cazul U^- : e. $d=3\text{cm}$, $U^- = 10\text{kV}$; f. $d=4\text{cm}$, $U^- = 10\text{kV}$; g. $d=5\text{cm}$, $U^- = 10\text{kV}$

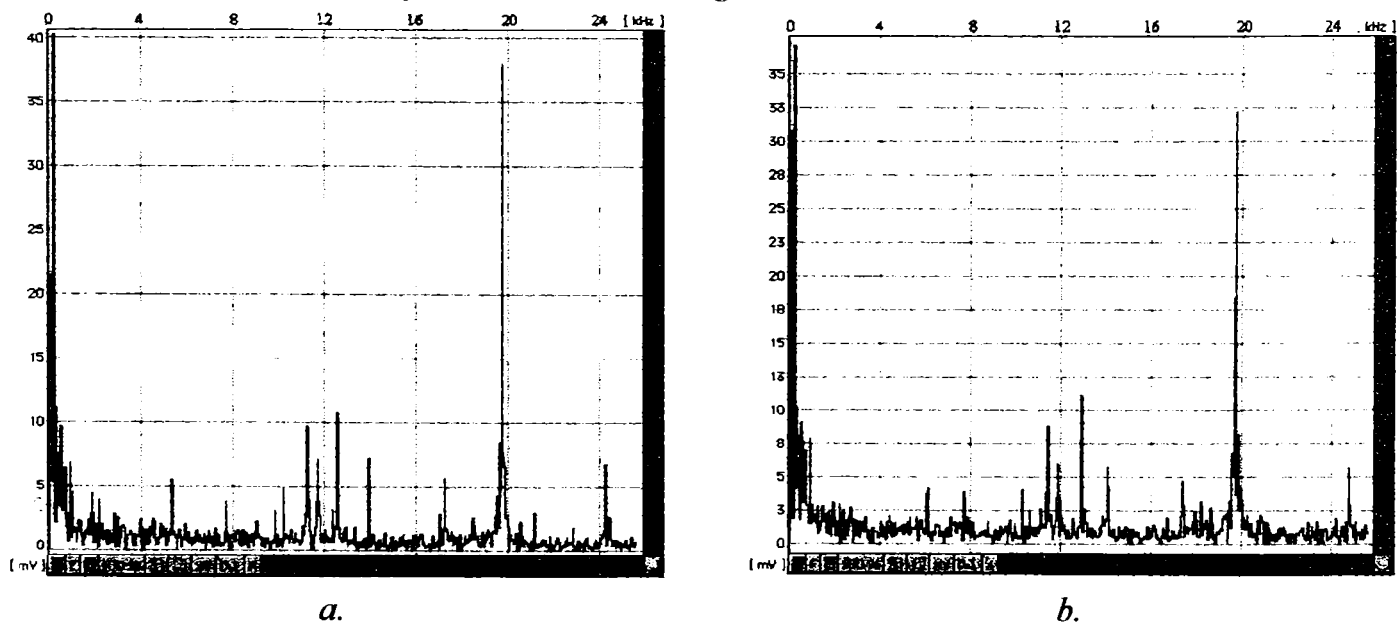


Fig.5.42. Analiza armonică a sunetului Corona în cazul U^+ : a. $d=2\text{cm}$, $U^+ = 4\text{kV}$; b. $d=2\text{cm}$, $U^+ = 6\text{kV}$

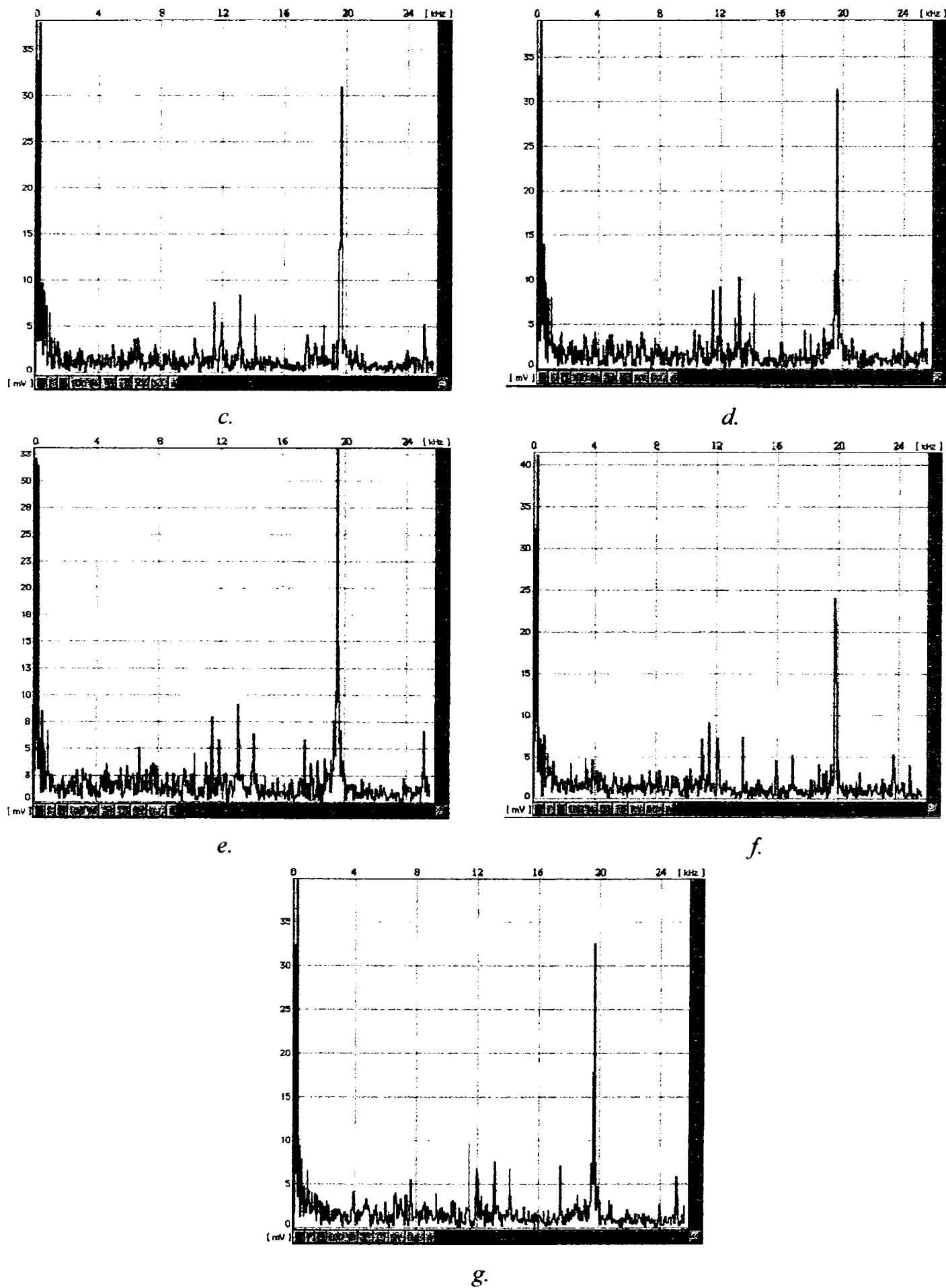


Fig.5.42. Analiza armonică a sunetului Corona în cazul U^p : c. $d=2\text{cm}$, $U^p=8\text{kV}$; d. $d=2\text{cm}$, $U^p=10\text{kV}$; e. $d=3\text{cm}$, $U^p=10\text{kV}$; f. $d=4\text{cm}$, $U^p=10\text{kV}$; g. $d=5\text{cm}$, $U^p=10\text{kV}$

În cazul alimentării pozitive (fig.5.40) a electrozilor de emisie, pentru aceeași distanță între electrozi ($d=2\text{cm}$) armonica de 19,5kHz crește, după care se stabilizează odată cu creșterea tensiunii de alimentare. Dacă se păstrează aceeași tensiune de alimentare (10kV) fundamentala de 50 Hz crește odată cu creșterea distanței între electrozi, iar armonica de 19,5kHz (cea mai mare) scade odată cu creșterea distanței între electrozi.

La alimentarea negativă (fig.5.41) fundamentala sunetului, la 50 Hz este mai mare decât în cazul precedent în aceleași condiții. Cea mai evidentă armonică este cea care are frecvența 19,5kHz; aceasta are aproximativ aceeași amplitudine la creșterea tensiunii de alimentare, dacă se păstrează neschimbată distanța dintre electrozi. Cu creșterea distanței între electrozi, armonica de la 19,5 kHz scade în amplitudine. Alte armonici cu amplitudini mai mari au frecvențele apropiate de valorile 2kHz, 12kHz și 24kHz.

La alimentarea negativă fundamentala (50Hz) este mai mare decât în cazul alimentării pozitive, în schimb armonica de la 19,5 KHz are o comportare inversă. În ambele situații se observă spectrul Trichel [61]. Creșterile și descreșterile exponențiale care caracterizează spectrul Trichel sunt la fel de evidențiate atât la alimentarea negativă, cât și la alimentarea pozitivă. Cea mai evidentă zonă a spectrului în ambele situații, este cea în jurul frecvențelor de 19,5kHz, 12kHz și 25kHz. Amplitudinile armonicilor la alimentarea pozitivă sunt mai mari decât la alimentarea negativă.

Alimentarea alternativă (fig.5.42) a electrozilor de descărcare determină o situație intermediară între celelalte două cazuri, atât pentru fundamentala curentului la 50 Hz cât și pentru armonica de la 19,5 kHz.

5.3.2. Studiul descărcării Corona la înaltă frecvență

5.3.2.1. Studiul curentului Corona

În domeniul electrofiltrelor, au început cercetările cu privire la realizarea unor surse de alimentare la înaltă frecvență a câmpurilor electrofiltrelor. Se impune astfel, analiza descărcării Corona la înaltă frecvență.

Studiul curentului Corona s-a realizat cu schema electrică din fig.5.43.

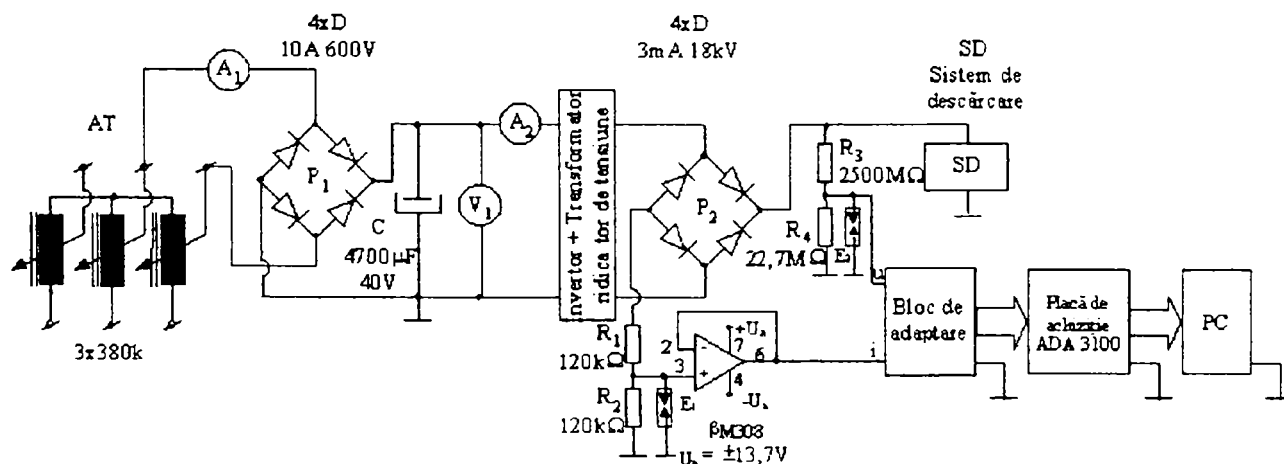


Fig.5.43. Schema electrică și electronică utilizată la măsurarea curentului și a tensiunii la înaltă frecvență

La efectuarea experimentărilor s-au utilizat mai multe variante constructive de invertoare de putere (modele de laborator), alimentate la tensiune continuă (obținută din tensiune alternativă redresată și filtrată) cu valoarea maximă 15 V care au la ieșire tensiuni de ordinul kV. Performanțele surselor de alimentare cu inverter sunt puternic influențate de caracteristicile transformatorului de înaltă tensiune și frecvență folosite la realizarea lor. Pentru experimentări s-a utilizat un transformator cu miez de ferită care poate funcționa la frecvența de 50 kHz [34,114]. În miezul feromagnetic al transformatoarelor se crează un întrefier pentru evitarea saturației magnetice.

În fig.5.44 este prezentat montajul practic al unui inverter "flyback" cu izolare utilizat la experimentări. Comanda tranzistorului final (SDT 9203) se realizează cu ajutorul unui astabil format din integratul MMC 4047 și componentele externe R-C. Impulsurile de comandă se transmit tranzistorului final printr-un circuit "de putere" (MMC 4050), care realizează funcția logică "Identitate" și un tranzistor Darlinghton (TD645). Curentul efectiv absorbit de primarul transformatorului de înaltă tensiune este de peste 15A, de aceea se utilizează soluția de alimentare printr-un autotransformator trifazat de putere (AT), a cărei tensiune se redresează cu puntea (P₁) și se filtrează cu ajutorul condensatorului C. Prin modificarea rezistenței R, se poate schimba frecvența de comutație în limite largi.

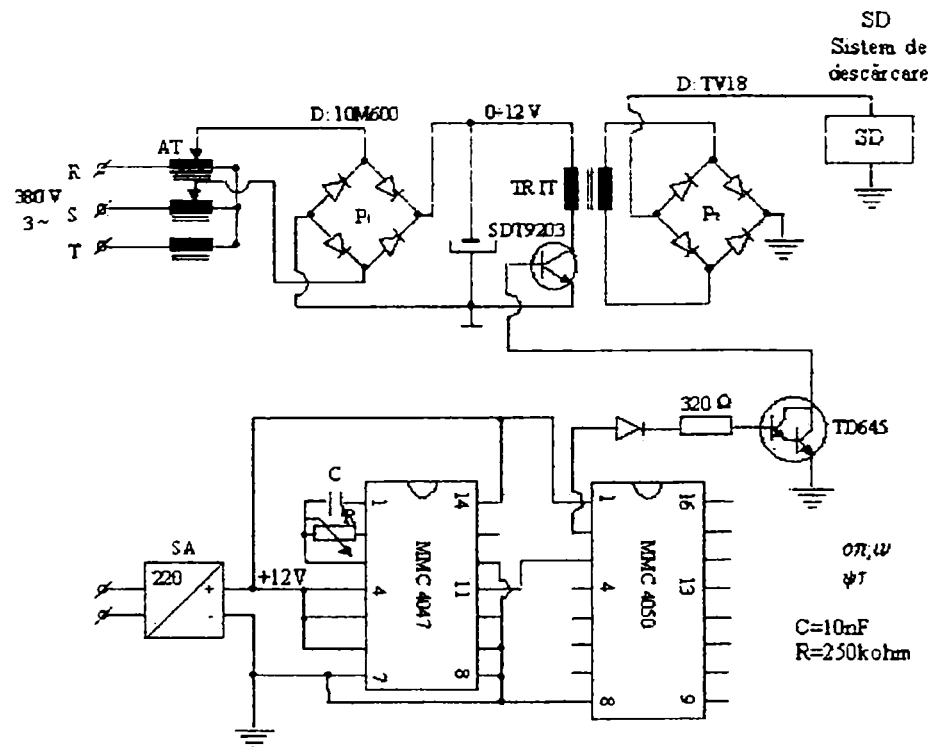


Fig.5.44. Inverter "flyback" cu izolare

În urma experimentărilor, s-a constatat că invertoarele în contratimp au fiabilitate ridicată. În fig.5.45 și 5.46 sunt prezentate două variante de invertoare în contratimp. Pentru cele două invertoare, tensiunile de alimentare nu trebuie să depășească 15 V, iar la ieșire se obțin tensiuni de ordinul kV. Pentru efectuarea experimentărilor cu inverterul din fig.5.46 s-a utilizat montajul de măsurare din fig.5.43. Frecvența de comutație a invertoarelor din fig.5.45 și 5.46 sunt determinate de inductanțele L₁₁, L₁₂, L₂₁, L₂₂, R₁ și R₂. Pentru inverterul din fig.5.46, bobinele L₁₁, L₁₂ au

fiecare câte patru spire, bobinele L_{21} , L_{22} au câte 10 spire, iar rezistoarele au valorile $R_1=27\Omega$, $R_2=240\Omega$. Cu aceste componente s-a realizat o frecvență de comutație de 24kHz.

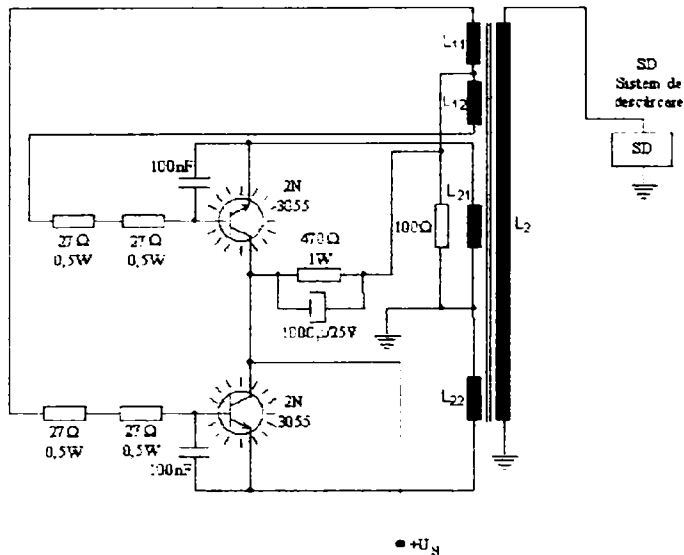


Fig.5.45. Invertor în contratimp (varianta I-a)

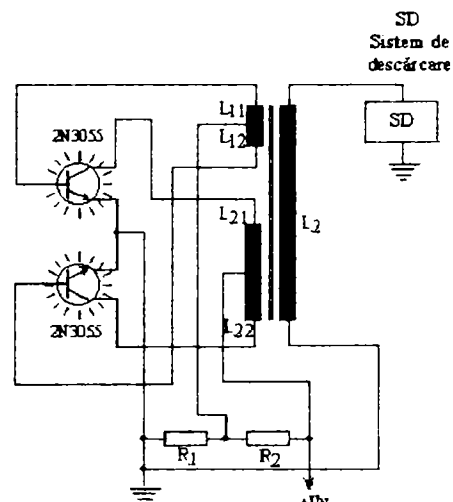
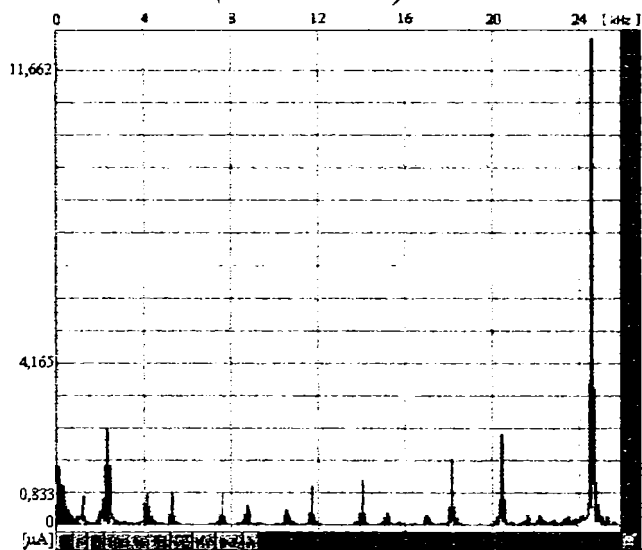
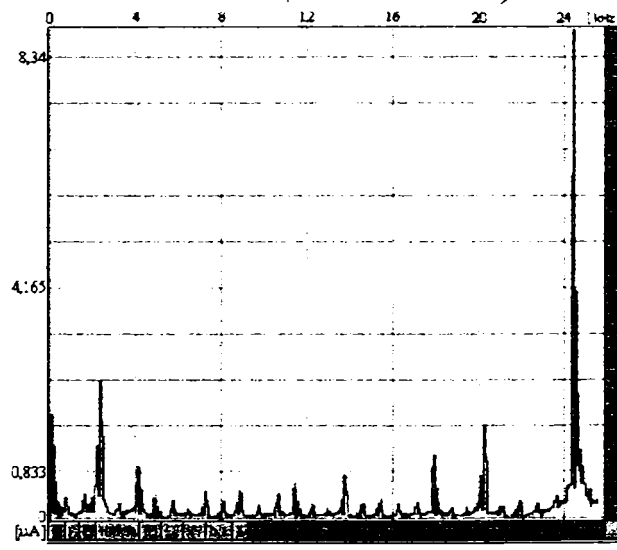


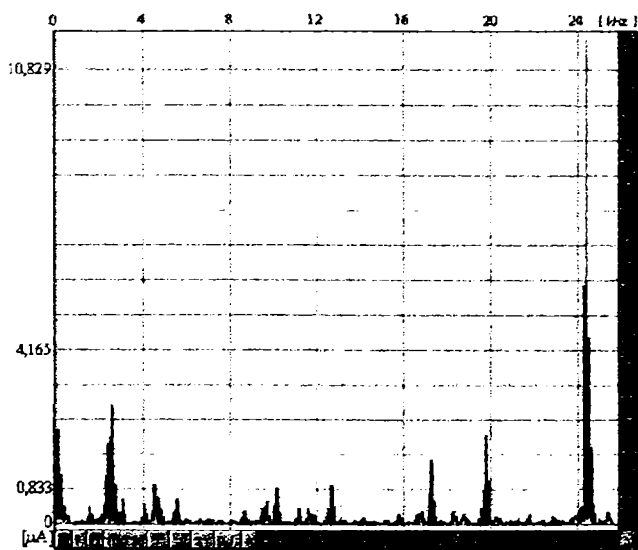
Fig.5.46. Invertor în contratimp (varianta II-a)



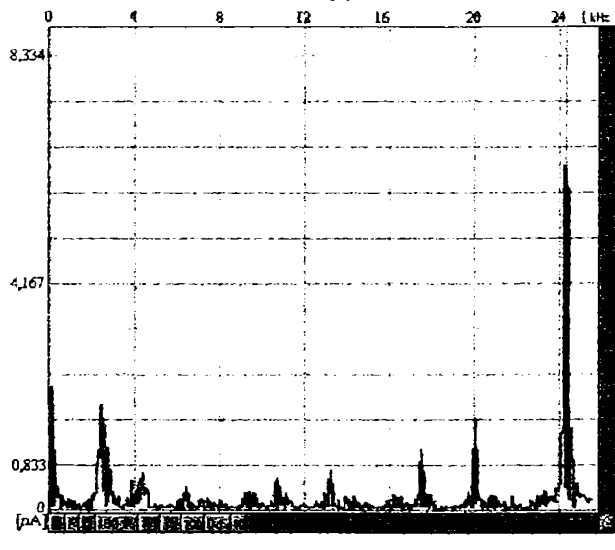
a.



b.



c.



d.

Fig.5.47. Analiza armonică a curentului Corona în cazul U^+ : a. $d=1cm$, $U^+=3kV$; b. $d=1cm$, $U^+=3,33kV$ c. $d=1cm$, $U^+=3,66kV$; d. $d=1cm$, $U^+=4kV$

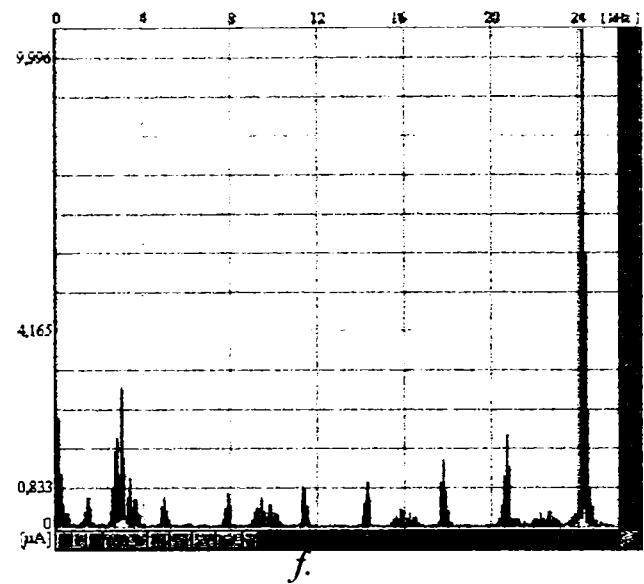
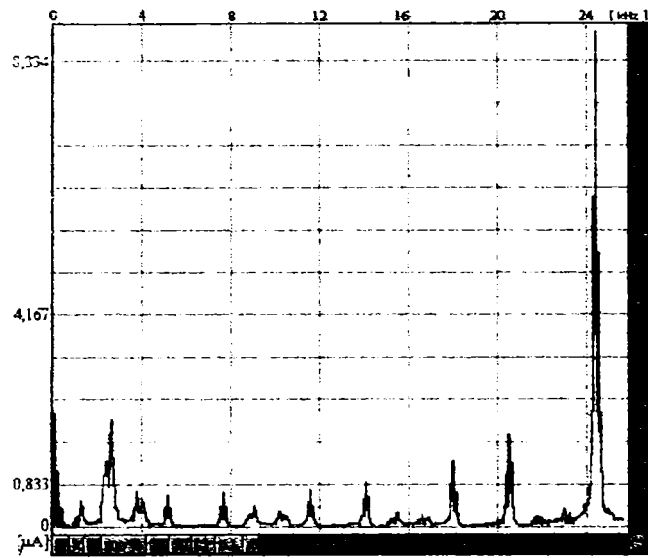


Fig.5.47. Analiza armonică a curentului Corona în cazul U^- : e. $d=1,5\text{cm}$, $U^- = 4\text{kV}$;
f. $d=2\text{cm}$, $U^- = 4\text{kV}$

