

**PROGRAMUL 4 "PARTENERIATE IN DOMENIILE
PRIORITARE" 2007-2013**

SECTIUNEA 1

**RAPORTUL STIINTIFIC SI TEHNIC
(RST)**

ETAPA DE EXECUTIE NR. I

CU TITLUL "Studiul transferului de caldura prin termoizolatii multistrat , a metodelor de racire criogenice si simularea computerizata a circuitelor electronice de masura"

- RST - Raport stiintific si tehnic in extenso***
- Proces verbal de avizare interna**
- Procese verbale de receptie a lucrarilor de la parteneri**
- RFA - Raport final de activitate (numai pentru etapa finala)**

* pentru Programul 4 "Parteneriate in domeniile prioritare" se va utiliza modelul din Anexa 1

Cod: PO-04-Ed2-R0-F5

PRECIZARI PRIVIND STRUCTURA RAPORTULUI STIINTIFIC SI TEHNIC

Cuprinde:

1. Raportul Stiintific si Tehnic (RST) in extenso

Se va prezenta conform urmatoarei structuri:

- o cuprins;

Activitatea 1.1 Analiza pierderilor de caldura si a metodelor de reducere a acestora

1.1.1. Campul electromagnetic intr-o cavitate de cilindru gol cu pereti conductori

1.1.2 Inel cilindric gol

1.1.3 Concluzii

Bibliografie

Activitatea 1.2 Proiectarea sistemului de senzori pentru incinta izolatoare, pentru masurarea distributiei radiale a temperaturii

1.2.1. Prezentare generală a sistemului de masurare a temperaturii in incinta izolatoare

1.2.2 Caracteristicile convertorului analog-numeric

1.2.3 Semnalele de intrare

1.2.4. Functionarea ADC

1.2.5 Startul unei conversii

1.2.5 Startul unei conversii

1.2.6. Funcția de reducere a zgomotului.

1.2.7 Registrele asociate convertorului analog numeric

1.2.8 Registrele de date al ADC – ADCL si ADCH

1.2.9. Tehnici de reducere a zgomotului ADC

1.2.10 Concluzii

Bibliografie

Activitatea 1.3 Analiza transferului de caldura prin conductie in suportii vasului de heliu

3.1.Generalitati

3.2. Transferul de caldura in baia de sustinere cu profil variabil in conditii criogenice

3.3. Consideratii privind profilul barelor de sustinere in conditii criogenice

3.4. Rezultate numerice

3.5. Concluzii

Bibliografie

o Obiectivele generale;

1. Realizarea unei instalatii experimentale pentru studiul transferului de caldura prin diverse sisteme de izolare la sediul partenerului P1, care dispune de facilitati de profil, inclusiv He lichid, avand consecintele :

- Crearea posibilitatii de a obtine date fizice in domeniul conductiei termice a materialelor in conditii criogenice;
- Crearea posibilitatii elaborarii de tehnologii inovatoare, performante si reproductibile;

2. Realizarea de componente ale sistemului de izolare pentru masuratori prin tehnici originale pe etapele intermediare ale unui ciclu complet de atingere a echilibrului termic, avand consecintele:

- Posibilitatea studierii comportarii diferite a elementelor izolatiei si identificarii portiunilor si regimurilor cu implicatii pozitive/negative asupra performantelor ansamblului;
- Publicarea de articole cu descrierea solutiilor si datelor originale obtinute in noul context;

3. Elaborarea de modele fizice si matematice originale pentru procesele care implicate in bilantul termic in conditii criogenice, confruntarea acestora cu datele experimentale obtinute si rafinarea modelelor pana la consistenta si clarificarea aspectelor de interes, avand consecintele:

- Posibilitatea restrangerii ariei de conditii experimentale prin anticiparea solutiilor optime;
- Publicarea de articole si prezentarea de comunicari la conferinte nationale si internationale, cu descrierea modelelor originale elaborate si verificate;

4. Elaborarea unei tehnologii optimizate de izolare in conditii criogenice, avand consecintele:

- Avantaje economice ale potentialilor beneficiari din industrie;
- Realizarea unor componente ale izolatiilor criogenice folosind cele mai adecvate materiale

5. Posibilitatea de transfer tehnologic catre producatori industriali, in primul rand pentru aplicatii la instalatiile de detritiere a apei grele utilizate in reactoarele de tip CANDU.
6. Efectuarea de cercetari stiintifice de excelenta, cu aplicabilitate in tehnologia realizarii magnetilor supraconductori ai instalatiilor de fuziune, care permit amplificarea colaborarii internationale realizata prin acordul pe patru ani intrat in vigoare in 2007 intre universitatea la care activeaza directorul de proiect si inca patru membri ai echipei, cu Universite Montpellier II si Oxford Brookes University pentru activitati in cadrul temelor stiintifice oficiale ale ITER, incadrabile in directia de cercetare « Fusion Energy research » a Euratom si FP7.

o **Obiectivele etapei de executie;**

Obiectivul general al etapei de executie I il constituie studiul transferului de caldura prin termoizolatii multistrat, a metodelor de racire criogenice si simularea computerizata a circuitelor electronice de masura. Acest obiectiv a implicat realizarea urmatoarelor activitati:

- Analiza pierderilor de caldura si al metodelor de reducere a acestora
- Proiectarea sistemului de senzori pentru incinta izolatoare, pentru masurarea distributiei radiale a temperaturii
- Elaborarea modelului pentru descrierea procesului