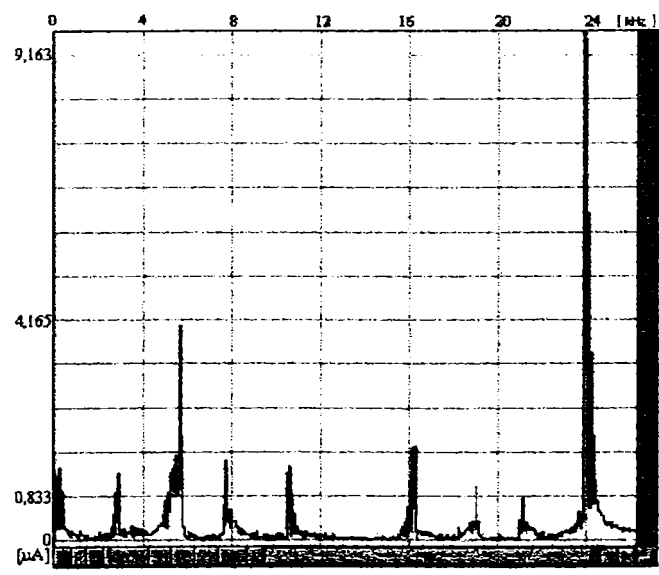
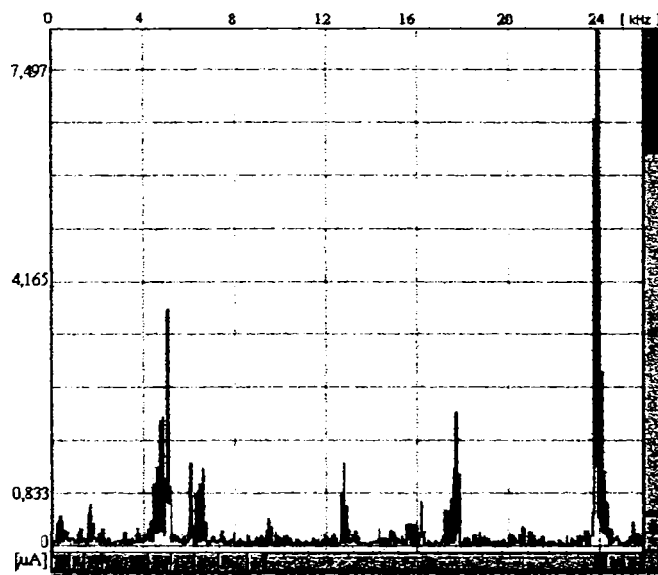
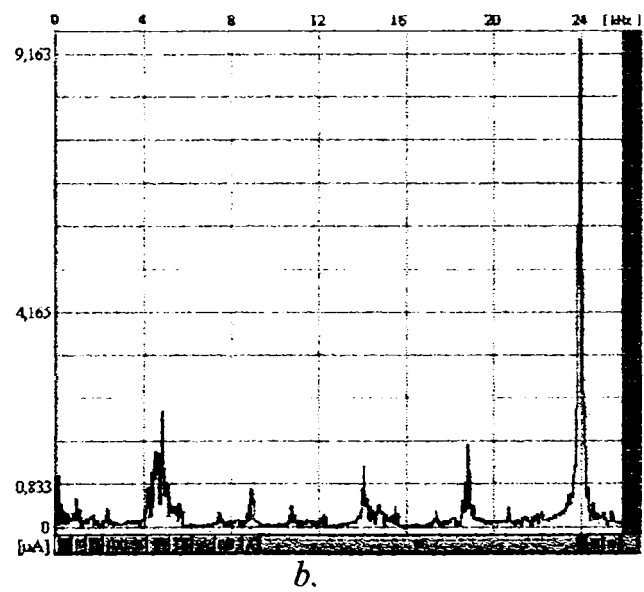
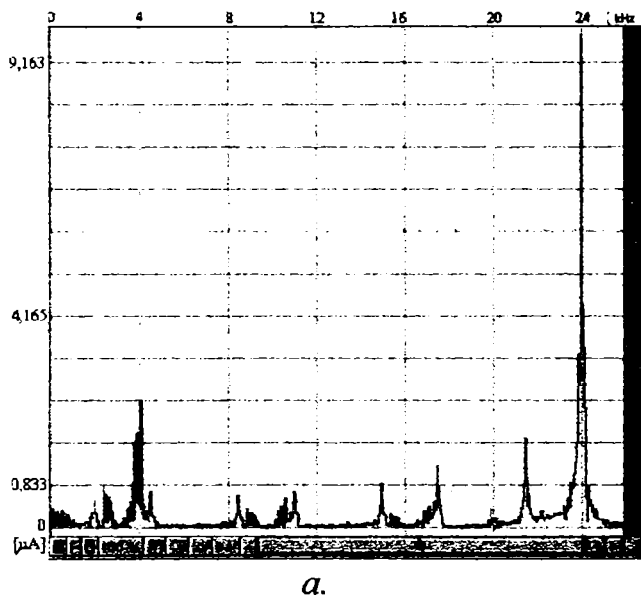


Fig.5.48. Analiza armonică a curentului Corona în cazul U^- : a. $d=1\text{cm}$, $U^- = 3\text{kV}$;
b. $d=1\text{cm}$, $U^- = 3,33\text{kV}$; c. $d=1\text{cm}$, $U^- = 3,66\text{kV}$; d. $d=1\text{cm}$, $U^- = 4\text{kV}$

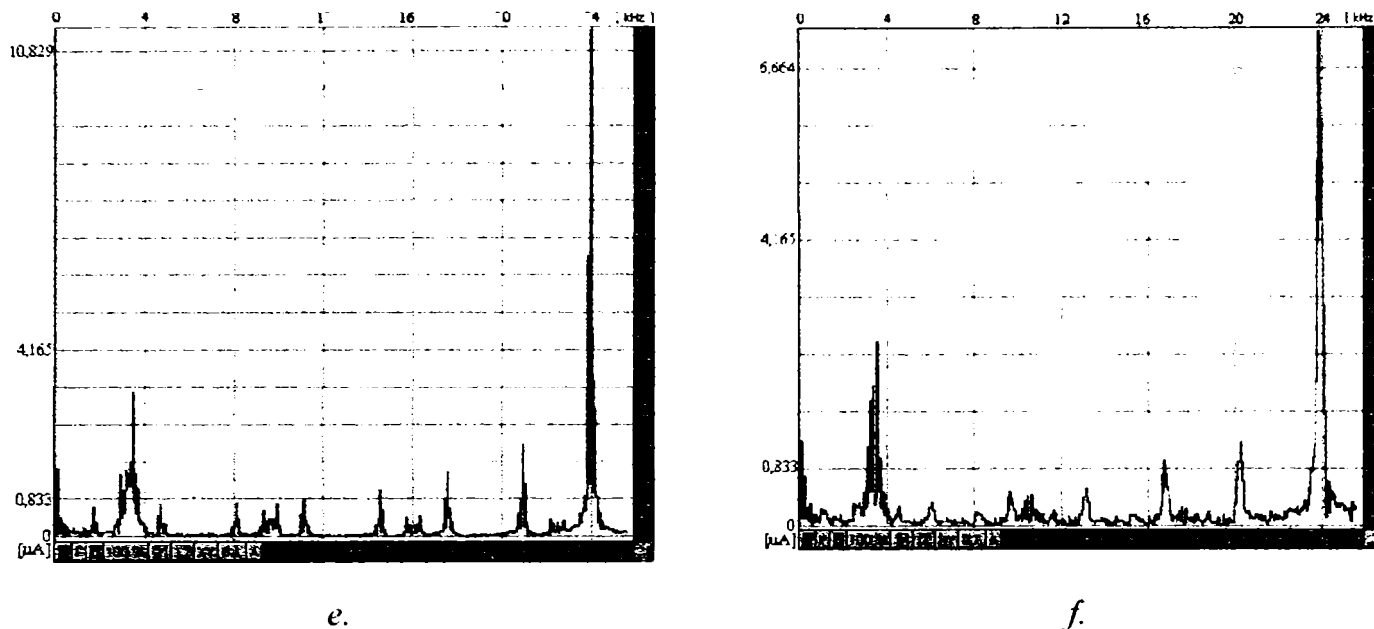


Fig.5.48. Analiza armonică a curentului Corona în cazul U : e. $d=1,5\text{cm}$, $U = -4\text{kV}$; f. $d=2\text{cm}$, $U = 4\text{kV}$

La alimentarea pozitivă a electrodului de emisie a sistemului de descărcare (fig.5.47) se constată, pentru aceeași distanță între electrozi ($d=1\text{cm}$) o reducere a fundamentalei de 24kHz odată cu creșterea tensiunii de alimentare (de la 3 la 4kV). Subarmonicile mai evidente sunt cele cu frecvențele de 2kHz, 18kHz și 20kHz.

În cazul alimentării negative a electrozilor de emisie a sistemului de descărcare (fig.5.48), fundamentala curentului este tot la 24kHz, iar subarmonicile mai evidente sunt la 4kHz, 6kHz, 14kHz, 20kHz. Amplitudinile subarmonicilor în acest caz sunt mai mici decât în cazul alimentării pozitive.

5.3.2.2. Studiul sunetului Corona

Pentru măsurarea sunetului Corona la înaltă frecvență s-a utilizat schemă electrică din fig.5.49.

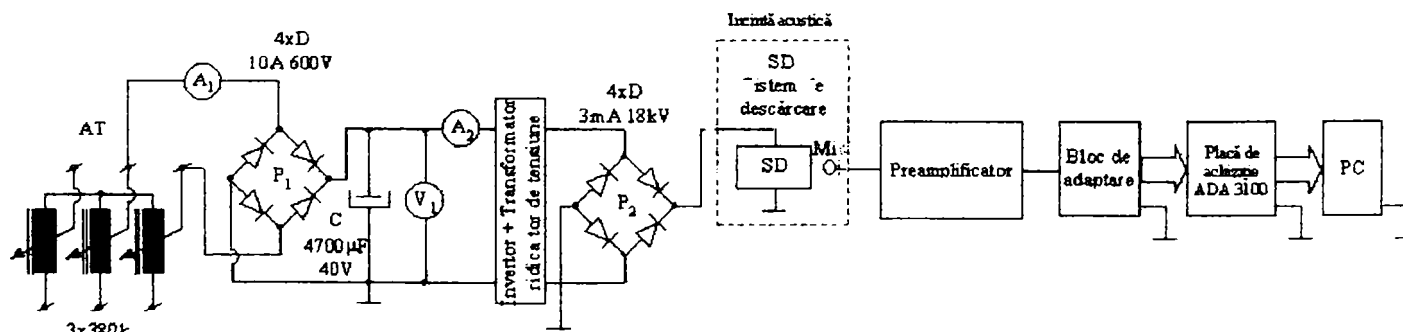


Fig.5.49. Schema electrică și electronică utilizată la măsurarea sunetului Corona la înaltă frecvență

În principiu, schema din fig.5.49 are aceeași funcțiune ca și cea din fig.5.30, cu deosebirea că între electrozi se aplică tensiune de înaltă frecvență redresată.

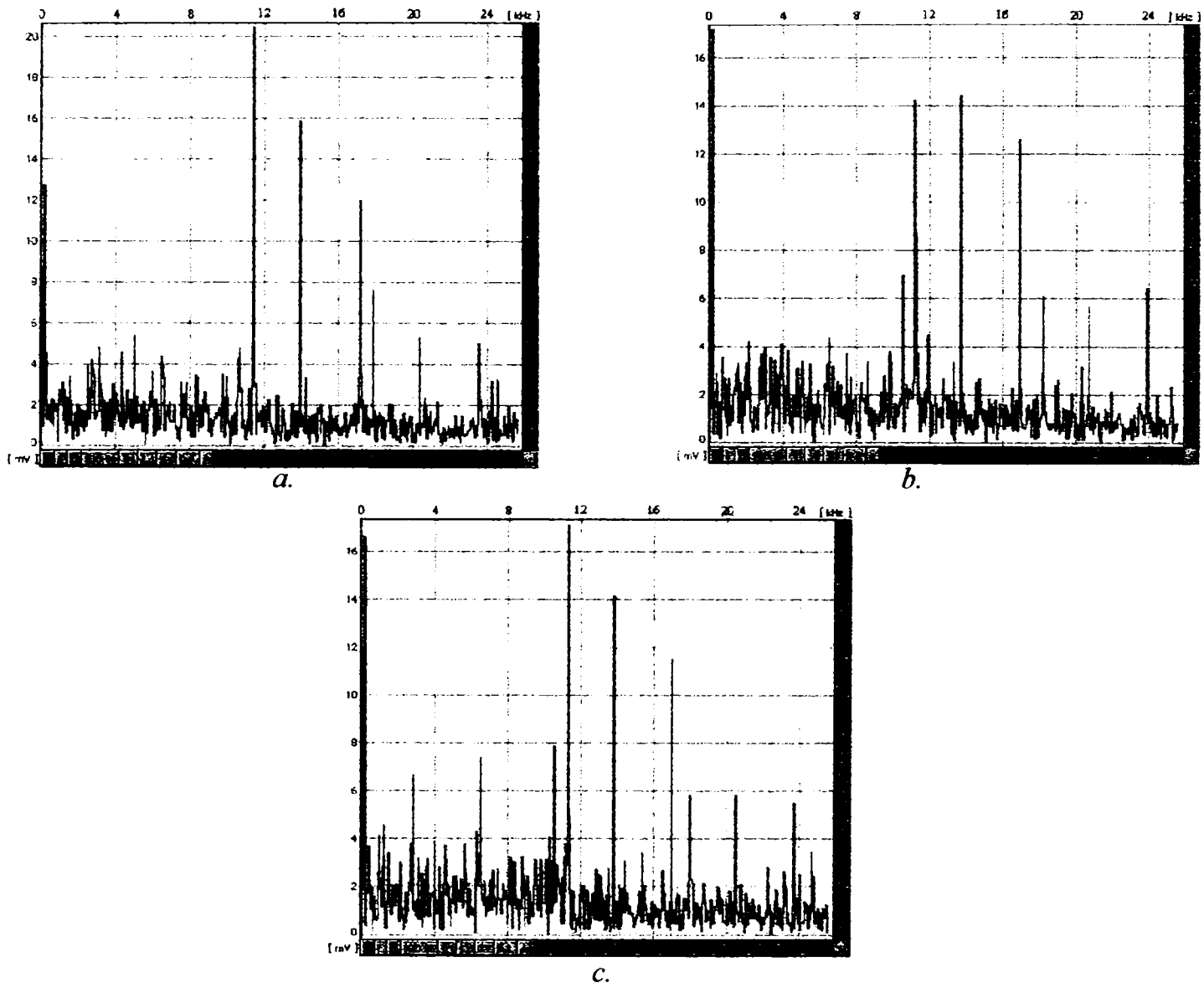


Fig.5.50. Analiza armonică a sunetului Corona în cazul U^+ :
 a. $d=1\text{cm}$, $U^+=4\text{kV}$; b. $d=1,5\text{ cm}$, $U^+=4\text{kV}$; c. $d=2\text{ cm}$, $U^+=4\text{kV}$

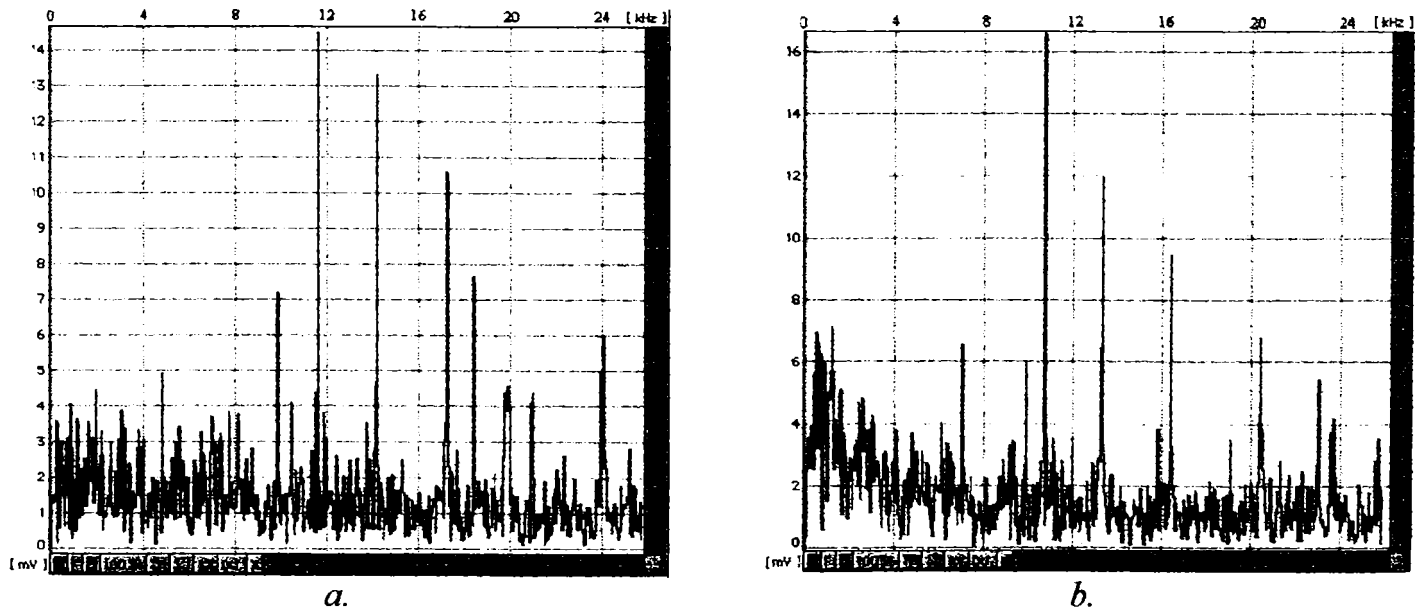
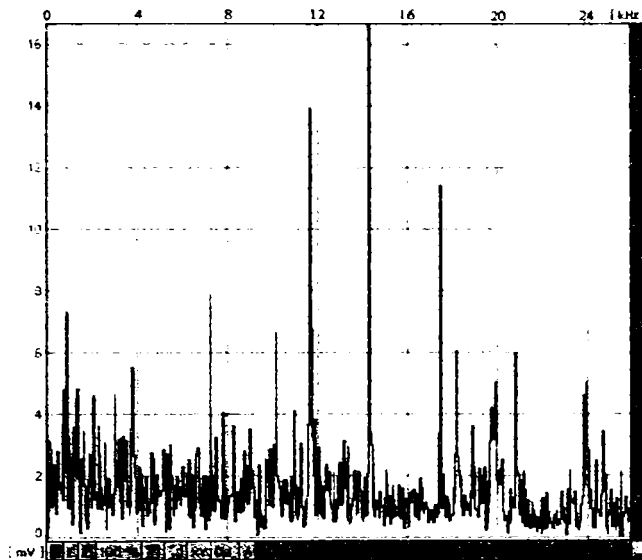


Fig.5.51. Analiza armonică a sunetului Corona în cazul U^- :
 a. $d=1\text{cm}$, $U^-=4\text{kV}$; b. $d=1,5\text{cm}$, $U^-=4\text{kV}$



c.

Fig.5.51. Analiza armonică a sunetului Corona în cazul U^- :
c. $d=2\text{cm}$, $U=-4\text{kV}$

La alimentarea pozitivă a electrozilor de descărcare (fig.5.50) se constată prezența unor sunete de joasă frecvență, care în aceleași condiții la alimentarea negativă (fig.5.51), acestea nu apar. Pentru aceeași tensiune de alimentare, atât la alimentarea pozitivă cât și la cea negativă apar armonici la 11,5kHz, 13kHz, 16,5kHz. Armonica de 24 kHz are amplitudine mică. Amplitudinile armonicilor la alimentarea negativă (fig.5.51) sunt mai mari decât în cazul alimentării pozitive.

Armonicile cu amplitudinile cele mai mari, se regăsesc și în spectrul sunetului care apare la alimentarea electrozilor cu tensiune la frecvență industrială (fig.5.40, 5.41). Aceste armonici sunt la frecvențele de 11,5kHz, 13kHz, 17kHz, 20kHz, 24kHz. Sunetele de aceste frecvențe sunt produse de vântul ionic.

5.4. Posibilități de comandă ale electrofiltrelor cu plăci

5.4.1. Generalități

Pentru realizarea unei comenzi eficiente a alimentării cu energie electrică și a scuturării câmpurilor electrofiltrului, trebuie ținut cont de foarte multe variabile, care de cele mai multe ori sunt greu de măsurat. Variabilele acestea sunt: modul de încărcare electrostatică a particulelor, dimensiunile și distribuția particulelor de praf, curgerea gazului, temperatura, rezistivitatea prafului, modul de măcinare al combustibilului din cazanele de ardere, modul în care are loc arderea în cazan, etc. Astfel de sisteme complexe s-au implementat pe automate programabile specializate și cu softuri adecvate [115,155,174].

Modificarea parametrilor electrofiltrelor într-un domeiu larg, și uneori fără o corespondență bine definită între ei, face foarte dificilă modelarea matematică a fenomenelor complexe din electrofiltre. Prin utilizarea unor seturi de reguli, între principalii parametri ai electrofiltrelor, reglarea fuzzy poate fi o alternativă la comanda surselor de alimentare (a strategiilor de comandă a

tensiunilor) și a scuturării câmpurilor electrofiltrelor. Cercetări în domeniu au fost făcute cu rezultate bune [32,119].

Controlul statistic al proceselor este un concept care se bazează pe metode statistice care monitorizează etapele unui proces industrial. Pentru a utiliza acest procedeu, trebuie achiziționate și analizate variabilele procesului de-a lungul unei perioade de timp, când procesul are loc în condiții stabile. Este importantă cunoașterea evoluției variabilelor procesului în anumite condiții de funcționare, pentru a se prezice evoluția lui viitoare. Pentru un set dat de condiții inițiale se poate prezice exact cum se va schimba fiecare parametru și care este timpul necesar pentru a se face această schimbare. Pentru a putea aplica controlul statistic, este importantă cunoașterea cauzelor modificării parametrilor procesului. În general, există două tipuri de variație, determinate în funcție de cauze: comune și speciale.

S-a determinat din experimentări că mai mult de 80% din variațiile parametrilor procesului sunt produse de cauzele comune. Pentru a putea face diferența între cauzele comune și cele speciale, care au determinat variabilele procesului, se utilizează în general doi parametri \bar{x} și R:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (5.19)$$

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (5.20)$$

unde \bar{x} este valoarea medie a măsurătorilor dintr-un grup, iar R este rangul grupului, x_{max} - valoarea maximă a grupului, iar x_{min} - valoarea minimă a grupului [38].

Valoarea rangului pentru fiecare grup este un indicator al instabilității procesului. Limitele superioare și inferioare ale controlului reprezintă relația statistică între variabilele procesului și sunt calculate din rangul grupului. Cauze suplimentare care vor determina modificarea procesului se vor reflecta prin creșterea rangului R. Când cauzele sunt eliminate, R o să scadă. Orice îmbunătățire a procesului va fi observată în rangul R.

Mici schimbări în performanțele echipamentelor care controlează procesul pot determina modificarea parametrilor procesului, care pot conduce la procese instabile. Pentru a implementa în practică un astfel de control, sunt necesare soft-uri și echipamente electronice de ultimă generație, care trebuie să fie capabile să colecteze, manipuleze și să rețină statistic informația în sincronism cu desfășurarea procesului industrial [15,38,65].

Identificarea are ca scop determinarea caracteristicilor dinamice ale procesului. Identificarea este o tehnică experimentală pentru determinarea modelului dinamic al procesului, și cuprinde următoarele etape: -achiziția intrărilor/ieșirilor; alegerea structurii modelului; estimarea parametrilor modelului; validarea modelului identificat. Unul din elementele importante este algoritmul de adaptare parametrică care ajustează parametrii modelului de predicție plecând de la indicațiile culese din sistem la fiecare pas de eșantionare. Noua valoare a parametrilor este egală cu valoarea precedentă la care se adaugă un termen de corecție ce depinde de ultimile măsurători [64].

Un sistem expert este o ramură a inteligenței artificiale și este constiuit din trei module:

- baza de cunoștințe, care este o structură de date ce conține ansamblul cunoștințelor specializate introduse de expertul uman;
- mecanismul de inferență, care preia datele din baza de cunoștințe; acestea sunt utilizate în continuare pentru construirea raționamentului;

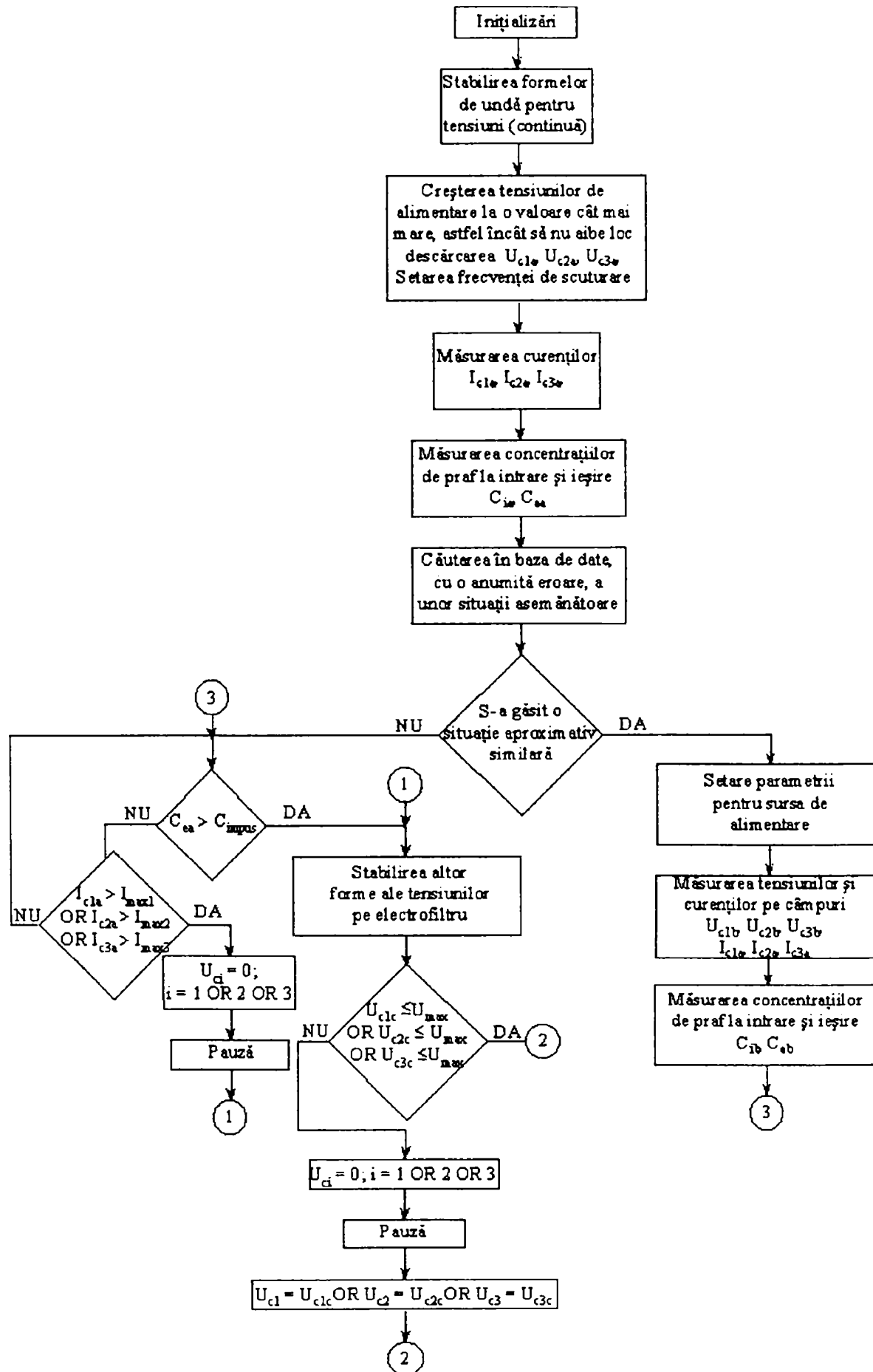


Fig.5.52.a. Schema logică pentru sistemul expert de comandă a unui electrofiltru cu trei câmpuri

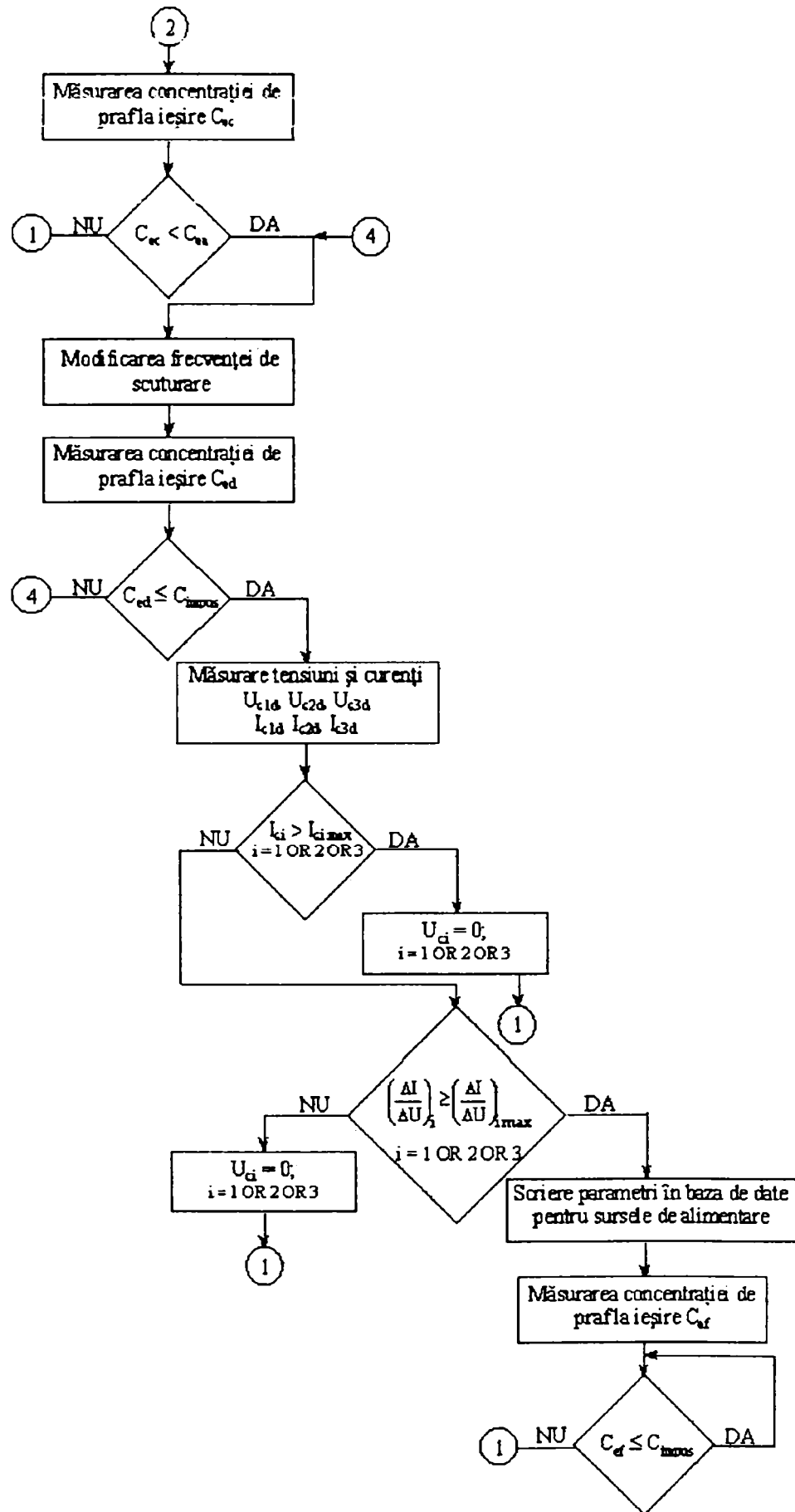


Fig.5.52.b. Schema logică pentru sistemul expert de comandă a unui electrofiltru cu trei câmpuri (continuare)

- baza de fapte este reprezentată de o memorie auxiliară care conține toate datele utilizatorului.

Pentru a construi un sistem expert sunt posibilele variantele:

- existența unei aplicații care să poată fi implementată cu ajutorul unui sistem expert, în detrimentul conducerii clasice;

- existența unui sistem expert specializat pentru o anumită categorie de aplicații la care se atașează o bază de cunoștințe specializată.

O schemă logică, a unui sistem expert, destinată comenzii unui electrofiltru cu trei câmpuri este prezentată în fig.5.52. Prima oară, au loc inițializările de setare a formei tensiunii pentru cele trei câmpuri. Se crește tensiunea pe câmpuri, astfel încât să nu se producă descărcări electrice și se setează frecvența de scuturare pentru fiecare câmp în parte. Măsurarea curenților, tensiunilor și a concentrațiilor de praf, la intrare și la ieșire se execută permanent. Se caută, apoi, în baza de cunoștințe o situație aproximativ similară. Dacă s-a găsit o astfel de situație, se preia algoritmul după care sunt controlate tensiunile pe câmpuri și frecvențele de scuturare. Dacă nu s-a întâlnit o situație similară, se stabilesc alte forme de tensiune pentru electrofiltru, după care se cresc tensiunile pe câmpuri. Dacă concentrația de praf scade sub o limită prestabilită, atunci se modifică frecvența de scuturare. Se verifică periodic să nu se depășească valorile prestabilite ale curenților mășurați pe cele trei câmpuri, care determină descărcări electrice în câmpurile electrofiltrului. Dacă totuși apar descărcări electrice într-unul din câmpurile electrofiltrului, atunci tensiunea pe respectivul câmp se anulează, se realizează o anumită pauză, după care tensiunea crește la o valoare anterioară. Permanent se măsoară ($\Delta I/\Delta U$) și se memorează și valorile anterioare pentru a determina efectul Corona invers. Baza de cunoștințe a sistemului este cel mai dificil de construit. Din multitudinea de parametri care definesc funcționarea unui electrofiltru, trebuie aleși acei parametri care definesc cel mai bine comportarea electrofiltrului. Memorarea parametrilor trebuie să se facă după un anumit algoritm astfel încât căutarea unei situații date să se realizeze pe drumul cel mai scurt. Frecvența de eșantionare a parametrilor electrofiltrului este o altă mărime care trebuie luată în considerare. O frecvență prea mare determină acumularea unui volum mare de cunoștințe, fiind greu de găsit un caz real de funcționare, iar o frecvență prea mică de eșantionare poate "sări" peste cazurile importante.

5.4.2. Utilizarea microcontrolerului MC68HC05B6 la controlul electrofiltrelor

5.4.2.1. Generalități

Unul dintre avantajele sistemelor cu microcontroler este folosirea software-lui pentru a înlocui o logică complexă, fără a modifica nimic în structura hard. Alt avantaj este de a utiliza software în locul unor componente hardware complexe și scumpe. Astfel, prin utilizarea microcontrolerelor se elimină costurile datorate unor componente hardware scumpe și spațiul fizic utilizat este mult mai redus. Totuși, pentru a utiliza un astfel de sistem este necesară investiția în software-ul microcontrolerului [53,141].

Microcontrolerul MC68HC05B6 (Motorola) este un circuit integrat HCMOS, care are următoarele resurse [152]:

- unitate aritmetică și logică, pe 8 biți, care poate executa operații de adunare, scădere, înmulțire, incrementare, decrementare, operații logice, complementare și rotire;
- oscilator pe cip;
- moduri de economisire a energiei: Stop, Wait și Slow;
- 176 de octeți RAM;
- 8 kbytes EEPROM pentru programare;
- 256 octeți EEPROM;
- 16 intrări/ieșiri bidirecționale;
- numărător de 16 biți;
- 2 intrări de captură;
- resetare software a numărătorului principal;
- 8 canale pentru conversie analog – digitală pe 8 biți;
- 2 canale de conversie digital – analogică pe 8 biți (pe principiul PWM modulare în lățime de puls);
- interfață de comunicare serială asincronă;
- tact la ieșire pentru transmisii de date;
- timer extern;
- bit de resetare la pornirea sistemului.

Unitatea centrală de calcul (CPU) procesează informația în acord cu un program de instrucțiuni și date în limbajul numit cod mașină. Controlul CPU se referă la operațiile din sistem și a semnalelor de control pentru validarea și invalidarea diferitelor periferice și dispozitive de intrare/ieșire.

Convertorul analog–digital eșantionează periodic semnalele analogice externe și produce corespunzător valori digitale, necesare prelucrării numerice.

Convertorul digital–analogic acceptă o serie de numere binare de la unitatea de control și produce corespunzător, folosind tehnica PWM, un semnal analogic la ieșire utilizând un filtru extern.

Memoriile cu acces aleator (RAM) sunt utilizate pentru memorarea temporară a datelor și instrucțiunilor. CPU poate scrie și citi informația în RAM într-o ordine aleatoare, fiind o memorie volatilă, informația pierzându-se când memoria nu mai este alimentată cu tensiune.

Memoriile care pot fi numai citite (ROM) sunt permanente fiind scrise de către producătorul memoriei. CPU poate citi informația dintr-o locație ROM dar nu poate scrie în ea. Informația din ROM este nevolatilă, ea nemodificându-se la întreruperea alimentării cu tensiune.

Memoriile ROM programabile care pot fi șterse electric (EEPROM) pot fi programate de utilizator. Odată șterse pot fi reprogramate cu noi instrucțiuni și date, informațiile fiind nevolatile. Timpul de programare a unei astfel de memorii (la o frecvență de tact >2MHz) este de 10 ms iar cel de ștergere de 10 ms.

Porturile de intrare/ieșire bidirecționale conectează microcontrolerul la dispozitivele externe. Această interfață poate opera în paralel sau serial și utilizează logica digitală. Interfața paralelă transferă date de 8 biți între microcontroler și componentele externe.

Interfața de comunicare serială este un subsistem serial de intrare/ieșire. Poate fi utilizat între microcontroler și un terminal (alt microcontroler sau un calculator personal) conectate în rețea.

Calculatorul de proces CC/Basic (placa de inițiere cu microcontroler MC68HC05B6) este un element compact, destinat măsurării, conducerii și reglării, dispunând chiar de capacitatea de a transmite și memora datele [153].

Programarea unui microcontroler este de obicei foarte complicată și necesită o cunoaștere voluminoasă și dispozitive de dezvoltare scumpe. Calculatorul de proces CC/Basic conține un microprocesor, care permite, cu ajutorul unui software dedicat, programarea în limbaj Basic (limbaj de nivel înalt), evitându-se astfel programarea dificilă în limbaj de asamblare. Prin puține linii cu instrucțiuni scrise în Basic se pot conduce instalații de complexitate mică și medie. Calculatorul de proces se conectează printr-o interfață serială RS232 cu un calculator personal folosind cablu cu nouă conductoare. Cu ajutorul calculatorului personal și a softului aferent se concep programele în Basic, se verifică și se depanează, după care se transferă prin interfața serială RS232 în memoria EEPROM a computerului de proces (sistemului cu microcontroler). După transferul programului, computerul de proces poate funcționa și independent.

Un program Basic constă din mai multe linii, așa numitul text sursă, fiecare linie conținând una sau mai multe instrucțiuni de calcul sau de comandă. În anexa 2 sunt prezentate instrucțiunile computerului de proces CC/Basic.

5.4.2.2. Controlul unui electrofiltru virtual

Se propune un sistem de comandă a unui electrofiltru cu trei câmpuri (fig.5.53). Sistemul de comandă are ca element de bază un sistem cu microcontroler MC68HC05B6 pe 8 biți. Se măsoară permanent tensiunile și curenții în electrofiltru. Căderile de tensiuni pe câmpurile electrofiltru se măsoară cu divizoare rezistive care au rezistența cea mai mare legată la electrozii de emisie $R_{d11}=R_{d21}=R_{d31}=10000M\Omega$ (pentru a măsura tensiuni de până la 100kV), rezistențele de valoare mică $R_{d12}=R_{d22}=R_{d32}=100k\Omega$ fiind legate la pământ. Semnalele sunt transmise spre porturile analog-digitale ale plăcii de dezvoltare cu microcontroler, fiind separate galvanic și convertite într-un domeniu de [0-5] V (5V fiind valoarea maximă acceptată pe intrările analog-digitale și digitale). Rezistența de mică valoare este legată în paralel cu un eclator $E_{d1}=E_{d2}=E_{d3}$, pentru a preveni transmiterea unor șocuri de tensiune spre partea de măsurare. Curentul se măsoară cu un șunt de 3A/500mV ($R_{s1}=R_{s2}=R_{s3}$) înseriat cu câmpul. Semnalele (sub formă de tensiune) sunt transmise către porturile microcontrolerului fiind separate galvanic și convertite într-un domeniu acceptat de către microcontroler.

Același procedeu se utilizează pentru măsurarea curenților și tensiunilor pentru fiecare câmp în parte. Se utilizează astfel, trei intrări analog/digitale pentru tensiune (A/D1, A/D2, A/D3) și trei intrări analog-digitale pentru curent (A/D4, A/D5, A/D6) (fig.5.53). La ieșire se măsoară concentrațiile de praf cu un opacimetru OP₂, la ieșirea lor obținându-se tensiuni cuprinse între [0-5] V. Semnalele sunt transmise către porturile analog-digitale (A/D7, A/D8).

Sursele de alimentare ale fiecărui câmp sunt clasice (variator de tensiune alternativă, cu două tiristoare montate în antiparalel și transformator ridicător de tensiune la frecvența de 50Hz), care asigură, prin comanda corespunzătoare de la microcontroler, pe lângă alimentarea continuă și alimentarea intermitentă (cu intermitența de ordinul 3, 5 sau 7).

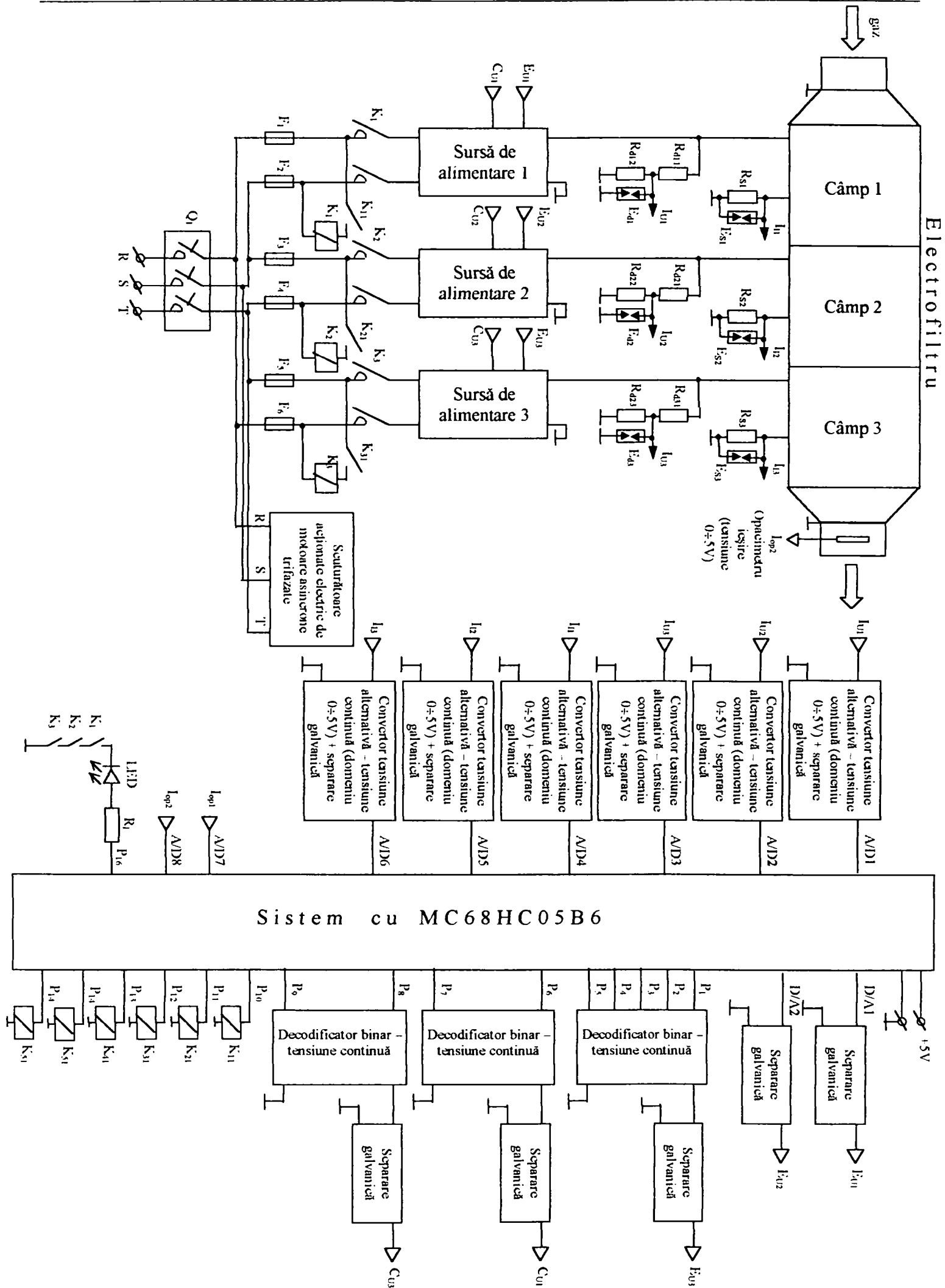


Fig. 5.3. Schema bloc de forță și de comandă a unui electrofiltru cu trei câmpuri

Instalația electrică a electrofiltrelor este alimentată printr-un întreruptor Q_1 , un grup de siguranțe fuzibile F_1, \dots, F_6 (câte două pentru fiecare câmp) și trei contactoare K_1, K_2, K_3 (fiecare cu câte două contacte de forță, pentru câte un câmp). Deoarece microcontrolerul nu poate comanda direct bobinele contactoarelor K_1, K_2, K_3 , sunt necesare trei relee intermediare (de mică putere) K_{11}, K_{21}, K_{31} , care comandă prin contactele lor bobinele contactoarelor K_1, K_2, K_3 .

Fiecare sursă de alimentare a unui câmp dintr-un electrofiltru are câte două semnale de comandă E_u și C_u . E_u este utilizat pentru modificarea amplitudinii tensiunii de alimentare a electrofiltrului între 0 și 60kV (conform tabelului 5.7), iar C_u este utilizat pentru modificarea formei tensiunii de alimentare a unui câmp în patru moduri: tensiune continuă, intermitentă de ordinele 3, 5 și 7 (conform tabelului 5.7). Pentru primele două câmpuri (1 și 2) semnalele E_{u1} și E_{u2} sunt furnizate de cele două porturi digital-analogice ale microcontrolerului cu ajutorul unui grup de separare galvanică. Semnalele de ieșire sunt cuprinse între 0-5 V (corespunzătoare tensiunilor 0-60kV, cu o rezoluție de 0,25kV) (tabelul 5.6). Microcontrolerul are numai două porturi digital-analogice. Pentru comanda amplitudinii tensiunii de alimentare a celui de-al treilea câmp se apelează la un artificiu și anume se utilizează cinci porturi digitale ($P_1 P_2 P_3 P_4 P_5$) (care determină valorile din tabelul 5.8). Forma tensiunii este determinată prin porturile digitale P_6P_7 (patru forme), pentru câmpurile 1 și 2 și prin porturile digitale P_8P_9 (patru forme), pentru câmpul 3 (tabelul 5.7).

Tabelul 5.6.

Modificarea amplitudinii tensiunii pentru câmpurile 1 și 2

Valoarea zecimală din microcontroler	Tensiune ieșire din microcontroler [V]	Amplitudine tensiune în electrofiltru [kV]
0	0	0
1	0,0196	0,25
2	0,0392	0,5
3	0,0588	0,75
4	0,0784	1
5	0,098	1,25
...		
31	0,607	7,75
32	0,627	8
...
254	4,978	63,5
255	5	63,75

Tabel 5.7.

Modificarea formei tensiunii pentru câmpurile 1, 2 și 3

Tensiune	Câmpurile 1 și 2			Câmpul 3		
	P_6	P_7	C_{u1} [V]	P_8	P_9	C_{u3} [V]
Continuă	0	0	0,058	0	0	0,058
Intermitentă 3	0	1	0,372	0	1	0,372
Intermitentă 5	1	0	2,567	1	0	2,567
Intermitentă 7	1	1	2,881	1	1	2,881

Tabel 5.8.

Modificarea amplitudinii tensiunii pentru câmpul 3

Valoare ieșire microcontroler (binar) P ₁ P ₂ P ₃ P ₄ P ₅ 111	Valoare zecimală corespunzătoare intrare convertor digital-analogic βDAC08	Tensiune de comandă [V]	Amplitudine tensiune în electrofiltru [kV]
00000111	7	0,137	0
00001111	15	0,284	5
00010111	23	0,45	10
00011111	31	0,607	15
00100111	39	0,764	20
00101111	47	0,921	25
00110111	55	1,087	30
00111111	63	1,235	35
01000111	71	1,392	36
...
11110111	247	4,843	59
11111111	255	5	60

Pentru convertirea semnalului de la ieșirile porturilor digitale P₁, P₂, P₃, P₄, P₅ într-o mărime analogică de comandă se folosește un convertor digital-analogic de 8 biți, la care biții cei mai puțini semnificativi se conectează la 1 logic (tabelul 5.9). De aceea, pe coloana nr. 1 a tabelului 5.8, ultimii trei cei mai puțin semnificativi biți sunt puși pe 1 logic.

Tabelul 5.9.

Conectarea porturilor digitale de ieșire ale microcontrolerului la porturile de intrare ale convertorului βDAC- 08, pentru comanda amplitudinii pentru portul 3

Port ieșire MC68HC05B6	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	1	1	1
Port intrare βDAC- 08	B ₁ (MSB)	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈ (LSB)

Tabelul 5.10.

Conectarea porturilor digitale de ieșire ale microcontrolerului la porturile de intrare în convertorul βDAC- 08, pentru comanda formei tensiunilor din câmpurile 1, 2 și 3

Port ieșire MC68HC05B6	P ₆	0	0	P ₇	0	0	1	1
	P ₈	0	0	P ₉	0	0	1	1
Port intrare βDAC- 08	B ₁ (MSB)	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈ (LSB)

Se face observația că în tabelele 5.9 și 5.10, B₁ este bitul cel mai semnificativ (MSB), iar B₈ bitul cel mai puțin semnificativ (LSB) al convertorului βDAC- 08.

Schema electronică a convertorului digital-analogic este prezentată în fig.5.54 [111,141]. Convertorul βDAC-08 realizează conversia digital-analogică (curent la ieșirea pinului 4, fig.5.54). Tensiunea de referință a convertorului se obține cu dioda Zener DZ5. Tensiunea de comandă de la

ieșirea convertorului rezultă după amplificatorul operațional $\beta A741$. Același tip de convertor din fig.5.54 poate fi utilizat și la comanda formei tensiunilor pentru cele trei câmpuri.

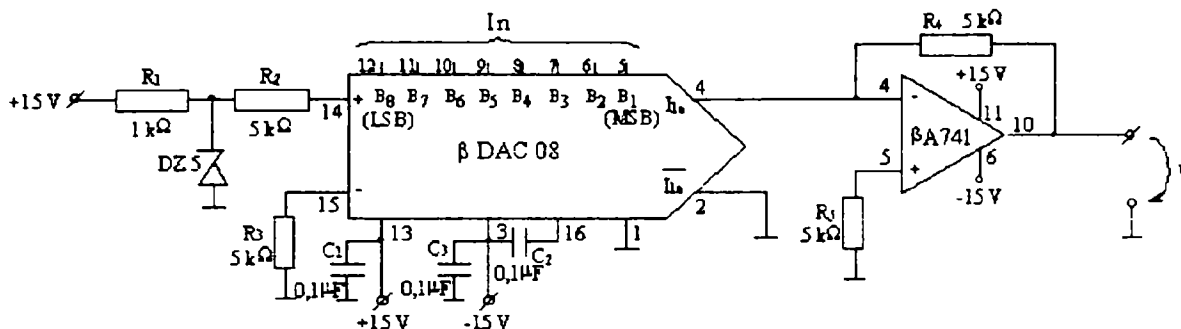


Fig.5.54. Convertor digital-analogic realizat cu $\beta DAC-08$

Scuturarea electrozilor de depunere a electrofiltrului se realizează cu câte patru motoare asincrone trifazate ($P=0,18$ kW) pentru fiecare câmp (fig.5.55). Motoarele sunt alimentate prin contactoarele K_4 , K_5 și K_6 , ale căror bobine se alimentează prin contactele normale deschise ale releelor K_{41} , K_{51} și K_{61} . Aceste relee sunt comandate de porturile digitale P_{13} , P_{14} , P_{15} . Motoarele sunt protejate printr-un grup de siguranțe fuzibile F_7, \dots, F_{15} .

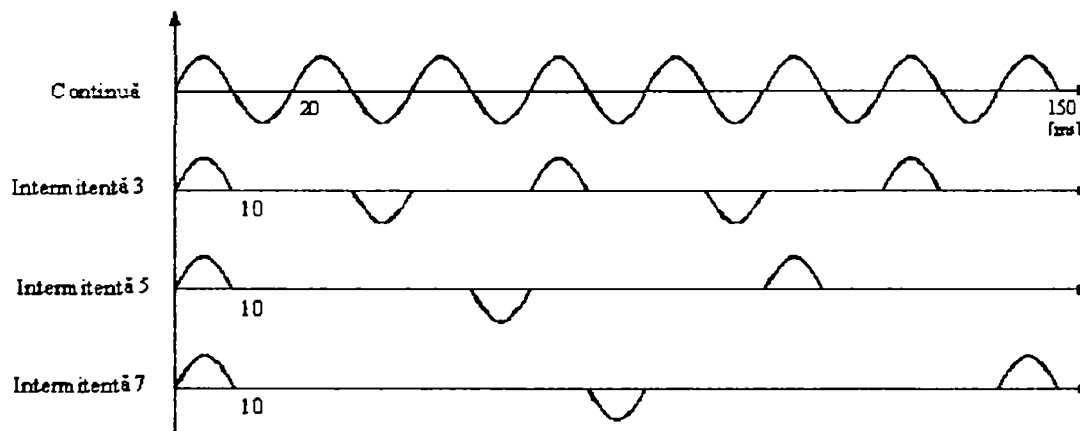


Fig.5.55. Diagramele tensiune de alimentare-timp pentru alimentare continuă, intermitență de ordinul 3, 5, 7

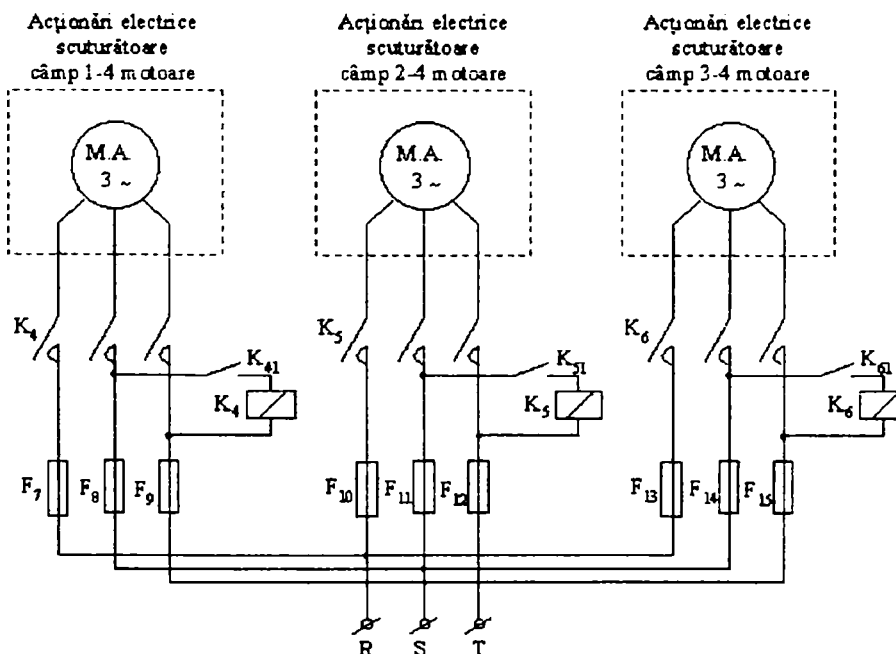


Fig.5.56. Acționarea electrică a scuturării celor trei câmpuri

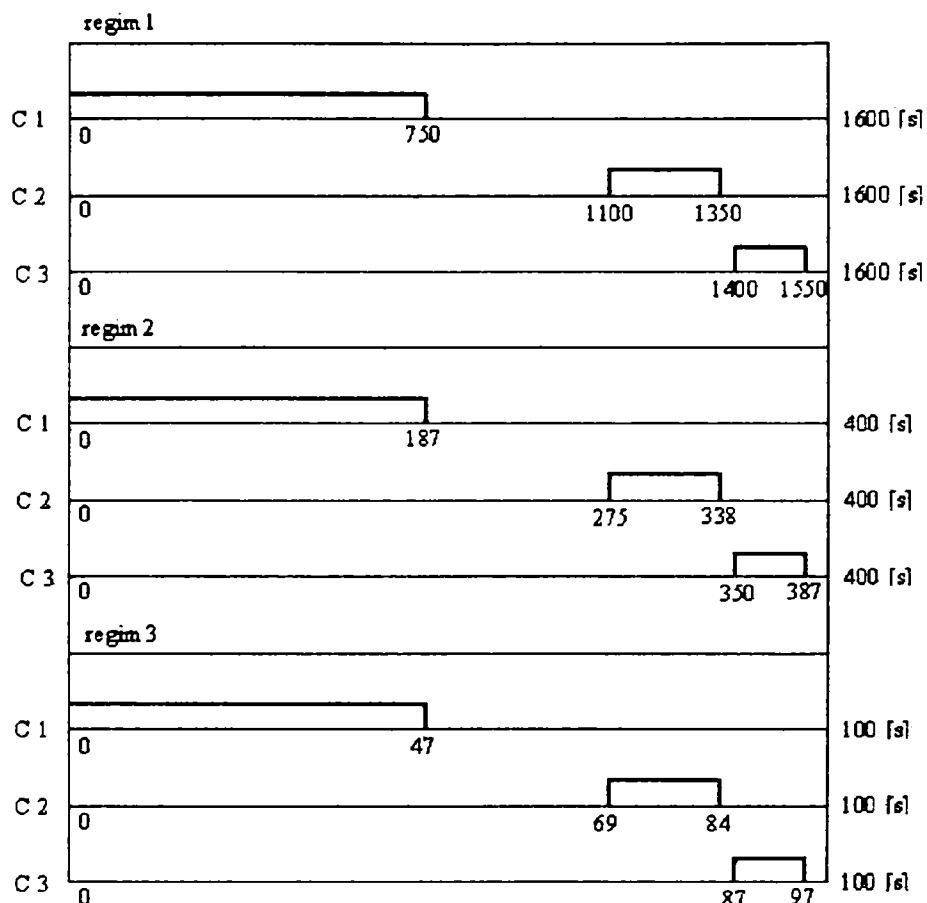


Fig.5.57. Diagramele de timp ale celor trei regimuri de scuturare pentru fiecare câmp în parte

Câmpurile electrofiltrului sunt scuturate după un anumit regim și cu o anumită frecvență de scuturare (cu durate de funcționare și pauze bine precizate). S-au propus trei regimuri de scuturare pentru cele trei câmpuri ale electrofiltrului conform fig.5.57.

Portul digital P₁₆ împreună cu o rezistență de limitare și dioda LED sunt înseriate cu contactele auxiliare normal deschise ale releelor K₁, K₂, K₃. Dacă portul este setat la 1 logic (5 V) și câmpurile electrofiltrelor sunt alimentate cu tensiune, atunci dioda LED avertizează optic alimentarea cu tensiune a câmpurilor electrofiltrului. Atât tensiunile, cât și curenții măsurați din câmpurile electrofiltrelor trebuie convertiți din tensiuni alternative (datorită divizoarelor de tensiune și a șunturilor de măsurare a curenților, fig.5.53) în tensiuni continue (cu domeniul maxim de 5 V) cu ajutorul unor montaje de adaptare (fig.5.58).

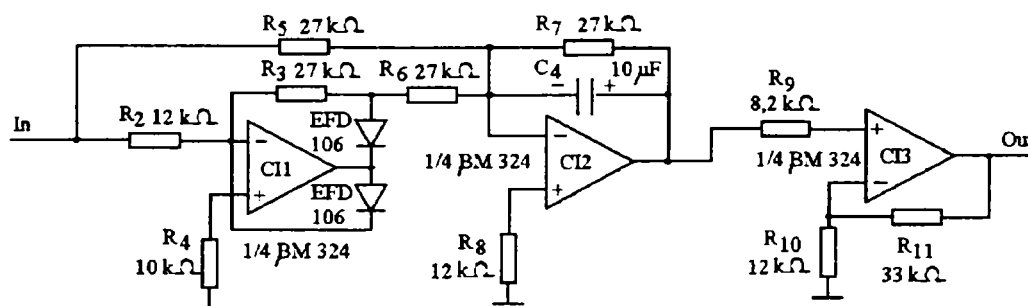


Fig.5.58. Convertorul utilizat la conversia tensiune alternativă-tensiune continuă

Convertorul din fig.5.58 are în componență un redresor de precizie bialternanță, realizat cu CI1 și componentele externe, care realizează redresarea tensiunilor alternative de valori mici

(tensiuni sub tensiunea de deschidere a unei diode). După redresare, semnalul este filtrat cu un filtru activ trece-jos realizat cu CI2 și componentele externe, care este astfel proiectat încât să atenueze armonicile componentelor alternative. Semnalul este amplificat cu ajutorul amplificatorului realizat cu CI3 și rezistențele R₉, R₁₀ și R₁₁ [90,111]. Separarea galvanică a semnalelor se poate realiza cu ajutorul schemei din fig.5.59 [57]. Dispozitivul electronic cu schema din fig.5.59 este format dintr-un modul de transmisie și un modul receptor, legătura între module realizându-se cu fibră optică.

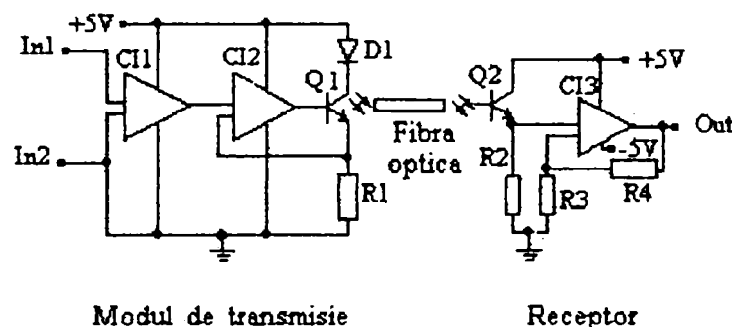


Fig.5.59. Schemă care realizează separarea galvanică

În fig.5.60 este prezentată schema logică generală a programului utilizat la controlul electrofiltrului cu trei câmpuri. Listingul programului este dat în anexa 3.

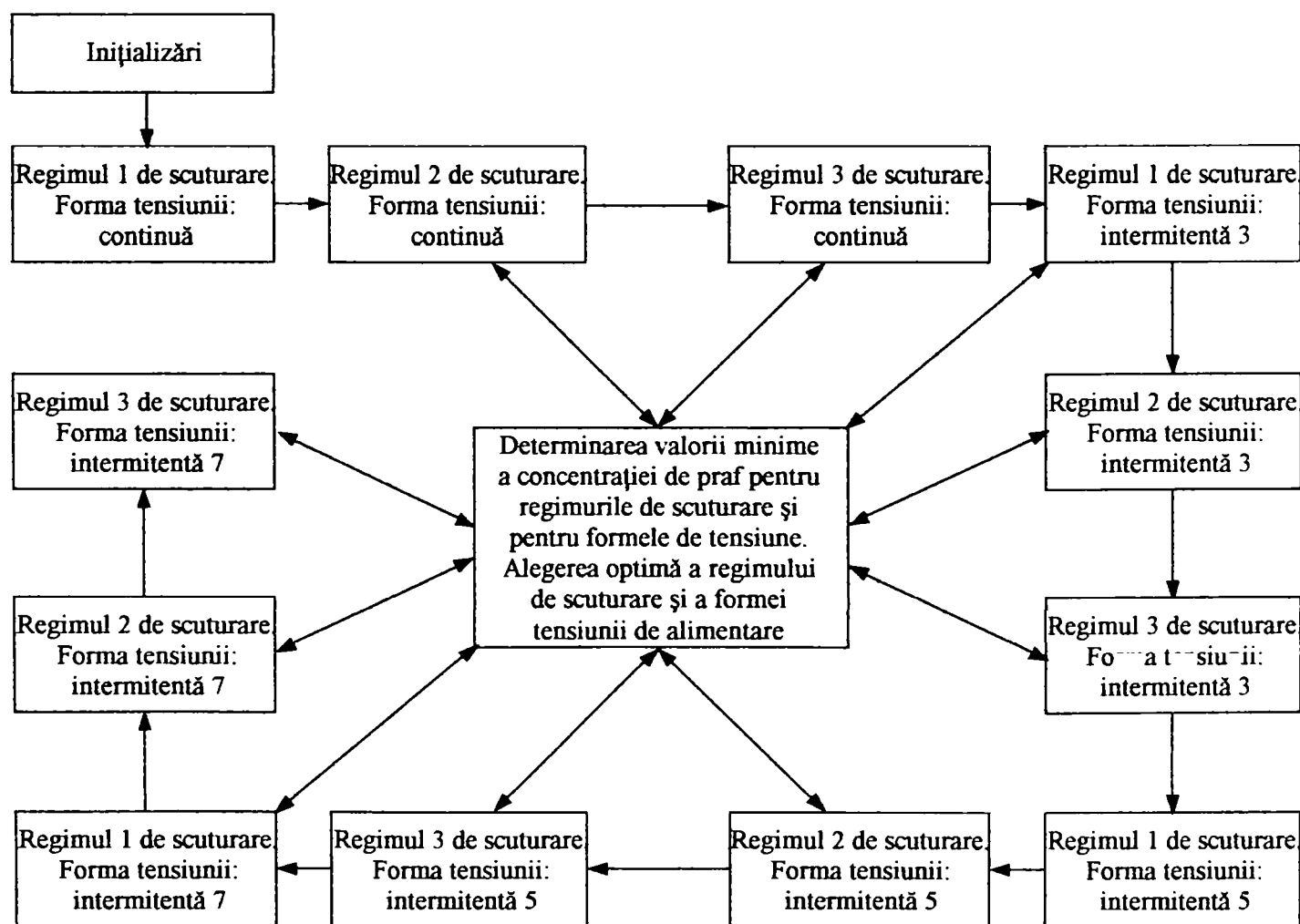


Fig.5.60. Schema logică generală a programului utilizat la comanda electrofiltrului cu trei câmpuri

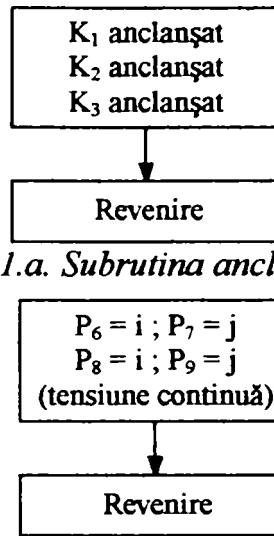


Fig.5.61.a. Subrutina anclanșare

Fig.5.61.b. Subrutine forme tensiuni (unde i, j au valorile conform tabelului 5.7)

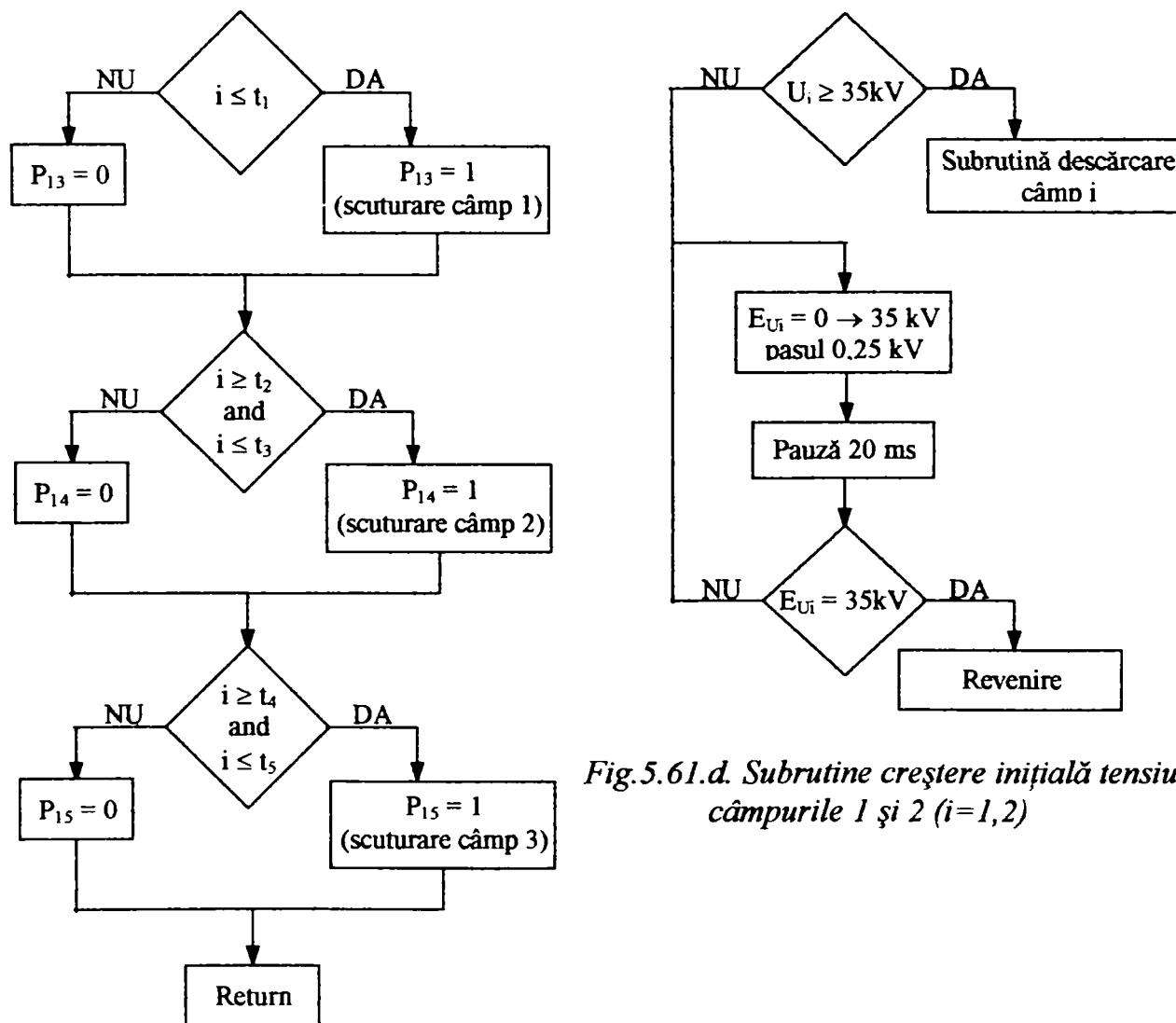


Fig.5.61.d. Subrutine creștere inițială tensiune pe câmpurile 1 și 2 ($i=1,2$)

Fig.5.61.c. Subrutine scuturare câmpuri unde (conform fig.5.55):

Cazul I: $t_1 = 750$ s; $t_2 = 1100$ s; $t_3 = 1350$ s; $t_4 = 1400$ s; $t_5 = 1550$ s

Cazul II: $t_1 = 187$ s; $t_2 = 275$ s; $t_3 = 338$ s; $t_4 = 350$ s; $t_5 = 387$ s

Cazul III: $t_1 = 47$ s; $t_2 = 69$ s; $t_3 = 84$ s; $t_4 = 87$ s; $t_5 = 97$ s

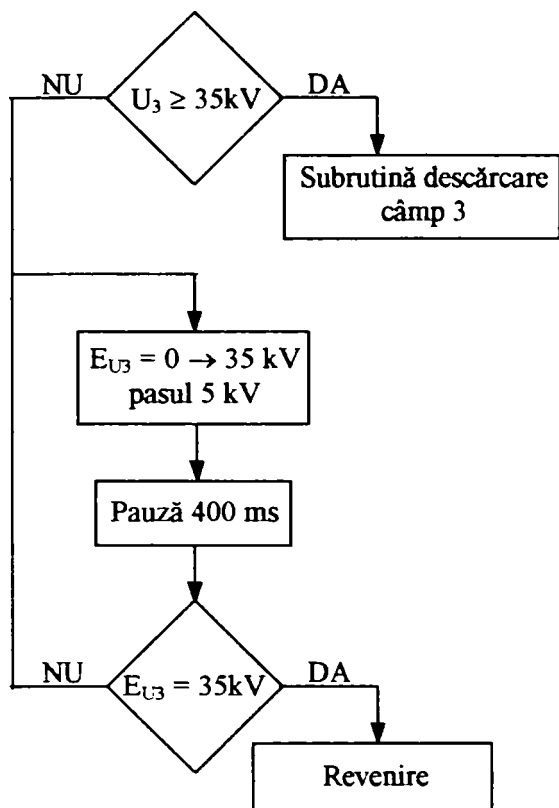


Fig.5.61.e. Subrutine creștere inițială tensiune pe câmpul 3

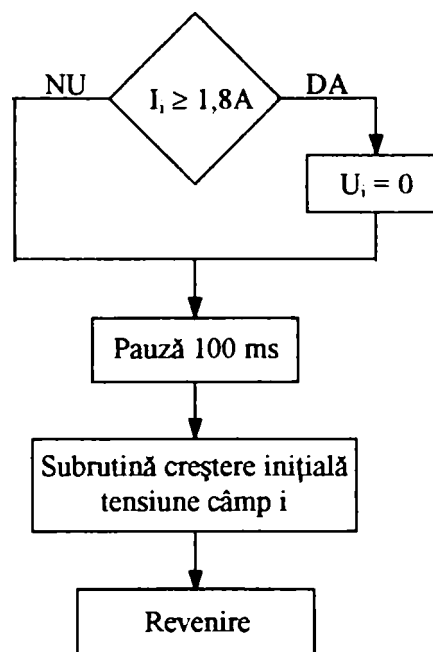


Fig.5.61.f. Subrutine verificare descărcare electrică pe câmpurile 1, 2 și 3

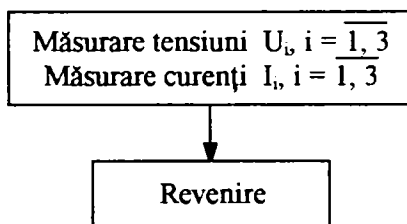


Fig.5.61.g. Subrutine măsurări tensiuni și curenți pe câmpurile 1, 2 și 3

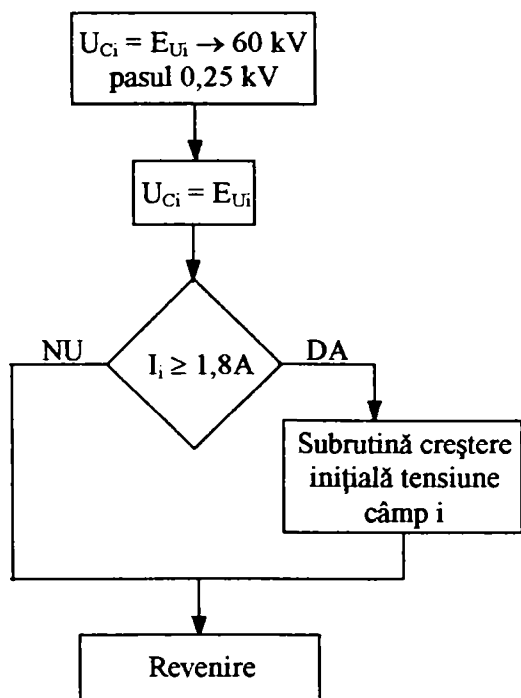


Fig.5.61.h. Subrutine creștere tensiuni pe câmpurile 1 și 2

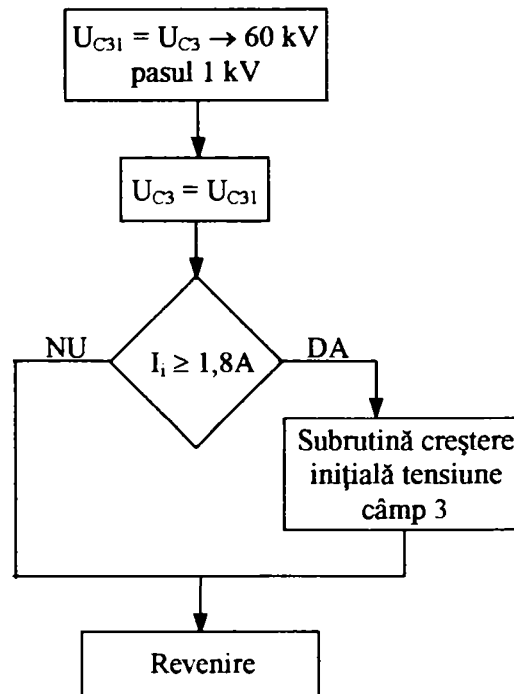


Fig.5.61.i. Subrutine creștere tensiuni pe câmpul 3

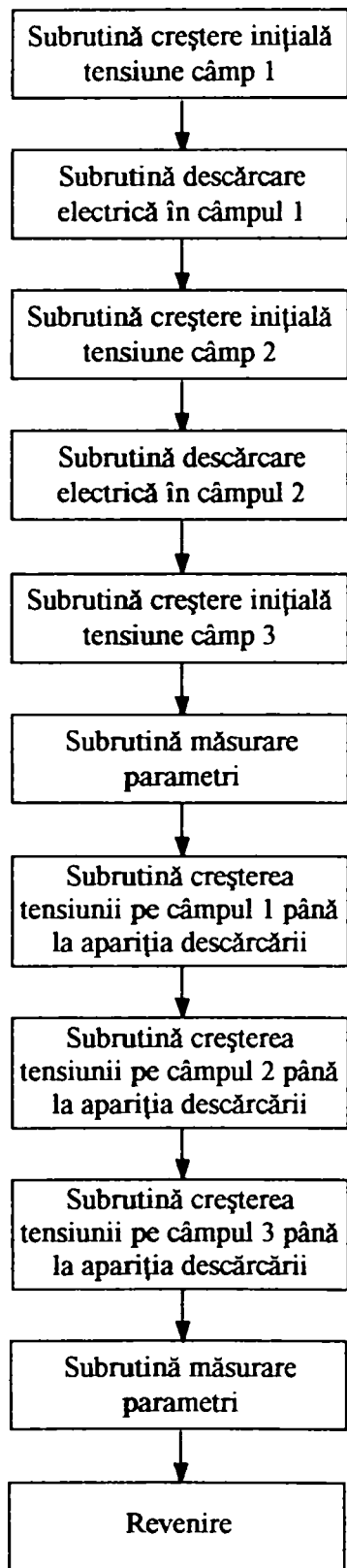


Fig.5.61.j. Subrutină tensiuni optime pe câmpurile 1, 2 și 3

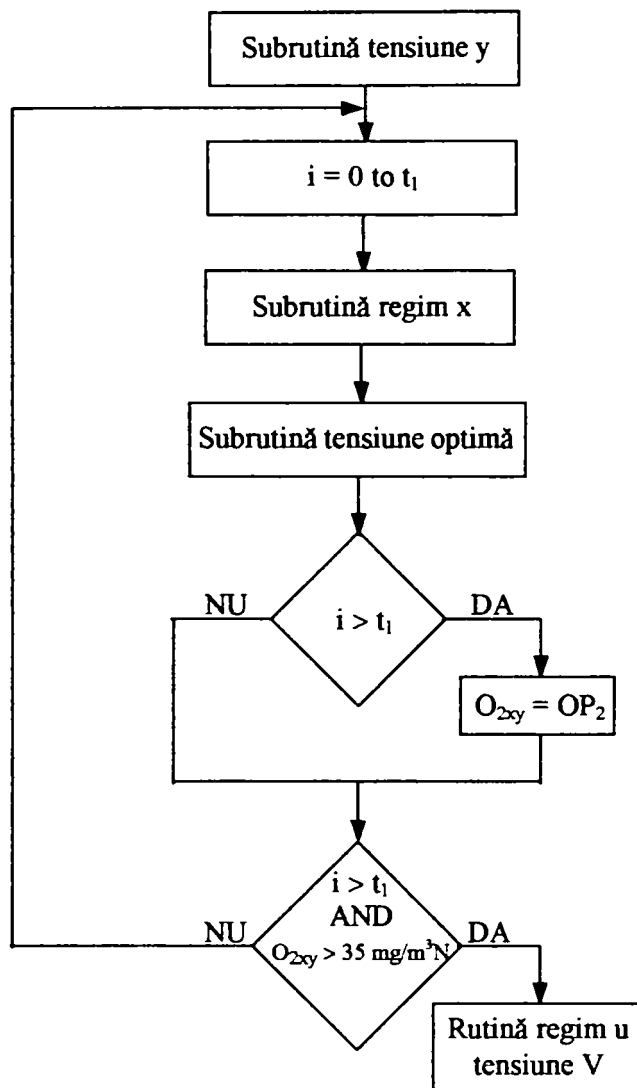


Fig.5.61.k. Schema logică a celor 12 rutine utilizate în fig.5.60 unde:

$y = 1$ -tensiune continuă, 2 - tensiune intermitentă 3, 3 - tensiune intermitentă 5, 4 - tensiune intermitentă 7 ;
 $x=1$ regim 1 scuturare (frecvența cea mai mică de scuturare a câmpurilor); $x=2$ regim 2 scuturare; $x=3$ regim 3 scuturare (frecvența cea mai mare de scuturare a câmpurilor)

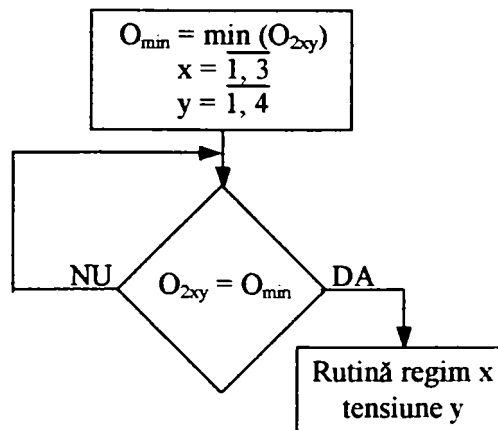


Fig.5.61.l. Rutina centrală de determinare a optimului de funcționare a electrofiltrului în funcție de amplitudinea tensiunii, de forma tensiunii și de regimul de scuturare

Programul de comandă al electrofiltrului cu trei câmpuri se bazează pe măsurarea permanentă a concentrației de praf la ieșire, a tensiunii și a curenților din câmpurile electrofiltrelor, având la bază construcția unui sistem expert.

Programul (listingul în anexa 3) este constituit dintr-o parte de definire a intrărilor, a ieșirilor și a variabilelor, și dintr-un număr de subrutine și rutine. Există o primă parte de inițializări ale porturilor (toate porturile digitale sunt aduse la 0 logic). Se măsoară concentrația de praf la ieșire pentru fiecare regim de scuturare și fiecare formă a tensiunilor pe câmpuri. Regimul unu de scuturare are frecvența cea mai scăzută, al doilea o frecvență de patru ori mai mare, iar al treilea de patru ori mai mare decât regimul doi (fig.5.57). Există patru forme pentru tensiuni: continuă, intermitentă de ordinele 3, 5 și 7. Tensiunile pe câmpuri se maximizează astfel încât să nu se obțină descărcarea în câmpuri. Tensiunea pe câmpuri se adaptează schimbărilor în caracteristicile gazului cu praf. Există 12 astfel de regimuri de funcționare, care sunt utilizate, iar concentrația de praf la ieșire este memorată pentru fiecare caz în parte. Dacă pe parcursul tatonării, nu se găsește un regim de scuturare și o formă de tensiune care să asigure concentrații de praf la ieșire mai mici de $35 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ (care este limita maximă), atunci se alege regimul de funcționare, care are cea mai mică emisie de praf la ieșire. În continuare, se dau câteva explicații rutinelor și subrutinelor din fig.5.61.

Subrutina anclansare (fig.5.61.a) determină anclansarea contactoarelor K_1, K_2, K_3 .

Subrutina forme tensiuni (fig.5.61.b) realizează forma de tensiune.

Subrutine scuturare câmpuri (fig.5.61.c) asigură scuturarea succesivă a câmpurilor conform fig.5.57.

Subrutine creștere inițială tensiuni pe câmpurile 1 și 2 (fig.5.61.d) realizează creșterea tensiunii de alimentare de la 0 la 35 kV, într-un interval de timp de 2,8s din 0,25 în 0,25kV.

Subrutina creștere inițială tensiuni pe câmpul 3 (fig.5.61.e) realizează creșterea tensiunii de alimentare de la 0 la 35 kV, într-un interval de timp de 2,4s din 5 în 5 kV.

Subrutinele verificare descărcare electrică (fig.5.61.f) verifică permanent curenții din câmpurile (1,2,3) ale electrofiltrului pentru a preîntâmpina descărcările electrice.

Subrutina măsurare tensiuni și curenți din câmpurile 1,2,3 (fig.5.61.g) determină măsurarea tensiunilor și a curenților din câmpuri.

Subrutine creșterea tensiunii pe câmpurile 1 și 2 (fig.5.61.h) se realizează prin creșterea cu un pas de 0,25kV a tensiunilor pe câmpurile 1 și 2 până la apariția descărcărilor.

Subrutina creșterea tensiunii pe câmpul 3 (fig.5.61.i) se realizează prin creșterea cu un pas de 1kV a tensiunilor pe câmpul 3 până la apariția descărcărilor.

Subrutina tensiuni optime pe câmpurile 1, 2, și 3 (fig.5.61.j) determină creșterea tensiunilor la o valoare apropiată de tensiunile de descărcare și verificarea descărcărilor electrice pe cele trei câmpuri. Se măsoară permanent parametrii electrici.

Schema logică a programului principal (fig.5.61.k) alege un anumit regim și o anumită formă a tensiunii, iar după un anumit timp prestabilit se măsoară concentrația de praf. Dacă concentrația de praf este mai mică decât de $35 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$, atunci funcționarea electrofiltrului va fi determinată de această rutină.

Rutina centrală de determinare a optimului de funcționare a electrofiltrului (fig.5.61.l) determină minimul concentrațiilor de praf pentru cele 12 regimuri de funcționare (fig.5.60) și se trece la realizarea rutinei la care concentrația de praf este cea mai mică.

Această modalitate de comandă poate fi aplicată la electrofiltrele nr.2 (A și B), 3 (A și B), 4 (A și B), 5 (A și B) și 6 (A și B) de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.

5.4.3. Posibilitatea de utilizare a automatului programabil PS-3 la scuturarea câmpurilor unui electrofiltru industrial

În diferite instalații practice ale electrofiltrelor, o îmbunătățire a performanțelor poate fi realizată prin automatizarea procesului de scuturare a electrozilor din câmpurile electrofiltrului.

Automatul programabil PS 3, de fabricație germană (Klockner-Möeller), este cel mai mic aparat din seria SUCOS PS 3, iar programele făcute pe acesta sunt compatibile cu cele ale automatelor programabile PS 316 și PS 32 din aceeași serie.

PS 3 este un automat programabil de clasă medie a cărui limbaj de programare este normalizat în DIN 19239. Pe lângă faptul că numărul de instrucțiuni este lărgit, comenzile microprocesorului sunt reproduse cu o rapiditate optimă. Atât în controlul cât și în programarea SUCOSOFT PS 3 se află multe funcții care fac cursul programului transparent și ușor de înțeles.

Programarea cu ajutorul automatului PS 3 necesită următoarele aparate:

- PS 3-AC - automat programabil PS 3 conectat la 220 V c.a. [160];
- PRG 3S- consola lui PS-3 utilizat pentru programare [151];
- KPG 2 PS 3 - cablul care leagă consola la automatul programabil;
- SIM 1 PS 3 - placa cu circuite de simulare pentru intrările digitale (opțional).

Există posibilitatea legării mai multor automate programabile PS 3, care pot fi supervizate de un automat programabil central. Automatul programabil este prevăzut cu baterii, pentru ca în lipsa alimentării cu energie electrică, programele și informațiile să rămână memorate.

Automatul programabil PS 3 are 16 intrări care sunt notate astfel: I 0.0,...,I 0.15, iar alimentarea lor se face la 24 V (24 V este considerat 1 logic, curentul maxim absorbit de sursă este de 160mA). Ieșirile automatului programabil PS 3 AC, sunt contacte normal deschise (tensiunea maximă aplicată 220 V) ale unor relee interne. Cele 8 ieșiri sunt notate cu Q 0.0,...,Q 0.7.

Memoria maximă a automatului programabil este de 3,6 kByte RAM, tensiunea de alimentare a memoriilor este de 3V. Viteza de transfer a datelor este de 187,5 kBytes/s, iar lungimea cablului de date este de maxim 600 m.

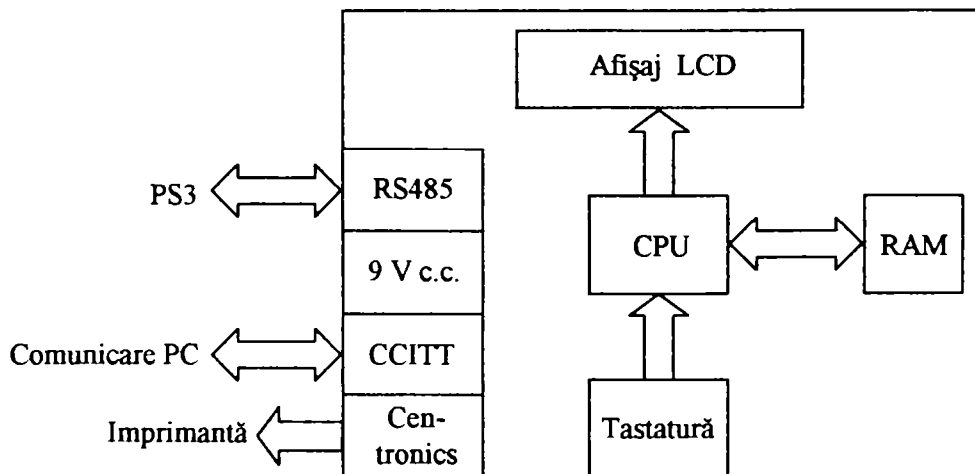


Fig.5.62. Structura internă a consolei programabile PRG-3 [151]

Structura internă a consolei programabile este prezentată în fig.5.62 în care CPU este unitatea centrală de procesare, care este în legătură cu tastatura, memoria (RAM) și afișajul LCD (cu cristale lichide). Pe afișaj, la un moment dat, este doar o linie de program. Programul poate fi listat la imprimantă și există posibilitatea comunicării cu un PC.

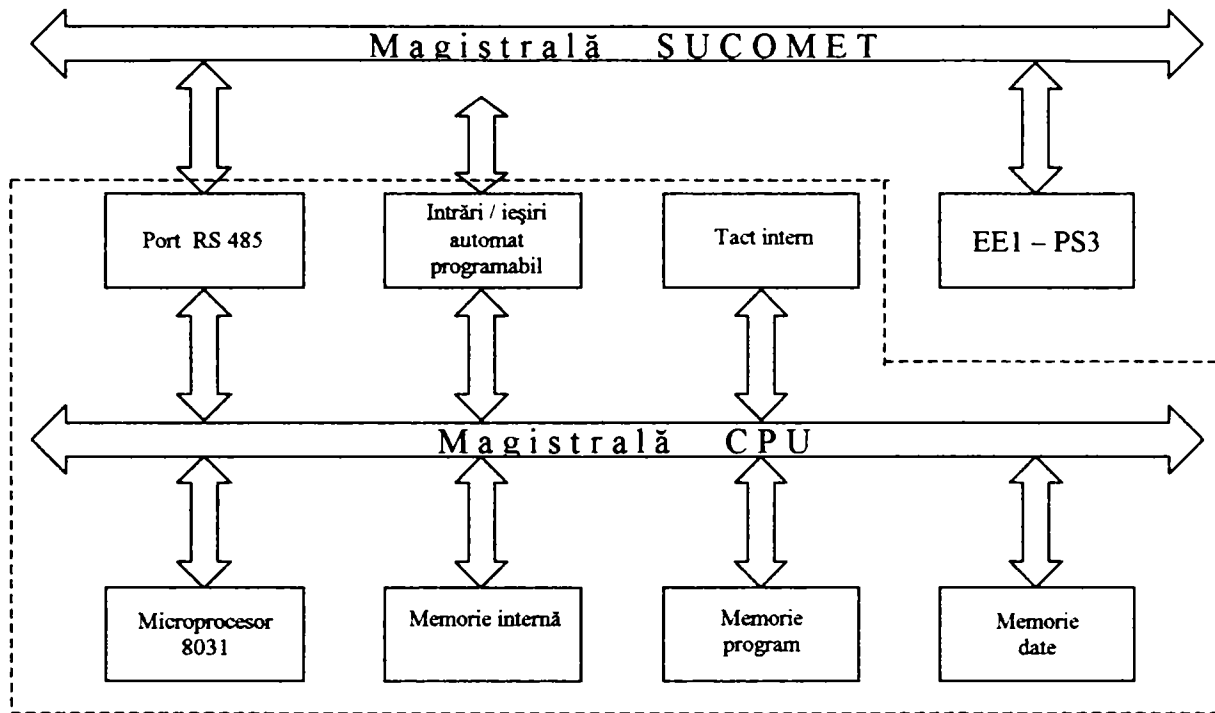


Fig.5.63. Structura internă a automatului programabil PS 3 [160]

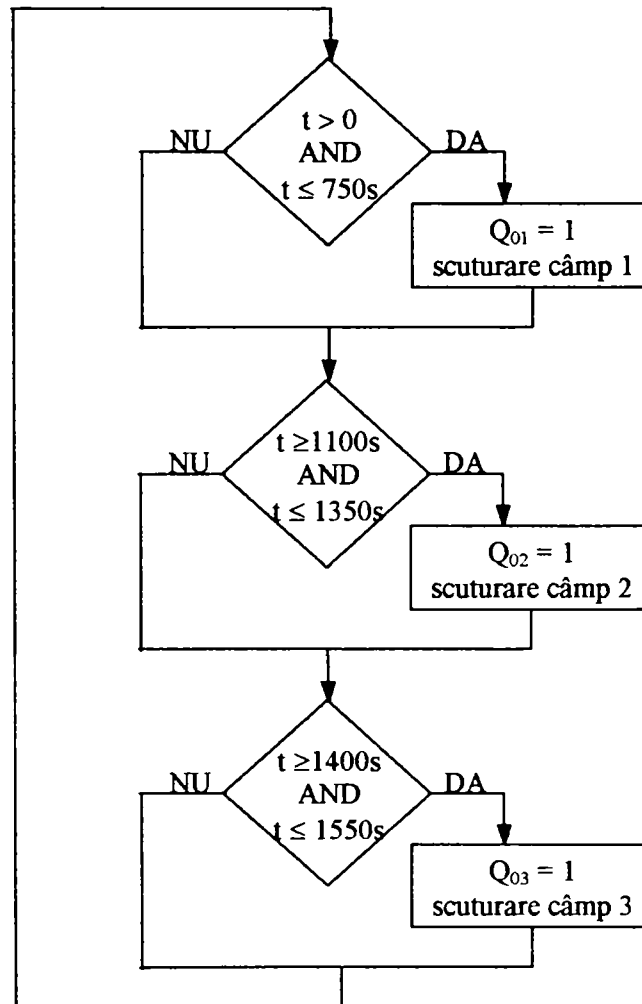


Fig.5.64. Schema logică a programului realizat cu automatul programabil PS 3

Automatul programabil PS 3 are la bază microprocesorul 8031 (fig.5.63) care este în legătură prin magistrala internă cu memoria sistem, memoria program, memoria date, port RS485, tactul intern și intrările/ieșirile programabile. Automatul programabil poate fi utilizat în conexiune cu alte automate, printr-un protocol dedicat (EE1-PS 3) și o magistrală dedicată (SUCOMET).

La realizarea programului pentru scuturare s-a utilizat numai regimul 1 din fig.5.57. Listingul programului este în anexa 4. Realizarea scuturării cu regimul 1 din fig.5.57 are la bază schema logică din fig.5.64. Se folosesc trei ieșiri ale automatului programabil (Q01, Q02, Q03) care sunt utilizate la comanda motoarelor care scutură cele trei câmpuri (acționare electrică la fel ca cea din fig.5.56). Programul se parcurge automat în buclă cu o perioadă de 1600 s. În funcție de momentul parcurgerii programului, electrozii câmpurilor electrofiltrelor vor fi scuturate succesiv conform fig.5.57, regimul 1 [101].

5.5. Concluzii

Sursele de alimentare cu energie electrică a electrofiltrelor au elemente de putere în comutație, de aceea ele determină poluarea armonică a sistemului electroenergetic (prin deformarea curentului). Măsurători ale curentului consumat de electrofiltre s-au efectuat la două electrofiltre de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.

Primul electrofiltru (electrofiltrul nr. 1A) la care s-au efectuat măsurătorile (fig.5.1÷5.8) utilizează o comandă cu microprocesor (EDYN-94 - Cehia) prin limitarea curentului în electrofiltru. Al doilea electrofiltru (electrofiltrul nr. 5A) are o comandă analogică ("Electrotehnica"-București), tot cu limitarea curentului în electrofiltre (fig.5.11÷5.14). Curenții de la electrofiltrul nr. 1A conțin armonici mai puține decât curenții electrofiltrului nr.5 (fig.5.9, 5.10, 5.15). S-a constatat că reglarea curentului în electrofiltrul 1A se realizează într-un timp scurt (sub 1 s) și într-un domeniu relativ mic $\pm 5\% I_n$. Durata de reglare a curentului la electrofiltrul 5A este de 2 – 3 secunde, iar domeniul în care se modifică curentul este de $\pm 15\% I_n$. Pentru limitarea armonicilor se impune utilizarea unor filtre pasive sau active, iar pentru îmbunătățirea factorului de putere sunt necesare baterii de condensatoare, cu condiția ca mai întâi să se filtreze armonicile de curent. În caz contrar, este posibilă creșterea acestor armonici.

Compoziția chimică a combustibilului ars în cazane, modul de măcinare, modul cum are loc arderea, constituie elemente importante care determină eficiența electrofiltrelor. Cel mai important dintre elementele constituente ale prafului este SiO_2 care este în proporția cea mai mare. Acest element determină o rezistivitate mare a prafului, care face colectarea mai dificilă. Folosirea unui combustibil cu conținut mare de cenușă (48 %) determină mai mult praf în gaze.

Prin utilizarea unor date referitoare la distribuția particulelor de praf, s-au determinat diametrele medii pentru fiecare electrofiltru analizat (pentru electrofiltrele 1A și 5A, fig.5.16, 5.17). La electrofiltrul 1A odată cu trecerea prafului prin câmpuri se filtrează particule cu diametre din ce în ce mai mici iar pentru electrofiltrul nr. 5A nu se respectă colectarea particulelor cu diametre medii din ce în ce mai mici spre ieșire din cauza alimentării defectuoase a câmpurilor electrofiltrului. Pentru ambele electrofiltre mai dificil de colectat sunt particulele de praf cu diametre mai mici de 10 μm .

S-au utilizat datele unor măsurători asupra vitezelor gazului în diferite puncte ale racordurilor de intrare (două pentru fiecare electrofiltru) și de ieșire. S-au analizat vitezele prin patru electrofiltre: electrofiltrul 1A, 1B, 5A și 5B (fig.5.19÷5.26). S-a constatat că vitezele în ramurile de intrare au valori cuprinse între 8 – 16 m/s, depinzând de zona de curgere a gazului. În partea de sus și mijloc ale ramurilor, vitezele sunt cele mai mari față de cele din partea de jos și spre periferie. În ramurile de ieșire a electrofiltrelor se constată o distribuție mai mare a vitezelor (4 – 15 m/s) cu toate că acestea au valori mai mici decât cele din ramurile de intrare, ceea ce demonstrează o turbulență crescută ca urmare a descărcărilor Corona și electrice care au loc în electrofiltru, precum și datorită trecerii gazului pe lângă electrozii profilați de colectare. Din analiza efectuată asupra ramurilor de la intrare se constată o curgere turbulentă a gazului, care este dăunătoare din punct de vedere al eficienței de colectare a electrofiltrelor.

Înțelegerea descărcării Corona este importantă pentru determinarea zonei de ionizare cu intensitate maximă în jurul electrozilor de emisie. S-au realizat studii asupra descărcărilor Corona, după redresare, la frecvență industrială (50 Hz) și la frecvență ridicată (24 kHz), pentru diferite amplitudini și polarități ale tensiunii de alimentare, și diferite distanțe între electrozi prin utilizarea unui sistem de descărcare similar cu electrozii de la electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A., modelul fizic fiind realizat la scara de 1:5 (fig.5.27, se poate modifica atât tensiunea de alimentare cât și distanțele între electrozi).

S-au realizat practic diferite scheme electrice (fig.5.30÷5.33) utilizate pentru obținerea diferitelor moduri de alimentare a sistemului de descărcare (SD). La măsurători s-a folosit un bloc de adaptare, o placă de achiziție (ADA 3100) și un calculator personal (PC). Studiul descărcării Corona s-a făcut prin analiza armonică a curentului redresat la alimentarea pozitivă și negativă (fig.5.35, 5.37). La creșterea tensiunii de alimentare, până nu apare efectul Corona (manifestat prin zgomot), fundamentala curentului este mai mare la alimentarea negativă decât la alimentarea pozitivă, iar celelalte armonici, în cazul alimentării negative, sunt mai mici decât la alimentarea pozitivă. Modelarea apariției efectului Corona în electrofiltre s-a realizat cu măsurătorile prezentate în fig.5.35.c și 5.37.c. Măsurătorile din fig.5.35.d,e,f și 5.37.d,e,f modelează, în limitele apariției efectului Corona și a descărcării electrice în electrofiltre, funcționarea electrofiltrelor (nr.1÷6) de la S.C. Electrocentrale Deva S.A., la alimentarea pozitivă și negativă a electrozilor. În aceste figuri, conținutul în armonici ale curentului, la alimentarea negativă a electrozilor, este mult mai mică decât în cazul alimentării pozitive. Pentru un curent cu un conținut de armonici cu amplitudini mai mici, comanda realizată de regulatorul automat de tensiune al electrofiltrelor, este mai stabilă, controlabilă, iar parametrii regulatorului sunt mai ușor de identificat [64]. Acesta este un alt motiv pentru care se realizează alimentarea cu tensiune negativă (-la electrozii de emisie) a câmpurilor electrofiltrelor.

S-a efectuat și un studiu al sunetului determinat de descărcarea Corona. Măsurarea sunetului s-a făcut cu un microfon și un preamplificator de calitate (fig.5.38, 5.39), semnalul corespunzător fiind achiziționat la fel ca și curentul. S-a efectuat analiza armonică a sunetului (fig.5.40÷5.42) în cazul alimentării pozitive (+ la electrodul de emisie), negative și alternative. La alimentarea negativă, în aceleași condiții (aceeași distanță între electrozi și aceeași tensiune), fundamentala de 50 Hz este mai mare decât în cazul alimentării pozitive. Pentru ambele alimentări se observă spectrul Trichel, mai evident la alimentarea negativă, caracterizat prin creșteri și descreșteri

exponențiale. Amplitudinile armonicilor la alimentarea pozitivă sunt mai mari decât la alimentarea negativă, acest aspect fiind mai puțin evident decât în cazul analizei curentului. Analiza sunetului la alimentarea alternativă are o comportare intermediară între cea pozitivă și cea negativă.

Pentru studiul efectului Corona la înaltă frecvență, la diferite distanțe între electrozi, s-au experimentat diferite invertoare la înalta frecvență (fig.5.44÷5.46) în vederea utilizării lor în instalația electrică de alimentare a electrofiltrelor. Se menționează, că s-a folosit același sistem de descărcare ca și la $f=50\text{Hz}$, pentru diferite amplitudini și polarități ale tensiunii de descărcare Corona. Invertorul utilizat la măsurători este unul în contratimp (fig.5.46) care are o fiabilitate mai ridicată. Frecvența de comutație a invertorului este de 24kHz. La alimentarea pozitivă a electrodului de emisie, s-a constatat o reducere a fundamentalei de 24kHz, odată cu creșterea tensiunii de alimentare, amplitudinile subarmonicilor ($<24\text{kHz}$) fiind mai mari decât la alimentarea negativă a electrozilor (fig.5.47÷5.48). Măsurătorile curentului Corona și a sunetului Corona cu ajutorul sistemului de descărcare din fig.5.27 sunt utile numai când se modelează, funcționarea electrofiltrelor de la S.C. Electrocentrale Deva S.A., din punct de vedere al tensiunii și a distanței între electrozi. Modelările funcționării electrofiltrelor sunt prezentate în fig. 5.47.d,e, fig.5.48.d.,e. Măsurătorile din fig.5.47.c și 5.48.c corespund limitei apariției efectului Corona, iar măsurătorile din fig.5.47.f și 5.48.f corespund apariției descărcării electrice în electrofiltre. Prin analiza armonică a curentului, la alimentarea cu invertor la 24kHz, se poate constata că, la fel ca și în cazul alimentării la 50Hz, fundamentala de la frecvența de 24kHz este mai mare la alimentarea negativă, decât la alimentarea pozitivă, fapt ce determină o implementare mai ușoară a regulatorului automat de tensiune.

Studiul sunetului determinat de descărcarea Corona la frecvență înaltă s-a realizat cu instalația de alimentare din fig.5.49, utilizându-se același sistem de descărcare cu cel prezentat în fig.5.27. La alimentarea pozitivă a electrozilor se constată prezența unor sunete de joasă frecvență (50Hz), care în aceleași condiții (aceeași distanță între electrozi și tensiune), la alimentarea negativă nu apar (fig.5.50, 5.51). Amplitudinile armonicilor la alimentarea negativă sunt mai mari decât la alimentarea pozitivă. La fel ca și la alimentarea cu frecvența de 50 Hz, la alimentarea cu tensiune de 24kHz a electrozilor, analiza efectului Corona în electrofiltre prin intermediul sunetului se face mai greu, decât prin studiul curentului.

Cu ajutorul sistemelor expert, a microcontrolerelor și a automatelor programabile s-au stabilit soluții (subcapitolul 5.4) pentru îmbunătățirea funcționării electrofiltrelor cu trei câmpuri nr.2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 4B, 5A, 5B, 6A, 6B de la S.C. Electrocentrale Deva S.A..

În fig.5.52 s-a propus o schemă logică pentru un sistem expert utilizat la comanda unui electrofiltru cu trei câmpuri. În cadrul acestui sistem, se măsoară permanent tensiunile și curenții prin câmpuri și concentrațiile de praf la ieșire. Concentrația de praf la ieșire este monitorizată continuu și este comparată cu o valoare prestabilită. Se caută într-o bază de date (construită pe baza măsurării parametrilor la momente anterioare) o situație asemănătoare și se setează parametrii de comandă. Algoritmul modifică amplitudinile și formele tensiunilor pe câmpuri, precum și modul de scuturare. Detectarea efectului Corona invers se realizează prin calculul raportului $\Delta I/\Delta U$ la momente discrete de timp. O problemă deosebită în construirea unui astfel de soft este stabilirea frecvenței de eșantionare a parametrilor care trebuie memorați în baza de date și a intervalelor de timp după care aceștia trebuie să fie mășurați.

S-a conceput și proiectat un sistem de comandă a unui electrofiltru cu trei câmpuri, având ca element principal microcontrolerul MC68HC05B6 pe 8 biți (fig.5.53÷5.59, tabelele 5.6÷5.10). Se măsoară permanent tensiunile și curenții din câmpurile electrofiltrului. Și la acest sistem se utilizează toate porturile analog-digitale (8), digital-analogice (2) și digitale (16) ale microcontrolerului. Toate semnalele, primite sau transmise, trebuie separate galvanic. Domeniul de modificare al semnalelor este de 0-5 V. Programul utilizează 12 regimuri de funcționare (în funcție de forma tensiunii și frecvența scuturărilor), concentrația de praf la ieșire fiind memorată pentru fiecare caz în parte. Se măsoară concentrația de praf la ieșire pentru fiecare regim în parte, după care se alege regimul optim de funcționare. Schemele logice sunt prezentate în fig.5.60 și 5.61, iar listingul programului în anexa 3. La electrofiltrele nr.2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 4B, 5A, 5B, 6A, 6B de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. reglarea parametrilor electrici nu se face printr-un sistem inteligent, ea realizându-se în urma experienței primite de operatori umani.

La instalațiile electrofiltrelor cu trei câmpuri de la S.C. Electrocentrale Deva S.A., cu îmbunătățiri minore a părții de comandă, se pot obține rezultate mai bune. Folosind automatul programabil PS 3 s-a propus programul de scuturare a electrozilor de emisie a unui electrofiltru cu trei câmpuri. Acest program are schema logică dată în fig.5.64 și listingul în anexa 4. Programul realizează scuturarea succesivă a câmpurilor electrofiltrului, câmpul de la intrare fiind scuturat mai mult, iar cel de la ieșire mai puțin.

6. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII

6.1. Concluzii generale

În capitolul 1 s-au prezentat principalele avantaje și dezavantaje ale filtrelor electrostatice (electrofiltre) cu plăci. Se prezintă domeniile în care se utilizează electrofiltrele: termocentrale, producția de ciment, industria siderurgică, producția sticlei.

Capitolul 2 are ca obiect analiza detaliată a electrofiltrelor, a părții electrice cât și a părții mecanice, în special a celor folosite în cazul termocentralelor. Se analizează în special electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. Sursele de putere de alimentare cu energie electrică a electrofiltrelor au în componență elemente de comutație care determină un curent nesinusoidal. Echipamentul electric al electrofiltrelor constituie partea cea mai importantă, care în funcție de realizarea constructivă, schema funcțională și regimul de reglare a tensiunii, determină siguranța și eficacitatea de colectare a prafului.

În prezent, se utilizează regulatoare cu microprocesoare care comandă două tiristoare conectate în antiparalel în circuitul primar al transformatorului ridicător de tensiune, principiul de funcționare fiind același cu cel al variatoarelor de tensiune alternativă. Alimentarea intermitentă cu energie a electrofiltrelor, are scopul de a economisi energia electrică și de a îmbunătăți eficiența de colectare a prafului cu rezistivitate ridicată. O altă metodă de alimentare cu energie electrică a electrofiltrelor este cea prin pulsuri de tensiune care este utilizată la electrofiltrele destinate colectării prafulilor de rezistivitate ridicată.

Dispozitivele electronice de comutație rapidă au permis conceperea și realizarea unor surse de alimentare a electrofiltrelor bazate pe conversia de putere la înaltă frecvență. Pentru o eficiență maximă de colectare este importantă funcționarea electrofiltrului cât mai aproape posibil de descărcarea în electrofiltru. La alimentarea clasică în curent continuu există o oscilație semnificativă a tensiunii datorită alimentării redresorului cu tensiune de frecvență industrială (la 50 Hz oscilația tensiunii în electrofiltru este de aproximativ 4kV). Prin utilizarea convertoarelor de putere la înaltă frecvență ($f > 10$ kHz) se diminuează foarte mult oscilația tensiunii pe electrofiltru, iar timpul de revenire în cazul apariției unei descărcări electrice este mult mai mic decât în cazul clasic de alimentare.

Pentru o colectare eficientă a prafului, electrofiltrele trebuie dotate cu o unitate bună de control a tensiunii, să existe o compatibilitate între sursă și secțiunea electrofiltrului care este alimentată cu tensiune. Starea mecanică a electrofiltrului trebuie să fie bună. Obiectivul principal al unităților de control automat este de a păstra valoarea tensiunii din secțiunea electrofiltrului cât mai aproape de valoarea tensiunii Corona. Maximizarea integralei tensiune – timp, fără să apară descărcări electrice, este principalul obiectiv al unităților de control automat. În reglarea proceselor, o importanță deosebită o au caracteristicile curent – tensiune. Efectul Corona invers se determină prin compararea valorilor tensiunii înainte și după descărcare.

Procesele din electrofiltre sunt deosebit de complexe și sunt datorate în principal de curgerea gazului și de interacțiunea dintre particulele de praf și câmpul electric care determină mecanismul de încărcare – descărcare electrică a particulelor de praf. Acest studiu s-a realizat în capitolul 3.

Depășirea unei valori critice a câmpului electric este importantă pentru producerea unui număr cât mai mare de purtători de sarcină. Pentru producerea ionizărilor puternice trebuie ca vitezele imprimare electronilor să fie cât mai mari. Intensitatea câmpului electric de apariție a efectului Corona depinde de forma electrodului de emisie și de mediul în care are loc descărcarea. Cu cât frecvența tensiunii de alimentare este mai mică, cu atât distanța maximă până la care se deplasează ionii este mai mare.

Încărcarea electrostatică a particulelor se desfășoară în două etape distincte. Prima etapă este producerea ionilor cu ajutorul câmpului electric. A doua etapă o reprezintă atașarea ionilor de particulele de praf. Sarcina electrică a particulelor de praf depinde de natura materialului din care provine, de intensitatea câmpului electric și de raza particulei. Sarcina electrică a particulelor de praf nu crește oricât de mult, ci numai până la o anumită valoare (la saturație). Cu ajutorul unor parametri măsurati în practică (la electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.) și prin utilizarea modelului Cochet s-a determinat procesul de încărcare electrostatică a particulelor de praf, când particulele ajung la saturație. Când particulele de praf ating electrozii de colectare are loc transferul sarcinii de la particule la electrozi.

Cu măsurători ale caracteristicilor curent-tensiune pentru electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. și cu ajutorul a trei modelări matematice ale caracteristicilor curent-tensiune s-a realizat o analiză asupra modelelor care aproximează mai bine caracteristicile măsurate în practică. Se constată că eficiența de colectare a electrofiltrelor crește odată cu creșterea numărului de câmpuri de colectare. Pentru diferite electrofiltre de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. și pentru diferite regimuri de funcționare, s-au determinat (tabelul 3.3) vitezele de migrație după diferite modele, fiind constatate diferențe între rezultatele modelelor. Viteza medie de migrație din câmpurile electrofiltrelor este greu de determinat practic, pentru a putea face o comparație cu modelele.

Dezvoltarea tehnicii de calcul a permis realizarea unor programe performante, prezentate în capitolul 4, utilizate la simularea parametrilor electrici și tehnologici ai electrofiltrelor. Modelarea unui câmp electric al unui electrofiltru s-a realizat prin conectarea în paralel a unui condensator, cu un rezistor și un varistor cu ajutorul programului PSCAD/EMTDC 3.0.8. În bibliografia analizată nu s-a găsit o determinare riguroasă a acestor parametri, ci numai estimări ale acestora. La frecvența industrială (50 Hz) oscilația (riplul) tensiunii este mare, fiind imposibil să se mențină o tensiune constantă pe electrofiltre. Prin utilizarea filtrelor pasive se pot reduce armonicile de curent, dar pot să apară rezonanțe între impedanța sursei și cea a filtrului pasiv care determină amplificarea armonicilor. Micșorarea riplurilor de tensiune și a duratei de revenire constituie principalele motive de utilizare a sistemelor de alimentare la înaltă frecvență.

Analiza liniilor de câmp ale potențialului și ale intensității câmpului electric s-a realizat printr-un program în C++, pentru diferite tipuri de electrozi de emisie și de depunere, la scară, utilizați în practică (la electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.). Zona activă mare este realizată cu electrozi cât mai neregulați în secțiune (electrozii de emisie cu colțuri).

Performanțele electrice și tehnologice a unui electrofiltru au fost analizate cu un program performant: ESPVI 4.0.a. La simulări s-a ținut cont de dimensiunile geometrice ale electrofiltrelor de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. (electrofiltrele 1A și 1B) și de parametrii electrici și tehnologici reali determinați în practică. S-au utilizat distribuția particulelor de praf la intrare, de

reantrenarea particulelor de praf și de modul de alimentare cu tensiune a câmpurilor pentru electrofiltrul 1A. S-au simulat și comparat cu datele reale (tabelul 4.7) eficiențele de colectare pentru diferite regimuri de funcționare ale electrofiltrelor 1A și 1B, fiind constată erori mici între cazurile reale și cele analizate. Tensiunile Corona și cele de descărcare sunt mai mari pentru câmpurile de la intrare și mai mici pentru câmpurile de la ieșire.

Eficiența de colectare are valori mici pentru particule cu diametre medii sub 5 μm și valori mai mari pentru particule cu diametre mai mari de 10 μm la alimentarea cu tensiune alternativă redresată bialternanță. Distanța între electrozi și numărul de electrozi de emisie influențează eficiența de colectare a prafului. Creșterea numărului electrozilor de emisie sau a distanței între electrozii de emisie și a celor de depunere determină creșterea eficienței de colectare a electrofiltrelor cu plăci.

Curgerea gazului printr-un canal al unui câmp a electrofiltrului a fost analizată cu programul LISA 4.0.1. Simulările s-au efectuat pentru primele momente ale trecerii gazului printr-un canal al electrofiltrului. A fost analizată o zonă, la scară, care există la electrofiltrele S.C. Electrocentrale Deva S.A. Este importantă analiza fluctuațiilor turbulente ale gazului, mai ales când se impune o eficiență de colectare mai mare de 95 %.

În capitolul 5, pentru două electrofiltre utilizate la S.C. Electrocentrale Deva S.A. (1A și 5A) s-au efectuat măsurători asupra curenților și a tensiunilor de alimentare în vederea stabilirii conținutului de armonici. În cazul surselor comandate cu microprocesor s-a constatat o diminuare a armonicilor de curent față de sursele comandate analogic. Alimentarea cu tensiune a electrofiltrelor constituie unul din cei mai importanți factori care determină o eficiență ridicată de colectare a prafului. Alți factori tehnologici care determină o eficiență mare de colectare sunt: compoziția chimică a combustibilului ars în cazane, modul de măcinare și modul cum are loc arderea. La analiza chimică a prafului colectat s-a determinat că SiO_2 este în proporția cea mai mare din compoziție. Utilizarea unor combustibili inferiori determină un conținut mare de cenușă care trebuie colectată. Pentru cele două electrofiltre s-a determinat distribuția particulelor de praf în funcție de diametrele medii și s-a constatat că pentru ambele cazuri particulele cu diametre sub 26 μm se colectează mai dificil. La electrofiltrul comandat prin microprocesor diametrele medii ale particulelor au valori din ce în ce mai mici spre câmpurile de ieșire. Nu același lucru s-a constatat pentru electrofiltrul comandat analogic.

Prin utilizarea unor date referitoare la vitezele gazului în diferite puncte ale racordurilor de intrare și ieșire, s-au analizat distribuțiile vitezelor gazului la patru electrofiltre de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. (1A, 1B, 5A și 5B). În partea de sus și mijloc a ramurilor de intrare vitezele sunt mai mari față de partea de jos și periferie. Se poate face o similitudine aproximativă între ramurile de intrare în electrofiltru și câmpurile electrofiltrului. Atât electrozii de emisie cât și cei de depunere sunt mai puternic corodați în zona superioară. Gazul la ieșirea electrofiltrelor are o turbulență crescută datorită descărcărilor Corona și a descărcărilor electrice în electrofiltru, precum și a trecerii gazului pe lângă electrozii de colectare profilați.

Prin utilizarea unui model de laborator construit de autor la scară (scara 1:5), cu un sistem electrod de emisie (tip Isodyn B5)-placă, s-a analizat efectul Corona din electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. (la laboratorul de Electrotehnică de la Facultatea de Inginerie Hunedoara, Universitatea "Politehnica" Timișoara). S-au realizat studii pentru înțelegerea mai bună a

descărcărilor Corona la frecvență industrială (50 Hz) și la frecvență ridicată (24 kHz) pentru diferite amplitudini și polarități ale tensiunii de alimentare și diferite distanțe între electrozi. Pentru analiză s-au realizat studii optice, acustice și ale curentului Corona.

La frecvență industrială descărcarea Corona pozitivă este violentă atât optic cât și acustic și determină apariția strimerilor. În cazul descărcărilor Corona negative, descărcarea este uniformă atât optic cât și acustic și determină apariția unor pete catodice. Descărcarea Corona negativă este o descărcare controlabilă, fiind mai ușor de modificat folosind regulatoarele automate de tensiune utilizate la alimentarea câmpurilor electrofiltrelor. S-au realizat și experimentat diferite montaje de alimentare cu tensiune a sistemului de electrozi de descărcare. Cu ajutorul sistemului de descărcare s-a putut realiza o similitudine a efectului Corona în electrofiltre (apariția efectului Corona, efectul Corona și descărcarea în electrofiltre) prin modificarea distanței, a amplitudinii și a polarității tensiunii între electrozi. Amplitudinile armonicilor curentului și sunetului Corona au valori mai mari la descărcarea Corona pozitivă. La analiza sunetului, în cazul alimentării cu tensiune la frecvența de 50Hz, s-au observat spectrul Trichel, care este mai evident la alimentarea negativă cu tensiune a electrozilor.

Pentru alimentarea cu tensiune a sistemului de electrozi de descărcare (model de laborator) au fost experimentate diferite invertoare la înaltă frecvență (laboratorul de Electrotehnică, Facultatea de Inginerie Hunedoara). S-au realizat similitudini ale efectului Corona între modelul de laborator și electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A., în cazul alimentării câmpurilor cu invertoare la înaltă frecvență. Deși spectrele curenților și a sunetului Corona la înaltă frecvență diferă față de descărcarea Corona la frecvență industrială, s-a constatat că amplitudinile armonicilor curentului și sunetului Corona au valori mari la descărcarea Corona pozitivă.

Pentru îmbunătățirea performanțelor electrofiltrelor cu trei câmpuri de la Centrala Termoelectrică Mintia-Deva s-au propus soluții cu microcontrolere și automate programabile.

S-a propus schema logică a unui sistem expert pentru comanda unui electrofiltru cu trei câmpuri. Tensiunile și curenții prin câmpuri, precum și concentrațiile de praf la ieșire se măsoară permanent. Sistemul expert are o bază de date în care se înregistrează cele mai importante evenimente din funcționarea electrofiltrului și care sunt utilizate ulterior la comanda optimă a lui.

Microcontrolerele constituie o alternativă la comanda electrofiltrelor. S-a propus realizarea unui sistem de comandă a unui electrofiltru cu trei câmpuri cu ajutorul microcontrolerului MC68HC05B6 (Motorola), de la care s-a utilizat aproape toate resursele. Programul utilizează 12 regimuri de funcționare memorându-se pentru fiecare caz în parte concentrația de praf la ieșire, după care se alege regimul optim de funcționare.

Utilizarea automatelor programabile la scuturarea electrozilor din câmpurile electrofiltrelor constituie o alternativă ieftină de îmbunătățire a performanțelor. S-a propus și s-a conceput un program de scuturare cu ajutorul automatului programabil PS 3 (Klöckner – Moeller) pentru un electrofiltru cu trei câmpuri.

6.2. Recomandări privind îmbunătățirea sub aspect energetic și ecologic a funcționării electrofiltrelor cu plăci de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.

În vederea îmbunătățirii performanțelor energetice și ecologice ale electrofiltrelor cu plăci (nr.1A și 1B cu patru câmpuri, nr.2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 4B, 5A, 5B, 6A, 6B cu trei câmpuri) de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. se pot lua următoarele măsuri:

A. Soluții cu preț de cost scăzut:

- în condițiile unei funcționări la sarcină redusă a cazanelor (mai mici de 60% din sarcina nominală), la electrofiltrele cu patru câmpuri, pentru micșorarea consumului energetic, pot fi scoase de sub tensiune unele câmpuri sau semicâmpuri ale electrofiltrelor; la sarcină redusă pentru electrofiltrele cu trei câmpuri, datorită actualei soluții de reglare a tensiunii, nealimentarea cu tensiune a unor câmpuri nu poate fi aplicată în condițiile menținerii unei eficiențe de colectare ridicate;

- utilizarea unor scuturătoare electromagnetice pentru modificarea convenabilă a mărimii forței de scuturare a electrozilor de emisie și de colectare în funcție de stratul de praf depus; totodată sistemul permite modificarea frecvenței de scuturare;

- utilizarea unui câmp electric de preîncărcare (numai cu electrozi de emisie), prin eliminarea sau nelegarea la pământ a electrozilor de colectare în acest câmp; astfel particulele de praf primesc o sarcină electrostatică suplimentară;

- deoarece se utilizează combustibili fosili cu putere calorică redusă, arderea nu este completă și rezultă prafuri înalt rezistive care pot fi colectate mai bine dacă câmpurile electrofiltrelor se alimentează intermitent sau/și prin pulsuri de tensiune, în cazul în care există montate astfel de surse de alimentare;

- creșterea numărului de electrozi de emisie, în primul câmp al electrofiltrelor;

- utilizarea unor noi tipuri de electrozi de emisie, cu mai multe colțuri, în special în primele câmpuri;

- primul câmp nu trebuie scuturat permanent, ci într-un serviciu intermitent cu durata de acționare mai mare decât la celelalte câmpuri;

- uniformizarea vitezei gazului în electrofiltre prin utilizarea la intrarea în electrofiltre a unor dispozitive de uniformizare (cu profile, cu orificii) a fluxului de gaze.

B. Soluții cu preț de cost ridicat:

- alimentarea câmpurilor electrofiltrelor, prin intermediul unor punți redresoare trifazate, cu invertoare de înaltă frecvență (10÷50 kHz); astfel, rețeaua electrică este încărcată uniform, iar tensiunea în electrofiltru are oscilații mici existând posibilitatea de a realiza urmărirea tensiunii după fenomenele care au loc în câmpurile electrofiltrelor;

- alimentarea cu tensiune continuă a primului câmp al electrofiltrelor pentru a încărca electrostatic cât mai multe particule de praf, deoarece rezistivitatea gazului cu praf este mai mare spre câmpurile de la ieșirea electrofiltrului; alimentarea cu tensiune intermitentă a câmpurilor intermediare (câmpurile 2,3 pentru electrofiltrele cu 4 câmpuri, câmpul 2 pentru electrofiltrele cu 3 câmpuri) pentru a realiza încărcarea electrostatică a particulelor de praf cu diametre medii mai mici de 50μm; alimentarea cu pulsuri de tensiune a ultimelor câmpuri ale electrofiltrelor, pentru a putea colecta particulele de praf cu diametre medii mai mici de 5μm care sunt foarte dăunătoare sănătății;

- prin alimentarea intermitentă sau cu pulsuri de tensiune a câmpurilor electrofiltrelor se micșorează consumul de energie electrică;
- utilizarea la comanda electrofiltrelor a unor sisteme expert și metode statistice;
- utilizarea automatelor programabile la scuturarea câmpurilor;
- alimentarea cu surse de tensiune și regulatoare de tensiune separate pentru fiecare semicâmp în parte;
- utilizarea unor calculatoare de proces sau a unor sisteme cu microcontroler care să stabilească, pentru fiecare câmp în parte, în funcție de parametrii electrici și tehnologici de la intrare și de la ieșire, în condițiile unui consum de energie de nivel scăzut, forma și amplitudinea tensiunii, gradul de intermitență al tensiunii, frecvența și durata pulsurilor de tensiune, momentul și durata scuturării câmpurilor;
- utilizarea unor calculatoare de proces care să monitorizeze emisiile de praf și parametrii de funcționare pentru fiecare electrofiltru în parte;
- realizarea unor filtre active pentru micșorarea armonicilor curentului absorbit de la rețea pentru fiecare sursă de alimentare a câmpurilor electrofiltrelor;
- datorită dificultății colectării particulelor cu diametre medii mai mici de 5 μm , se poate înlocui ultimul câmp uscat cu unul umed (mai scump decât unul uscat) la care suprafața colectoare este acoperită cu o peliculă uniformă de apă;
- umezirea controlată a gazului înainte de a intra în electrofiltre pentru a scădea rezistivitatea gazului cu praf.

6.3. Contribuții

Principalele contribuții ale autorului din cadrul acestei lucrări sunt:

- analiza proceselor ce au loc în electrofiltre (subcap. 3.1, 3.2);
- determinarea și reprezentarea grafică a distanței maxime de ionizare în funcție de frecvența tensiunii de alimentare fig.3.6;
- reprezentările grafice din fig.3.7, ...,3.11,3.13,...,3.19 utilizând parametrii electrici și tehnologici reali de la electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.;
- pentru electrofiltrele 1A și 1B s-a realizat analiza comparativă a caracteristicilor curent-tensiune măsurate și a caracteristicilor modelate, cu ajutorul a trei modele în fig.3.22-3.29;
- determinarea vitezelor medii de migrație a particulelor de praf, după trei modele existente în literatura de specialitate, în cazul electrofiltrelor de la S.C. Electrocentrale Deva S.A., pentru diferite regimuri de funcționare în tabelul 3.3;
- simularea parametrilor electrici a unei surse de alimentare la frecvență industrială și a unei surse de alimentare la înaltă frecvență cu programul PSCAD/EMTDC 3.0.8 (subcap.4.1);
- realizarea unui program în C++ în vederea simulării numerice, la scară cu electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A., a potențialului și a intensității câmpului electric pentru diferite tipuri de electrozi de emisie și de depunere (subcap.4.2);
- simularea cu ajutorul programului ESPVI 4.0.a a eficiențelor de colectare și a unor parametrii electrici pentru diferite regimuri electrice de funcționare a electrofiltrelor 1A și 1B de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. (subcap.4.3.2);

- simularea curgerii gazului printr-un canal a electrofiltrelor de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. cu programul LISA 4.0.1 (subcap.4.4);
- măsurarea și analiza parametrilor electrici a electrofiltrelor (1A și 5A) de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. (subcap.5.1);
- analiza distribuțiilor diametrelor medii a prafului (1A și 5A) și a vitezelor în secțiunile unor electrofiltre (1A, 1B, 5A și 5B) de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. (subcap.5.2);
- realizarea unui model fizic de laborator la scară (scara 1:5) cu un sistem electrod de emisie (tip Isodyn B5)-placă pentru analiza efectului Corona la electrofiltrele de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. (fig.5.27);
- realizarea practică a unor scheme electrice și electronice utilizate la studiul efectului Corona (fig.5.30-5.33, 5.38, 5.39, 5.43-5.46, 5.49);
- studiul optic, curentului și sunetului Corona la frecvență industrială (subcap.5.3.1);
- studiul curentului și sunetului Corona la înaltă frecvență (subcap.5.3.2);
- schema logică a unui sistem expert a unui electrofiltru cu trei câmpuri (fig.5.52);
- proiectarea unui sistem de comandă cu microcontroler MC68HC05B6 și a schemelor electronice aferente utilizate la comanda unui electrofitru virtual cu trei câmpuri (subcap.5.4.2.2);
- proiectarea scuturării electrozilor câmpurilor unui electrofitru virtual cu automatul programabil PS-3 (subcap.5.4.3).

Principalele caracteristici ale electrofiltrelor de la S.C. Electrocentrale Deva S.A. [168]

	ELF 1	ELF 2	ELF 3	ELF 4	ELF 5	ELF 6
Simbolul electrofiltrului	46/12/ 4x9/0,350	54/12/ 3x9/0,300	54/12/ 3x9/0,300	54/12/ 3x9/0,300	55/12/ 1x9/1x10/ 1x9/0,300	56/12/ 3x9/0,300
Numărul de treceri	46	54	54	54	55	56
Înălțimea activă a electrozilor de depunere [m]	12	12	12	12	12	12
Numărul de câmpuri active	4	3	3	3	3	3
Numărul de electrozi de depunere pentru un panou	9	9	9	9	9	9
Pasul electrozilor de depunere [mm]	350	300	300	300	300	300
Puterea electrică [kVA]	166	237,2	237,2	237,2	238	238
Suprapresiunea statică, intrare electrofiltru [mm coloană apă]	260	260	260	260	260	260
Pierderi de presiune în electrofiltru [mbari]	2,5	2	2	2	2	2
Debitul nominal de gaze [m^3/h]	650000	728900	728900	728900	728900	675000
Depresiunea nominală a gazelor la intrare [mbar]	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
Depresiunea maximă a gazelor la intrare [mbar]	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8
Conținutul nominal de praf în gaze brute la intrare [$g/m^3 N$]	32	85,69	85,69	85,69	93,61	93,61
Conținutul nominal de praf în gaze brute la ieșire [$g/m^3 N$]	0,1	0,75	0,75	0,75	0,889	0,889
Gradul nominal de separare [%]	99,69	99,12	99,12	99,12	99,05	99,05
Temperatura nominală a gazelor la intrare [$^{\circ}C$]	150	148	148	148	148	148
Temperatura maximă a gazelor la intrare [$^{\circ}C$]	163	163	163	163	163	163
Debitul maxim de cenușă evacuată [t/h]	15	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5
Tensiunea înaltă redresată în gol [kV]	92	111	111	111	111	111
Tensiunea înaltă redresată în sarcină [kV]	47	65	65	65	65	65
Combustibil nears în cenușă [%]	0,3-1,2	0,3-1,2	0,3-1,2	0,3-1,2	0,3-1,2	0,3-1,2

Instrucțiunile calculatorului de proces CCBASIC cu MC68HC05B6 [153]

Nr.	Instrucțiune	Semnificație	Exemple
1	.ABS(x)	Valoarea absolută pentru termenul x: x = termen	y=.ABS(-1)
2	.AD[i]	Specificarea unui port .AD cu ajutorul lui DEFINE: i = 1... 8	DEFINE port AD[1]
3	.AND	Operație logică ȘI	IF (x<0) .AND (y<0)... y=x and &H7F
4	.APPEND	Deschidere fișier pentru atașare de date	OPEN= FOR APPEND
5	.BAUD rate	Viteză de transmitere serială; rate = constantă	.BAUD R2400
6	BEEP t,d,p	Sunet: t=ton: t=250000 frecv: d=durață: d*20ms p=pauză: p*20ms	BEEP 400,25,10
7	.BIT[i]	Specificarea unui bit cu ajutorul DEFINE: i = 1, ..., 192	DEFINE flag BIT[16]
8	.BYTE[i]	Specificarea unui byte cu ajutorul DEFINE: i = 1, ..., 24	DEFINE x BYTE[1]
9	.BYTEPORT [i]	Specificarea unui port digital cu ajutorul DEFINE: i = 1, 2	DEFINE x BYTEPORT[1]
10	&B...	Declararea unui număr binar	&B10100000
11	.CLOSE=	Închiderea unui fișier	.CLOSE=
12	.DAY	Valoarea zilnică a ceasului de timp real	.DAY=1 PRINT DAY
13	.DA[i]	Specificarea unui port D.A cu DEFINE: i = 1, 2	DEFINE v DA[2]
14	.DEACT p	Dezactivarea unui port digital; p=variabilă port	.DEACT led
15	.DEFINE	Definirea unui port, unei variabile sau unei constante	DEFINE sens AD[1] DEFINE flag BIT[1] DEFINE limit 100
16	.DOW	Valoarea zilei din săptămână a ceasului de timp real	IF DOW=1 THEN PRINT "LUNI"
17	.ELSE	Ramură alternativă la o execuție condiționată de program	IF x=0 THEN y=0 ELSE y=5
18	.END	Sfârșit de program	IF x=0 THEN END
19	.EOF	Test de sfârșit de fișier, la citirea fișierului	IF EOF THEN GOTO 100
20	.FILEFREE	Testarea spațiului liber la scrierea în fișier	IF FILEFREE THEN GOTO 10
21	.FOR	Bucă de program	FOR i=1 TO 10
22	.FREQ	Declararea frecvenței la intrarea DCF77	x = FREQ
23	.GET v	Citirea biților la interfața serială; v=variabilă	GET semnal
24	.GOSUB i	Salt la o subrutină; i = etichetă	GOSUB procesare
25	.GOTO i	Salt de programare; i = etichetă	GOTO start
26	&H...	Declararea unui număr hexazecimal	&H1FFE
27	.HOUR	Valoarea orei a ceasului de timp real	PRINT HOUR
28	.IF	Instrucțiune de condiționare	IF x<y THEN GOTO ready
29	.INPUT v	Citirea unei valori numerice la interfața serială; v=variabilă	INPUT x
30	.INPUT# v	Citirea unei valori numerice din fișier; v=variabilă	INPUT# x
31	.LOOKTAB t,i,v	Încărcarea unei valori dintr-un tabel t=indicator de tabel; i=index; v=indicator de variabilă	LOOKTAB semnificație,index, variabilă
32	.MAX(x,y)	Alegerea valorii mai mari	z=MAX(x,10)
33	.MIN(x,y)	Alegerea valorii mai mici	z=MIN(x,y)

34	MINUTE	Valoarea minutului a ceasului de timp real	PRINT MINUTE
35	MOD	Operator pentru divizare modulară	$x = 10 \text{ MOD } 3$
36	MONTH	Valoarea lunii a ceasului de timp real	PRINT MONTH
37	NAND	Operator logic ȘI-NU	$x = a \text{ NAND } b$
38	NOR	Operator logic SAU-NU	$x = a \text{ NOR } b$
39	NOT	Operator logic NEGAȚIE	$y = \text{NOT } x$
40	OFF	Constantă predefinită &H0	led = OFF
41	ON	Constantă predefinită &HFFFF	led = ON
42	ON x GOSUB	Salt la subrutină în funcție de x	ON sel GOSUB p1, p2, p3
43	ON x GOTO	Salt de program în funcție de x	ON sel GOTO p1, p2, p3
44	OPEN# FOR m	Deschide fișier cu modul m; m=APPEND, WRITE, READ	OPEN# FOR WRITE
45	OR	Operator logic SAU	$x = a \text{ OR } b$
46	PAUSE t	Întrerupere program pentru t*20ms	PAUSE 50
47	PORT [i]	Specificarea unui port digital cu DEFINE; i=1... 16	DEFINE PORT[10]
48	PRINT x	Tipărire texte prin interfața serială; x=termen	PRINT "A=";a, "B=";b
49	PRINT# x	Înregistrarea unei valori în fișier; x=termen	PRINT# a
50	PULSE p	Ieșirea unui puls la un port digital; p=variabilă port	PULSE clock
51	PUT x	Editarea unui byte pe interfața serială; x=termen	PUT ch
52	RAND	Generator de cifre aleatoare întregi	$x = \text{RAND}$
53	RANDOMIZE x	Reinițializarea generatorului de cifre aleatoare	RANDOMIZE TIMER
54	RETURN	Revenire dintr-o subrutină	RETURN
55	RXD	Testarea bytului transmis pe interfața serială	IF RXD THEN GET ch
56	READ	Deschide fișier cu scopul de a citi date	OPEN# FOR READ
57	SECOND	Valoarea secunde a ceasului de timp real	PRINT SECOND
58	SHL	Operator de deplasare binară la stânga	$a = a \text{ SHL } 2$
59	SHR	Operator de deplasare binară la dreapta	$a = a \text{ SHR } 2$
60	SLOWMODE m	Tactul procesorului/16; m=ON sau OFF	SLOWMODE ON
61	STEP	Declararea mărimii pasului la bucla FOR	FOR i=100 TO 1 STEP -5
62	SYS a	Apelarea unui program sistem; a=adresa	SYS &H101
63	SYS CODE	Declararea de cod de sistem sau a unui fișier	SYS CODE "TEST.S19"
64	SYSEND	Închidere SYS CODE prin bit dat	SYS CODE &H81 SYSEND
65	TABLE	Definirea unui tabel de date, direct sau prin fișier tabel	TABLE kty "KTY10.TAB"
66	TABEND	Încheiere TABLE prin valori date	TABLE tab 10 5 -3 TABEND
67	TIMER	Examinare timer de 20ms	x=TIMER
68	TO	Se folosește cu instrucțiunea FOR	FOR i = 1 TO 10
69	TOG p	Bascularea în stare complementară a unui port digital; p=port	TOG led
70	WORD [i]	Specificarea utilizării unui cuvânt cu ajutorul DEFINE; i=întotdeauna 1	DEFINE x WORD[1]
71	WORDPORT [i]	Specificarea utilizării unui port digital de 16 biți cu ajutorul DEFINE; i= întotdeauna 1	DEFINE all WORDPORT[1]
72	WRITE	Deschidere fișier cu scopul de a scrie date noi	OPEN# FOR WRITE
73	YEAR	Valoarea an a ceasului de timp real	PRINT YEAR

Listingul programului folosit pentru sistemul cu microcontroler MC68HC05B6

Program pentru sistemul expert pentru reglarea automată a tensiunii într-un electrofiltru

```

define ports1 byteport[1]      'Porturile 1-8
define ports2 byteport[2]      'Porturile 9-16
define U1      ad[1]           'Masurare tensiune camp1
define U2      ad[2]           'Masurare tensiune camp2
define U3      ad[3]           'Masurare tensiune camp3
define I1      ad[4]           'Masurare curent camp1
define I2      ad[5]           'Masurare curent camp2
define I3      ad[6]           'Masurare curent camp3
define OP2     ad[8]           'Masurare concentratie de praf la iesire
define Eu1     da[1]           'Comandă amplitudine tensiune câmp1
define Eu2     da[2]           'Comandă amplitudine tensiune câmp2
define P1      port[1]        'Cel mai semnificativ bit pentru comanda amplitudinii
                                'tensiunii pentru câmpul 3
define P2      port[2]        'Bit pentru comanda tensiunii câmp3
define P3      port[3]        'Bit pentru comanda tensiunii câmp3
define P4      port[4]        'Bit pentru comanda tensiunii câmp3
define P5      port[5]        'Cel mai puțin semnificativ bit pentru comanda amplitudinii
                                'tensiunii pentru câmpul 3
define P6      port[6]        'Cel mai semnificativ bit pentru comanda formei
                                'tensiunii pentru câmpurile 1 și 2
define P7      port[7]        'Cel mai puțin semnificativ bit pentru comanda formei
                                'tensiunii pentru câmpurile 1 și 2
define P8      port[8]        'Cel mai semnificativ bit pentru comanda formei
                                'tensiunii pentru câmpul 3
define P9      port[9]        'Cel mai puțin semnificativ bit pentru comanda formei
                                'tensiunii pentru câmpul 3
define P10     port[10]       'Comanda contactor K1 pentru alimentarea campului 1
define P11     port[11]       'Comanda contactor K2 pentru alimentarea campului 2
define P12     port[12]       'Comanda contactor K3 pentru alimentarea campului 3
define P13     port[13]       'Comanda contactor K4 pentru actionarile electrice
                                'ale scurtoarelor camp 1
define P14     port[14]       'Comanda contactor K5 pentru actionarile electrice
                                'ale scurtoarelor camp 2
define P15     port[15]       'Comanda contactor K6 pentru actionarile electrice
                                'ale scurtoarelor camp 3
define P16     port[16]       'Port avertizare alimentare cu tensiune a campurilor
                                'electrofiltrului
define Uc1     byte           'Variabila tensiune camp1
define Uc2     byte           'Variabila tensiune camp2
define Uc3     byte           'Variabila tensiune camp3
define Ic1     byte           'Variabila curent camp1
define Ic2     byte           'Variabila curent camp2
define Ic3     byte           'Variabila curent camp3
define O2      byte           'Variabila concentratie de praf la iesire
define i       word           'Variabila
define j       word           'Variabila
define Uc11    byte           'Variabila
define Uc21    byte           'Variabila
define Uc31    byte           'Variabila
define O211    byte           'Semnal opacimetru, regim de scuturare 1, forma tensiunii
                                'continua
define O221    byte           'Semnal opacimetru, regim de scuturare 2, forma tensiunii
                                'continua
define O231    byte           'Semnal opacimetru, regim de scuturare 3, forma tensiunii
                                'continua

```

define	O212	byte	'Semnal opacimetru. regim de scuturare 1. forma tensiunii 'intermitentă 1/3
define	O222	byte	'Semnal opacimetru. regim de scuturare 2. forma tensiunii 'intermitentă 1/3
define	O232	byte	'Semnal opacimetru. regim de scuturare 3. forma tensiunii 'intermitentă 1/3
define	O213	byte	'Semnal opacimetru. regim de scuturare 1. forma tensiunii 'intermitentă 1/5
define	O223	byte	'Semnal opacimetru. regim de scuturare 2. forma tensiunii 'intermitentă 1/5
define	O233	byte	'Semnal opacimetru. regim de scuturare 3. forma tensiunii 'intermitentă 1/5
define	O214	byte	'Semnal opacimetru. regim de scuturare 1. forma tensiunii 'intermitentă 1/7
define	O224	byte	'Semnal opacimetru. regim de scuturare 2. forma tensiunii 'intermitentă 1/7
define	O234	byte	'Semnal opacimetru. regim de scuturare 3. forma tensiunii 'intermitentă 1/7
define	Omin	byte	'Valoare concentratie minima de praf

'Program principal

ports1=off

ports2=off

P16=on

gosub anlansare

regim1tensiunecontinua

gosub tensiunecontinua

for i=0 to 16000

gosub regim1

gosub tensiuneoptima

if (i>15500) then O211=OP2

if (i>15500) and (O211>10) then goto regim2tensiunecontinua

next

goto regim1tensiunecontinua

regim2tensiunecontinua

gosub tensiunecontinua

for i=0 to 4000

gosub regim2

gosub tensiuneoptima

if (i>3870) then O221=OP2

if (i>3870) and (O221>10) then goto regim3tensiunecontinua

next

goto regim2tensiunecontinua

regim3tensiunecontinua

gosub tensiunecontinua

for i=0 to 1000

gosub regim3

gosub tensiuneoptima

if (i>970) then O231=OP2

if (i>970) and (O231>10) then goto regim1tensiuneintermitenta3

next

goto regim3tensiunecontinua

regim1tensiuneintermitenta3

gosub tensiuneintermitenta3

for i=0 to 16000

gosub regim1

gosub tensiuneoptima

```

if (i>15500) then O212=OP2
if (i>15500) and (O212>10) then goto regim2tensiuneintermitenta3
next
goto regim1tensiuneintermitenta3

# regim2tensiuneintermitenta3
gosub tensiuneintermitenta3
for i=0 to 4000
gosub regim2
gosub tensiuneoptima
if (i>3870) then O222=OP2
if (i>3870) and (O222>10) then goto regim3tensiuneintermitenta3
next
goto regim2tensiuneintermitenta3

# regim3tensiuneintermitenta3
gosub tensiuneintermitenta3
for i=0 to 1000
gosub regim3
gosub tensiuneoptima
if (i>970) then O232=OP2
if (i>970) and (O232>10) then goto regim1tensiuneintermitenta5
next
goto regim3tensiuneintermitenta3

# regim1tensiuneintermitenta5
gosub tensiuneintermitenta5
for i=0 to 16000
gosub regim1
gosub tensiuneoptima
if (i>15500) then O213=OP2
if (i>15500) and (O213>10) then goto regim2tensiuneintermitenta5
next
goto regim1tensiuneintermitenta5

# regim2tensiuneintermitenta5
gosub tensiuneintermitenta5
for i=0 to 4000
gosub regim2
gosub tensiuneoptima
if (i>3870) then O223=OP2
if (i>3870) and (O223>10) then goto regim3tensiuneintermitenta5
next
goto regim2tensiuneintermitenta5

# regim3tensiuneintermitenta5
gosub tensiuneintermitenta5
for i=0 to 1000
gosub regim3
gosub tensiuneoptima
if (i>970) then O233=OP2
if (i>970) and (O233>10) then goto regim1tensiuneintermitenta7
next
goto regim3tensiuneintermitenta5

# regim1tensiuneintermitenta7
gosub tensiuneintermitenta7
for i=0 to 16000
gosub regim1
gosub tensiuneoptima
if (i>15500) then O214=OP2

```

```

if (i>15500) and (O214>10) then goto regim2tensiuneintermitenta7
next
goto regim1tensiuneintermitenta7

# regim2tensiuneintermitenta7
gosub tensiuneintermitenta7
for i=0 to 4000
gosub regim2
gosub tensiuneoptima
if (i>3870) then O224=OP2
if (i>3870) and (O224>10) then goto regim3tensiuneintermitenta7
next
goto regim2tensiuneintermitenta7

# regim3tensiuneintermitenta7
gosub tensiuneintermitenta7
for i=0 to 1000
gosub regim3
gosub tensiuneoptima
if (i>970) then O234=OP2
if (i>970) and (O234>10) then goto concentratieminimapraf
next
goto regim3tensiuneintermitenta7

#concentratieminimapraf
Omin=min(O211,O221)
Omin=min(Omin,O231)
Omin=min(Omin,O212)
Omin=min(Omin,O222)
Omin=min(Omin,O232)
Omin=min(Omin,O213)
Omin=min(Omin,O223)
Omin=min(Omin,O233)
Omin=min(Omin,O214)
Omin=min(Omin,O224)
Omin=min(Omin,O234)
if O211=Omin then goto regim1tensiunecontinua
if O221=Omin then goto regim2tensiunecontinua
if O231=Omin then goto regim3tensiunecontinua
if O212=Omin then goto regim1tensiuneintermitenta3
if O222=Omin then goto regim2tensiuneintermitenta3
if O232=Omin then goto regim3tensiuneintermitenta3
if O213=Omin then goto regim1tensiuneintermitenta5
if O223=Omin then goto regim2tensiuneintermitenta5
if O233=Omin then goto regim3tensiuneintermitenta5
if O214=Omin then goto regim1tensiuneintermitenta7
if O224=Omin then goto regim2tensiuneintermitenta7
if O234=Omin then goto regim3tensiuneintermitenta7

'Subrutina alimentare cu tensiune campuri
#anclansare
P10=on
P11=on
P12=on
return

'Forma tensiunii continue
#tensiunecontinua
P6=off
P7=off
P8=off

```

```
P9=off
return
```

```
'Forma tensiunii intermitente3
#tensiuneintermitenta3
P6=off
P7=on
P8=off
P9=on
return
```

```
'Forma tensiunii intermitente5
#tensiuneintermitenta5
P6=on
P7=off
P8=on
P9=off
return
```

```
'Forma tensiunii intermitente7
#tensiuneintermitenta7
P6=on
P7=on
P8=on
P9=on
return
```

```
'Regim 1 de scuturare
#regim1
if (i<=7500) then P13=on else P13=off
if (i>=11000) and (i<=13500) then P14=on else P14=off
if (i>=14000) and (i<=15500) then P15=on else P15=off
return
```

```
'Regim 2 de scuturare
#regim2
if (i<=1870) then P13=on else P13=off
if (i>=2750) and (i<=3380) then P14=on else P14=off
if (i>=3500) and (i<=3870) then P15=on else P15=off
return
```

```
'Regim 3 de scuturare
#regim3
if (i<=470) then P13=on else P13=off
if (i>=690) and (i<=840) then P14=on else P14=off
if (i>=870) and (i<=970) then P15=on else P15=off
return
```

```
'Cresterea optima a tensiunii pe fiecare camp
#tensiuneoptima
gosub crestereinitialatensiunecamp1
gosub descarcarecamp1
gosub crestereinitialatensiunecamp2
gosub descarcarecamp2
gosub crestereinitialatensiunecamp3
gosub descarcarecamp3
gosub masurare
gosub cresteretensiunecamp1
gosub cresteretensiunecamp2
gosub cresteretensiunecamp3
gosub masurare
```

return

```
'Crestere initiala a tensiunii pe campul 1, temporizare 2.8s
#crestereinitialatensiunecamp1
if (U1>=140) then gosub descarcarecamp1
for j=0 to 140    '35kV
pause 1
Eu1=j
next
return
```

```
'Crestere initiala a tensiunii pe campul 2, temporizare 2.8s
#crestereinitialatensiunecamp2
if (U2>=140) then gosub descarcarecamp2
for j=0 to 140    '35kV
pause 1
Eu2=j
next
return
```

```
'Crestere initiala a tensiunii pe campul 3, temporizare 2.4s
if (U3>=140) then gosub descarcarecamp3
P5=on
pause 20
P5=off    '10kV
P4=on
pause 20
P5=on    '15kV
pause 20
P4=off    '20kV
P5=off
P3=on
pause 20
P5=on    '25kV
pause 20
P5=off    '30kV
P4=on
pause 20
P5=on    '35kV
return
```

```
'Verificare descarcare in campul 1
#descarcarecamp1
if (I1>=255) then Eu1=off
pause 5 '100ms pauza
gosub crestereinitialatensiunecamp1
return
```

```
'Verificare descarcare in campul 2
#descarcarecamp2
if (I2>=255) then Eu2=off
pause 5 '100ms pauza
gosub crestereinitialatensiunecamp2
return
```

```
'Verificare descarcare in campul 3
#descarcarecamp3
if (I3>=255) then (P1=off and P2=off and P3=off and P4=off and P5=off)
pause 5 '100ms pauza
gosub crestereinitialatensiunecamp3
return
```


'Masurare tensiune si curenti pe cele trei campuri

#masurare

Uc1=U1

Uc2=U2

Uc3=U3

Ic1=I1

Ic2=I2

Ic3=I3

return

'Crestere tensiune camp1

#cresteretensiunecamp1

for i=Uc1 to 255

Eu1=i+1'Tensiunea crestere cu cate 0.25kV incepand cu 35 kV

Uc11=Eu1

if (I1>=255) then ((Eu1=Uc11-2) and (Uc1=Eu1))

pause 10'200ms

if (I1>=255) then gosub crestereinitialatensiunecamp1

next

return

'Crestere tensiune camp2

#cresteretensiunecamp2

for i=Uc2 to 255

Eu2=i+1'Tensiunea crestere cu cate 0.25kV incepand cu 35 kV

Uc21=Eu2

if (I2>=255) then ((Eu2=Uc21-2) and (Uc2=Eu2))

pause 10'200ms

if (I2>=255) then gosub crestereinitialatensiunecamp2

next

return

'Crestere tensiune camp3

#cresteretensiunecamp3

for i=Uc3 to 32

Uc31=i+1 'Tensiunea crestere cu cate 1kV incepand cu 35 kV

&B Uc31=P1P2P3P4P5

if (I3>=255) then ((Uc31=Uc31-1) and (&B Uc31=P1P2P3P4P5))

pause 10'200ms

if (I3>=255) then gosub crestereinitialatensiunecamp3

next

return

Listiugul programului folosit pe automatul programabil PS 3

000	L I0.0	
001	A NM1.2	
002	=M1.1	
003	TR1	
	TR1*S:	M1.1
	TR1*STP:	
	TR1*IW:	KW 7500
	TR1*EQ:	N Q0.1
004	TR2	
	TR2*S:	N Q0.1
	TR2*STP:	
	TR2*IW:	KW 8500
	TR2*EQ:	M1.2
005	L NQ0.1	
006	A NM1.4	
007	=M1.3	
008	TR3	
	TR3*S:	M1.3
	TR3*STP:	
	TR3*IW:	KW 3500
	TR3*EQ:	N Q0.2
009	TR4	
	TR4*S:	Q0.2
	TR4*STP:	
	TR4*IW:	KW 2500
	TR4*EQ:	M1.4
010	L NQ0.1	
011	A NM1.6	
012	=M1.5	
013	TR5	
	TR5*S:	M1.5
	TR5*STP:	
	TR5*IW:	KW 6500
	TR5*EQ:	Q0.3
014	TR6	
	TR6*S:	Q0.3
	TR6*STP:	
	TR6*IW:	KW 1500
	TR6*EQ:	M1.6

Bibliografie

1. Adamiak K. – *"Particle Charging by Unipolar Ionic Bombardment in an AC Electric Field"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.33, no.2, pp.421-426, march/april 1997;
2. Adamiak K., Jaworek A., Krupa A. – *"Deposition Efficiency of Dust Particles on a Single, Falling and Charged Water Droplet"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.37, no.3, pp.743-750, may/june 2001;
3. Al-Hamuz Z.M. – *"Combined Finite Element – Charge Simulation Computation of Monopolar Corona on Bundle Wires"*, the 33rd IAS Annual Meeting St. Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
4. Al-Hamuz Z.M. – *"Finite Element Analysis of Corona in Wire-Duct Electrostatic Precipitators"*, IEEE Industry Applications Conference, Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
5. Altin A.C., - *"Precipitator Performance Improvement Program Practical Approach"*, presented at 6th International Conference of Electrostatic Precipitators, Budapest, 1996 (suport electronic);
6. Asano K. și colectiv – *"Fundamental Characteristics and Collection Efficiency of a Model Precipitator"*, the 6th ICESP, Budapest, 1996 (suport electronic);
7. Bayless D.J., Caine J. – *"Emerging Technologies – New Design Wet Membrane Electrostatic Precipitator"*, presented at the 2001 Particulate Control User's Group Conference, St. Louis, Missouri, U.S.A., july 24, 2001 (suport electronic);
8. Bayless D.J. și colectiv – *"Kinetics of Low Temperature Homogenous SO₃ Formation for Use in Flue Gas Conditioning for Improved ESP Performance"*, Proceedings of the Combustion Institute, Ohio University, vol.28, 2000, U.S.A. (suport electronic);
9. Benda S. – *"Electromagnetic Compatibility and the ABB Group in the Next Millenium"*, ABB Review Article, Issue, no. 6, 1999 (suport electronic);
10. Bîrcă G.Ș., Stoichescu A.D., Pantelimon C. – *"Electronică de putere. Aplicații"*, Editura Militară, București, 1991;
11. Bodea M. și colectiv – *"Diode și tiristoare de putere"*, vol.I, II, Editura Tehnică, București, 1990;
12. Buccella C. – *"Quasi Static and Dynamical Computation of V – I Characteristics of a Dust – Loaded Pulse – Energized Electrostatic Precipitator"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.35, no.2, pp.366-372, march/april 1999;
13. Buta A., Pană A., - *"Calitatea tensiunii – criteriu principal de analiză a interdependenței dintre compensarea puterii reactive, echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor în rețelele de distribuție performante"*, Energetica, nr.2, pag.75-83, București, 1999;
14. Caputo A.C., Giacchetta G., Pelagagge P.M. – *"Economical Comparision of Conventional and Pulsed Electrostatic Precipitators in Industrial Applications"* – the 6th ICESP, Budapest, 1996 (suport electronic);
15. Cârstoiu D.I. – *"Sisteme expert"*, Editura All, București, 1994;
16. Chandra A. – *"Investigations on Electrostatic Precipitator: A Case Study"*, IEEE Industry Applications Conference, the 33rd IAS Meeting, St. Louis, Missouri, 1998 (suport electronic);
17. Ciugudean M. și colectiv – *"Circuite integrate liniare. Aplicații"*, Editura Facla, Timișoara, 1986;
18. Constantin N., Nicolae M., Niculae B. – *"Cercetări privind îmbunătățirea eficienței funcționale a electrofiltrelor din sectorul de aglomerare a minereurilor feroase"*, Electrotehologii și mediul ambiant, ICEH'96, pag.49-54, Universitatea Lucian Blaga, Sibiu, 1996;
19. Cramoriuc R., Petrescu V., Tănăsescu Fl. – *"Măsurări electrice industriale. Măsurări în înalta tensiune"*, vol.III, Editura Tehnică, București, 1971;
20. Cristina S., Feliziani M. – *"Calculation of Ionized Fields in DC Electrostatic Precipitators in the Presence of Dust and Electric Wind"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.31, no.6, pp.1446-1451, november/december, 1995;

21. Dastfan A., Platt D., Gosbell V.J. – *"Design and Impementation of a New Three Phase Four Wire Active Power Filter with Minimum Components"*, IEEE Industry Applications Conference, the 33rd IAS Annual Meeting St. Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
22. Dăscălescu L. și colectiv – *"Computational Estimation of ESD Conditions Between Charged Particles and Grounded Surfaces"*, IEEE Industry Applications Conference, the 33rd IAS Annual Meeting, St. Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
23. Deleanu M. și colectiv – *"Aeroionizarea negativă"*, Editura Tehnică, București, 1988;
24. Digă S.M. - *"Considerations sur le calcul du rendement de depoussierage du gaz dans les electrofiltres a plaques"*, Revue Roumanie Des Sciences Techniques, Academie Roumaine, tom 44, pag.339-350, București, 1999;
25. Digă S.M. – *"Contribuții la analiza creșterii performanțelor tehnice ale electrofiltrelor"*, teză de doctorat, Universitatea Politehnica București, București, 1998;
26. Drăgan G. - *"O analiză a descărcării Corona de impuls"*, A Treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice, SIELMEN 2001, pag.47-50, Chișinău, 2001;
27. Ellis R.G. – *"Harmonic Analysis of Industrial Power Systems"*, IEEE Transactions on Industry Applications, pp.417-421, vol.32, no.2, march/april, 1996;
28. Fouad L., Elhaze K.S. – *"Effect of Humidity on Positive Corona Discharge in a Three Electrode System"*, Journal of Electrostatics, vol.35, pp.21-30, 1995;
29. Fujita H., Akagi H. – *"Control and Performance of a Pulse – Density – Modulated Series – Resonant Inverter for Corona Discharge Processes"*, IEEE Industry Applications Conference, the 33rd IAS Annual Meeting, St. Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
30. Gheorghe P. - *"Electricitatea statică in întreprinderile industriale"*, teză de doctorat, Universitatea Politehnica București, Facultatea de Energetică, București, 1999;
31. Ghinea M., Firețeanu V. – *"MatLab. Calcul numeric. Grafică. Aplicații"*, Editura Teora, București, 1997;
32. Grass M. – *"Fuzzy Logic – Optimising IGBT Inverter for Electrostatic Precipitators"*, the 34th Annual Meeting, IEEE Industry Applications Conference, Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
33. Greason W.D. și colectiv – *"Investigation of the Optical and Electrical Characteristics of a Spark Gap"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.33, no.6, pp.1519-1526, nov./december, 1997;
34. Hedeș A., Șora I. – *"Echipamente cu înaltă frecvență pentru sudarea cu arc electric"*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2001;
35. Higashiyama Y., Yamanaka K., Asano K. – *"Analysis of the Behaviour of Ions Produced by Pulsed Corona Discharge"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.33, no.2, pp. 427-434, march/april, 1997;
36. Hortopan Gh., Hortopan V. – *"Șunturi și divizoare de tensiune"*, Editura Tehnică, București, 1978;
37. Hortopan Gh., Vlase I.O., Nițu S. – *"Ecranarea electromagnetică în tehnica curenților intenși"*, Editura Tehnică, București, 1990;
38. Hossain A., Choudhury Z.A., Suyut S. – *"Statistical Process Control of an Industrial Process in Real Time"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.32, no.2, pp.243-249, march/april, 1996;
39. Hull D. – *"Kettle Falls Station"*, Kettle Falls, Washington, 1999 (suport electronic);
40. Inuleț I.I., Lackner J.R. – *"Micron-Size Particle Filtration with Dual Wire Artificial Electret Fibers"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.31, no.5, pp.941-944, september/october, 1995;
41. Ionescu T., Pop O. – *"Ingineria sistemelor de distribuție a energiei electrice"*, Editura Tehnică, București, 1998;
42. Iuga A. și colectiv – *"Electrostatic Separation of Metals and Plastics from Granular Industrial Wastes"*, IEEE Industry Applications Conference, the 33rd IAS Annual Meeting, St. Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
43. Jang G.H. și colectiv – *"Development of 0,5MW Scale SO_x –NO_x System Using Pulsed Corona Discharge"*, Environment Technology Research Department, Hanjung, S.Korea, 2001 (suport electronic);

44. Jarvelainen T., Kuisama M., Silventoinen P. – *"Simulation – An Essential Tool in Modern Switch Mode Power Supply Design"* – proceeding of the 2000 IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, pp.32-36. Aalborg University, Denmark, 2000;
45. Jayaram S. și colectiv – *"Semipilot Plant Pulse Energized Cold-Precharger Electrostatic Precipitator Tests for Collection of Moderately High Resistivity Flyash Particles"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.32, no.4, pp.851-857, july/august, 1996;
46. Jedrusik M., Jedrusik J. – *"Exploitation Experience of the Cooperation of an Electrostatic Precipitator and a Desulphurisation Installation"*, the 6th ICESP, Budapest, 1996 (suport electronic);
47. Jurca T., Stoiciu D. – *"Instrumentație de măsurare. Structuri și circuite"*, Editura de Vest, Timișoara, 1996;
48. Kalachnikov S.M. – *"Direct Harmonic Control Method for Active Filters Without Mains Voltage Sensors"*, the 7th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brașov, 2000 (suport electronic);
49. Kawada Y. și colectiv – *"Development of High Collection Efficiency ESP by Barrier Discharge System"*, the 34th Annual Meeting, IEEE Industry Applications Conference, Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
50. Keeler T., Grynack R.R. – *"Upgrade Methods and Technology for Electrostatic Precipitators"*, presented at the Environment and Innovation in Mining and Mineral Technology Conference, Santiago, Chile, 1998 (suport electronic);
51. Kim W.H. și colectiv – *"A High Voltage Pulsed Power System for Electrostatic Precipitators"*, the 34th Annual Meeting, IEEE Industry Applications Conference, Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
52. Koizumi Y. și colectiv – *"Bipolar Charged Submicron Particle Agglomeration"*, Journal of Electrostatics, vol.35, pp.51-60, 1995;
53. Kreindler L., Giuclea R. – *"Bazele microprocesoarelor"*, Editura Matrix Rom, București, 1998;
54. Krigmont H.V. – *"Electrostatic Precipitator"*, Patent Number 5547493, U.S.A., august 20, 1996;
55. Krigmont H.V., Coe E.L. – *"Measurement of Electrical Resistivity of Particulate Entrained in a Gas Stream"*, Patent Number 5008628, U.S.A., april 16, 1991;
56. Kucerovsky Z. – *"Mobility and Drift Velocity of Charge Carriers in Gas Mixtures"*, the 34th Annual Meeting IEEE Industry Applications Conference Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
57. Kucerovsky Z. – *"Optical Decoupling in Measurements of Corona Currents"*, the 34th Annual Meeting, IEEE Industry Applications Conference Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
58. Kucerovsky Z., Greason W.D., Doyle T. – *"Data Acquisition System for the Measurements of Corona Currents"*, IEEE Industry Applications Conference, the 33rd IAS Annual Meeting, St. Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
59. Kucerovsky Z., Greason W.D., Flatley – *"Calibration of a Calorimetric for Measurements of Electrostatic Discharge"*, IEEE Industry Applications Conference, the 34th IAS Annual Meeting, Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
60. Kucerovsky Z., Greason W.D., Flatley M.W. – *"Calorimetric Calibration of Spark Gaps for Electrostatic Discharge Studies"*, IEEE Industry Applications Conference, the 33rd IAS Annual Meeting, St. Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
61. Kucerovsky Z., Greason W.D., Weigl A. – *"Corona Wind in a System with the Pin-to-plan Discharge Geometry"*, the 34th Annual Meeting, IEEE Industry Applications Conference, Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
62. Kwetkus B.A. – *"Contact Electrification of Coal and Minerals"*, Journal of Electrostatics, vol.32, pp.271-276, 1994;
63. Lami E. și colectiv - *"A Numerical Procedure for Computing the Voltage-Current Characteristics in Electrostatic Precipitator Configurations"*, Journal of Electrostatics, vol.34, pp.385-399, 1995;
64. Landau I.D. – *"Identificarea și comanda sistemelor"*, Editura Tehnică, București, 1997;
65. Lazăr C. și colectiv – *"Conducerea asistată de calculator a proceselor tehnice. Proiectarea și implementarea algoritmilor de reglare numerică"*, Editura Matrix Rom, București, 1996;

66. Liang X. și colectiv – *"Mercury and Other Trace Elements Removal Characteristics of DC and Pulse Energized Electrostatics Precipitator"*, IEEE Industry Applications Conference, the 33rd IAS Annual Meeting, St. Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
67. Liang X. și colectiv – *"Pulsed Corona Modelling of a Wire-Cylinder ESP under Dust Loading Condition"*, the 34th IAS Annual Meeting, IEEE Industry Applications Conference, Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
68. Lo Y.K., Kuo L.C. – *"A New Control Method for Single-Phase Active Power Line Conditioners"*, the 14th Annual Applied Power Electronics Conference, Dallas, Texas, U.S.A., 1999 (suport electronic);
69. Macarie R. – *"Cercetări privind optimizarea instalațiilor de electrofiltre"*, teză de doctorat, Universitatea Politehnică București, Facultatea de Energetică, București, 1996;
70. Mahabaleshwarkar A. – *"Using Gas Conditioning to Increase Production Capacity"*, BHA Group, 1999 (suport electronic);
71. Mahmoud I.I., Kamel S.A. – *"Using a Simulation Technique for Switched-Mode High-Voltage Power Supplies Performance Study"*, IEEE transactions on Industry Applications, vol.34, no.5, pp.945-952, september/october, 1998;
72. McComb W.D. – *"Turbulența fluidelor"*, Editura Tehnică, București, 1997;
73. Medlin A. – *"Electrohydrodynamic Modelling of Fine Particle Collection in Electrostatic Precipitators"*, doctorat thesis, School of Physics, University of New South Wales Australia, 1998;
74. Medlin A.J., Fletche C.A.J., Morrow R. – *"An Efficient Pseudo-Transient Solution Method for Monopolar Corona with Charge Advection and Diffusion"*, the 6th ICESP, Budapest, 1996 (suport electronic);
75. Medlin A.J., Fletcher C.A.J., Morrow R. - *"Electrohydrodynamic Modelling of Fine Particle Collection in Electrostatic Precipitators"*, the 7th ICESP, Kyongju, Korea, 1998 (suport electronic);
76. Medora M.K., Kusko A. – *"Computer - Aided Design of Power Harmonic Filters"*, IEEE Industry Application Conference, the 33rd IAS Annual Meeting, St. Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
77. Meroth A.M. și colectiv – *"A Model of the Non-Stationary Charge Flow in an Electrostatic Precipitator"*, the 6th ICESP, Budapest, 1996 (suport electronic);
78. Meroth A.M. și colectiv – *"Effective Solution of 3D Charge Coupled Problems in Electrostatic Precipitator"*, Intl. Symposium Separation and Filtration of Fine Dust, Vienna, 1996 (suport electronic);
79. Meroth A.M., Rostogi A.K., Schwob A.J. – *"Numerical Computation of the Turbulent Particulated Flow in an Electrostatic Precipitator"*, Intl. Symposium Separation and Filtration of Fine Dust, Vienna, 1996 (suport electronic);
80. Mihailescu M. și colectiv – *"Prototyping of an Expert System for Electrostatic Separation Processes"*, the 34th Annual Meeting, IEEE Industry Application Conference, Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
81. Miller J. și colectiv – *"Local Deposition of Particles in a Laboratory - Scale Electrostatic Precipitator with Barbed Discharge Electrodes"*, the 6th ICESP, Budapest, 1996 (suport electronic);
82. Mocanu C.I. – *"Teoria câmpului electromagnetic"*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981;
83. Mok Y.S., Kim K.T. – *"Demonstration of Flue Gas Cleaning by Positive Pulsed Corona Discharge Process"*, the 34th Annual Meeting, IEEE Industry Application Conference, Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
84. Mureșan T. și colectiv – *"Circuite integrate numerice. Aplicații"*, Editura de Vest, Timișoara, 1996;
85. Negrescu L. – *"Limbașele C și C++ pentru începători"*, vol.I, II, III, Editura Albastră, Cluj-Napoca, 1996;
86. Negru V. – *"Tehnica tensiunilor înalte. Supratensiuni interne"*, Universitatea Tehnică Timișoara, 1995;
87. Negru V. și colectiv - *"Conductori cu ecrane pentru măsurarea parametrilor descărcării prin efect Corona"*, Simpozionul Național al Rețelelor Electrice, adiția a V-a, Modernizarea activității de exploatare a instalațiilor de transport și distribuție a energiei electrice, vol.II, pag.166-169, Cluj-Napoca, 1988;
88. Nibeleanu Șt., Artino A., Napu S. – *"Instalații de separare a prafului cu electrofiltre"*, Editura Tehnică, București, 1984;
89. Nicolae P.M. – *"Tehnici de reducere a armonicilor și/sau nesimetriei în regim dinamic în sisteme electroenergetice de putere"*, SOCER, nr.28, pag.33-37, 2/1997, Craiova;
90. Nicolae E. – *"Măsurări electronice. Manualul inginerului electronist"*, Editura Tehnică, București, 1979;

91. Pajak J.R. – *"Rigid Discharge Electrode and Wide Spacing Electrostatic Precipitator in Poland"*, the 6th ICESP, Budapest. 1996 (suport electronic);
92. Palmer A.K. – *"Computational Fluid Dynamic Software Comparision and Electrostatic Precipitator Modelling"*, master thesis. California State University, U.S.A., 1996;
93. Parker K.R. și colectiv – *"Applied Electrostatic Precipitation"*, Chapman And Hall, London. England, 1997;
94. Perkins B.K. – *"Dynamic Modelling of an Inverter Based Compensator"*, the 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Charleston, South Carolina, U.S.A., 1999 (suport electronic);
95. Phelan B., Taylor R.W. – *"Electrostatic Precipitator Top Rap Conversion for Colombian Current Plant Eliminates the Need for New Precipitator"*, A.P.C.A.C. Conference, U.S.A., 1997 (suport electronic);
96. Plaks N. – *"Improving Collection of Toxic Fine Particles in ESPs"*, the 6th ICESP, Budapest. 1996 (suport electronic);
97. **Popa G.N.** - *"Analiza caracteristicilor curent-tensiune pentru un filtru electrostatic"*, Lucrările științifice ale simpozionului internațional "Universitaria ROPET 2000". Inginerie electrică, Universitatea din Petroșani, pag.7-8, 2000;
98. **Popa G.N.** - *"Analiza parametrilor electrici a unui electrofiltru"*, Lucrările științifice ale simpozionului internațional "Universitaria ROPET 2001", Universitatea din Petroșani, pag.237-242, 2001;
99. **Popa G.N.** - *"Aspecte privind distribuția vitezei gazelor din filtrele electrostatice"*, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, Universitatea „Politehnica” Timișoara, tomul I, fascicola 2, pag.93-100, 1999;
100. **Popa G.N.** - *"Aspecte privind eficiența colectării filtrelor electrostatice de praf"*, Lucrările științifice ale simpozionului internațional. Ecologie și ingineria mediului, Universitatea din Petroșani, Ecole des Mines d`Ales, pag.145-148, 1999;
101. **Popa G.N.** și colectiv - *"Automatizarea scuturării câmpurilor unui electrofiltru industrial"*, Revista de Automatizări și instrumentație, nr.5, an XII, Asociația pentru Automatizări și Instrumentație din România, pag.27-28, București, 2003;
102. **Popa G.N.** - *"Considerații asupra factorilor care modifică rezistivitatea prafului colectat de filtre electrostatice"*, Lucrările științifice ale simpozionului internațional. Ecologie și ingineria mediului, Universitatea din Petroșani, Ecole des Mines d`Ales, pag.149-150, 1999;
103. **Popa G.N.** - *"Determinarea vitezei medii de migrație a particulelor de praf într-un filtru electrostatic"*, Lucrările științifice ale simpozionului internațional „Universitaria ROPET 2000”. Inginerie electrică, Universitatea din Petroșani, pag.37-40, 2000;
104. **Popa G.N.**, Popa I. - *"Simulations of Electrical Parameters from Plate-Type Electrostatic Precipitators Using ESPIT 4.0 a Software"*, 6th International Conference on Accomplishments of Electrical and Mechanical Industries, DEMI-2003, Section D1, Thermotechnique, pp.613-616, Banja Luka, 2003;
105. **Popa G.N.**, Popa I. - *"Simulations of the Plate-Type Electrostatic Precipitators Power Supplies Using PSCAD EMTDC 3.0.8 Software"*, 6th International Conference on Accomplishments of Electrical and Mechanical Industries, DEMI-2003, Section D2, Energetics, pp.655-660, Banja Luka, 2003;
106. **Popa G.N.**, Popa I. – *"Simulations of Parameters from Electrostatic Precipitator Using ESPIT 4.0.a Software"*, the 6th International Symposium of Interdisciplinary Regional Research, Novi Sad, Yugoslavia, 2002 (suport electronic);
107. **Popa G.N.**, Popa I. - *"Influența transformatoarelor de curent la măsurarea cu plăci de achiziție"*, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, Universitatea „Politehnica” Timișoara, tomul III, fascicola 2, pag.9-14, 2001;
108. **Popa G.N.**, Popa I. – *"The Gas Flow Through a Plate – Type Electrostatic Precipitators"*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, seria Mecanică, secția Mecanica fluidelor și mașini hidraulice, Tom 46(61), fascicola 2, Editura Politehnica, pag.47-50, Timișoara 2002;

109. **Popa G.N.**, Popa I. – *"The Measurements of Corona Currents for an Electrostatic Discharge System"*, 4th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2003, pp.267-270, Chișinău, Republica Moldova, 2003;
110. **Popa G.N.**, Popa I. – *"The Measurements and the Models of Current-Voltage Characteristics of Plate-Type Electrostatic Precipitators"*, 4th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2003, pp.271-274, Chișinău, Republica Moldova, 2003;
111. Popa I., **Popa G.N.** – *"Dispozitive electronice cu structură cablată și programată, de protecție a motoarelor asincrone trifazate de joasă tensiune"*, Editura Mirton, Timișoara, 2000;
112. Popa I., **Popa G.N.**, Abrudean C. – *"Analysis of Potentia and Intensity of Electric Field in Electrostatic Precipitators"*, A doua Conferință Internațională de Inginerie Electrică și Energetică, EPE 2002, Electrotehnică. Energetică. Electronică, Tomul XLVIII(LII), fascicula 5A, IEEE secția România, pag. 57-62, Iași, 2002 ;
113. Popa I., **Popa G.N.**, Bleoca A. – *"Analogical Time Circuits Using T.T.L. Integrated Circuits"*, A doua conferință Internațională de Inginerie Electrică și Energetică, EPE 2002, Electrotehnică. Energetică. Electronică, Tomul XLVIII(LII), fascicula 5B, IEEE secția România, pag. 15-20, Iași, 2002;
114. Popescu V. - *"Electronică aplicată. Stabilizatoare de tensiune în comutație"*, Editura de Vest, 1992, Timișoara ;
115. Prasad N.V.P.R. și colectiv – *"Automatic Control and Management of Electrostatic Precipitator"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 3, pp.561-567, may/june, 1999;
116. Pușcașu S., Markovici J. – *"Mărimi și regimuri electrice nesinusoidale"*, Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1974 ;
117. Râpeanu R. și colectiv – *"Circuite integrate analogice"*, Editura Tehnică, București, 1983;
118. Riehle C., Löffler F. – *"Grade Efficiency and Eddy Diffusivity Models"*, Journal of Electrostatics, vol. 34, pp.401-413, 1995;
119. Sarna M. – *"Self Exploring ESP Rapping Optimisation System"*, the 6th ICESP, Budapest, 1996 (suport electronic);
120. Sato Y. și colectiv – *"An Adaptive Control Strategy for Active Power Filters with Voltage Detection"*, IEEE Industry Applications Conference, the 33rd IAS Annual Meeting, St. Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
121. Schmid H.J., Buggisch H. – *"On the Modelling of Particle Transport in Electrostatic Precipitators"*, the 7th ICESP, Kyongju, S.Korea, 1998 (suport electronic);
122. Schmid H.J., Schmid E. – *"Investigations in to the Local Mass Flux of Dust to be Precipitated at the Collecting Electrode"*, the 6th ICESP, Budapest, 1996 (suport electronic);
123. Schmid H.J., Stolz S., Buggisch H. – *"On the Electrohydrodynamic Flow-Field in Electrostatic Precipitators"*, procedeeing at 1st Int. Symposium On Turbulence and Shear Flow Phenomena, Santa Barbara, U.S.A., 1999 (suport electronic);
124. Schmid H.J., Umhauer H. – *"In-situ Measurement of Local Particle Fluxed in a Laboratory – Scaled ESP"*, the 7th ICESP, Kyongju, S.Korea, 1998 (suport electronic);
125. Schmid H.J., Umhauer H. – *"Investigation on Particle Dynamics in a Plate Type Electrostatic Precipitator Using Double-Pulse Holography"*, the 6th ICESP, Budapest, 1996 (suport electronic);
126. Seaman R. – *"Theory of an Ion Wind Device"*, U.S.A.F., Washington D.C., 1960 (suport electronic);
127. Seaver A.E. – *"Ionization Through a Sequence of Collisions"*, Journal of Electrostatics, no. 35, pp.113-123, 1995;
128. Seaver A.E. – *"Mobility and High Electric Fields"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 3, pp.687-691, may/june, 1997;
129. Silard A.P. – *"Tiristoare cu blocare pe poartă GTO"*, Editura Tehnică, București, 1990;
130. Sirobinski L.I. și colectiv – *"Tehnica tensiunilor inalte"*, traducere din limba rusă, Editura Energetică de Stat, București, 1954;
131. Stănciulescu F. - *"Analiza și simularea sistemelor neliniare"*, Editura Academiei Republicii Soocialiste România, București, 1974;

132. Străinescu I., Condruș M. – “ *Tiristorul. Caracteristici. Comandă. Protecție. Utilizări*”, Editura Tehnică, București, 1988;
133. Șora C. – “ *Bazele electrotehnice* ”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982;
134. Șora I., Golovanov N. și colectiv – “ *Electrotermie și electrotehnologii. Electrotehnologii*”, vol. II. Editura Tehnică, București, 1999;
135. Șora I., Pănoiu M., Pănoiu C. – “ *Utilizarea programului PASCAD-EMTDC la simularea funcționării instalațiilor cuptoarelor cu arc electric* ”, Revista de Instrumentație virtuală, anul IV, vol. IV, nr. 1 (13), pag.15-20, Cluj-Napoca, 2001;
136. Șora I. și colectiv - “ *Experimental Researches on Using Passive Filters in Electric Lighting Installations*”, Analele Universității din Oradea. Fascicola Electrotehnică, a 5-a Conferință Internațională de Ingineria Sistemelor Moderne în Electrotehnică, Oradea, pag.179-184, 1999;
137. Tănăsescu F., Cramariuc R. – “*Electrostatica în tehnică*”, Editura Tehnică, București, 1977;
138. Tennal K.B. și colectiv – “*Efficiency of Electrostatic Separation of Minerals from Coal as a Function of Size and Charge Distributions of Coal Particles*”, the 34th Annual Meeting, IEEE Industry Applications Conference Phoenix, Arizona, U.S.A., 1999 (suport electronic);
139. Titihăzan V. - “*Impactul rețelelor electrice asupra mediului și aspecte de compatibilitate electromagnetică*”, Editura AGIR, București, 2000;
140. Toacșe Gh., Nicula D. – “*Electronică digitală*”, Editura Teora, București, 1996;
141. Toma L. – “*Sisteme de achiziție și prelucrare numerică a semnalelor*”, Editura de Vest, Timișoara, 1997;
142. Truce R.J. – “*Gas Humidification for Electrostatic Precipitators. The Effect of Emission and Corrosion*”, the 4th CSIRO Conference on Gas Cleaning, 1991 (suport electronic);
143. Truce R.J. – “*New Technology Improves Electrostatic Precipitator Performance*”, presented at ICESP VII, Kyongju, S.Koreea, 1998 (suport electronic);
144. Truce R.J. – “*Pollution Control Using Low Sulphur Coal*”, presented at PACOAL, 1989 (suport electronic);
145. Tseng C.H. – “*Enhanced Pulsed Corona Method for the Removal of SO₂ and NO_x from Combustion Gas in a Wet Electrostatic Precipitator*”, doctorat thesis, University of Cincinnati, U.S.A., 2000 (suport electronic);
146. Vlad S. și colectiv – “*Numerical Analysis of the Electric Field in Plate-Type Electrostatic Separators*”, IEEE Industry Applications Conference, the 33rd IAS Annual Meeting, St. Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
147. Yamaguchi T. și colectiv – “*A Simple and Low Cost Measuring Method for Harmonics in the Power System*”, IEEE Industry Applications Conference, the 33rd IAS Annual Meeting, St.Louis, Missouri, U.S.A., 1998 (suport electronic);
148. Yildiz A.B. și colectiv – “*A Fast Simulation Technique for the Power Electronic Converters*”, the 14th Annual Applied Power Electronics Conference, Dallas, Texas, U.S.A., 1999 (suport electronic);
149. Watanabe T. și colectiv – “*Submicron Particle Agglomeration by an Electrostatic Agglomerator*”, Journal of Electrostatic, vol. 34, pp.367-383, 1995;
150. Werner J.F. – “*Aspects of ESP Upgrading*”, the 6th ICESP, Budapest, 1996 (suport electronic);
151. *** – “*Bedienungshandbuch – PRG 3S*”, Klöckner – Moeller, Germany, 1987;
152. *** – “*C – Control / Basic Starterboard*”, Conrad Electronic GmbH, Germany, 1997;
153. *** – “*C – Control / Basic / Steuercomputer*”, Conrad Electronic GmbH, Germany, 1997 ;
154. *** – “*Comportarea în exploatare a electrofiltrelor din CTE Deva*”, contract nr.3271, ICEMENERG, București, 1986;
155. *** – “*Documentația tehnică, echipamente electrice de înaltă tensiune pentru electrofiltre ZEO 92–1800*”, S.C. ICPET S.A., București, 1998 ;
156. *** – “*Environmental Impact of Precipitator Energy Savings. Discharge Systems. Rebuilding and Upgrades*”, Neundorfer Engineer Systems, 1999 (suport electronic);
157. *** – “*ESPII 4.0.a.*”, manual, U.S.A., 1992;

158. *** – "Flow – 3D", manuals, U.S.A., 2001;
159. *** – "FLS – miljo documentation", Denmark, 2000;
160. *** – "Handbuch Teil 1–3: Hardware, Projektierung, Software, Programmeispiele", SUCOS PS 3, Klöckner – Moeller, Germany, 1987 ;
161. *** – "Instalația de desprăfuire electrică F.E. Deva-grup 4. Măsurători de performanță pentru stabilirea gradului de epurare", contract 2131-CPPM, SC ICPET SA, București, 1996;
162. *** – "Instalația de desprăfuire electrică F.E. Deva-grup 6. Măsurători de performanță pentru stabilirea gradului de epurare", contract 2130-CPPM, SC ICPET SA, București, 1996;
163. *** – "LISA documentation", Germany, 2001 ;
164. *** – "Maintenance and Troubleshooting", Neundorfer Engineering Systems, 1999 (suport electronic);
165. *** – "Măsurători de performanță pentru demonstrarea parametrilor de desprăfuire IDE 1.300.000 m³/h, grup energetic nr. 1 F.E. Deva", cod lucrare 2181 – CPPM, S.C. ICPET S.A., București, 1996 ;
166. *** – "Măsurători de performanță pentru stabilirea gradului de epurare la instalația de desprăfuire electrică de la grupul nr. 5", contract nr. 7772., S.C. ICPET S.A., București, 1996 ;
167. *** – "Modernizare electrofiltre bloc 1 – 4 C.T.E. Mintia IDE 1.460.000 m³/h, cazan 640 t/h huiă – instrucțiuni de montaj", contract nr. 6922, Institutul de Cercetare Științifică și Inginerie tehnologică pentru Echipamente Energetice. București, 1985 ;
168. *** – "Optimizarea funcționării electrofiltrelor aferente grupului nr.1 cu 4 câmpuri", Sucursala Electrocentrale Deva, contract nr.7815-1/1998, S.C. ICPET S.A., București, 1998;
- 169.*** – "Optimizarea funcționării electrofiltrelor cu 3 câmpuri la grupul nr.4", Sucursala Electrocentrale Deva, contract nr.7815-2/1998, S.C. ICPET S.A., București, 1998;
170. *** – "Precipitator Solutions. Precipitator Controls. Precipitator Optimization System", Neundorfer Engineering Systems, 1999 (suport electronic);
171. *** – "PSCAD – EMTDC. User's Manual", Manitoba, Canada, 2001 ;
172. *** – "Teste preliminare pentru stabilirea parametrilor de desprăfuire, IDE 1.300.000m³/h, grup energetic nr. 1 din cadrul F.E. Deva", codul 2162 – CPPM, S.C. ICPET S.A., București, 1995 ;
173. *** – "Total KVA is Not a Good Means of Evaluating ESP Performance", TRK Engineering Services, U.S.A. 1998 (suport electronic);
174. *** – "Win DAC Data Aquisition and Archiving Software. Win RAP and PRC-100 Rapping Controls", BHA Group, U.S.A., 1998 (suport electronic).

Cuprins

1. Introducere.....	1
2. Construcția electrofiltrelor cu plăci.....	4
2.1. Generalități.....	4
2.2. Variante constructive.....	5
2.2.1. Părțile componente ale electrofiltrelor cu plăci	5
2.2.2. Alte variante constructive.....	14
2.3. Analiza variantelor de alimentare cu energie electrică.....	16
2.3.1. Alimentarea tradițională cu energie electrică a electrofiltrelor cu plăci.....	16
2.3.2. Alimentări speciale cu energie electrică ale electrofiltrelor.....	21
2.4. Strategii de control ale surselor de alimentare ale electrofiltrelor.....	28
2.4.1. Principii de bază ale controlului.....	28
2.4.2. Noi metode de control.....	31
2.5. Factorii care influențează eficiența electrofiltrelor.....	35
2.6. Concluzii.....	39
3. Funcționarea și modelarea electrofiltrelor.....	41
3.1. Introducere.....	41
3.2. Teoria descărcării Corona.....	42
3.3. Încărcarea electrostatică, migrația și colectarea particulelor.....	51
3.4. Curgerea electrohidrodinamică în electrofiltru.....	61
3.5. Modelarea electrofiltrelor.....	62
3.5.1. Caracteristicile curent-tensiune.....	62
3.5.2. Modelarea electrofiltrelor.....	66
3.6. Elemente privind dimensionarea electrofiltrelor.....	69
3.7. Concluzii.....	75
4. Simulări ai parametrilor electrici și tehnologici ai instalațiilor electrofiltrelor.....	77
4.1. Simulări ai parametrilor electrici cu programul PSCAD/EMTDC 3.0.8.....	77
4.1.1. Generalități.....	77
4.1.2. Simulări la frecvență industrială (50Hz).....	77
4.1.3. Simulări la înaltă frecvență.....	83
4.2. Simulări numerice ale potențialului și a intensității câmpului electric.....	85
4.3. Simulări ai parametrilor electrici și tehnologici ale electrofiltrelor cu plăci cu programul ESPVI	
4.0.a.....	89
4.3.1. Generalități.....	89
4.3.2. Simulări cu ESPVI 4.0.a.....	90
4.4. Simulări ale curgerii gazelor cu programul LISA 4.0.1.....	97
4.5. Concluzii.....	100

5. Cercetări experimentale ale parametrilor electrici și tehnologici ai electrofiltrelor.....	102
5.1. Analiza parametrilor electrici ai electrofiltrelor.....	102
5.2. Analiza parametrilor tehnologici ai electrofiltrelor.....	108
5.3. Studii experimentale ale descărcării Corona în electrofiltre.....	115
5.3.1. Studiul descărcării Corona la frecvență industrială.....	115
5.3.1.1. Studiul optic.....	115
5.3.1.2. Studiul curentului Corona.....	118
5.3.1.3. Studiul sunetului Corona.....	126
5.3.2. Studiul descărcării Corona la înaltă frecvență.....	131
5.3.2.1. Studiul curentului Corona.....	131
5.3.2.2. Studiul sunetului Corona.....	135
5.4. Posibilități de comandă ale electrofiltrelor cu plăci.....	137
5.4.1. Generalități.....	137
5.4.2. Utilizarea microcontrolerului MC68HC05B6 la controlul electrofiltrelor.....	141
5.4.2.1. Generalități.....	141
5.4.2.2. Controlul unui electrofiltru virtual.....	143
5.4.3. Posibilitatea de utilizare a automatului programabil PS-3 la scuturarea câmpurilor unui electrofiltru industrial.....	154
5.5. Concluzii.....	156
6. Concluzii generale și contribuții.....	160
6.1. Concluzii generale.....	160
6.2. Recomandări privind îmbunătățirea sub aspect energetic și ecologic a funcționării electrofiltrelor cu plăci de la S.C. Electrocentrale Deva S.A.....	164
6.3. Contribuții.....	165
Anexa 1.....	167
Anexa 2.....	168
Anexa 3.....	170
Anexa 4.....	177
Bibliografie.....	178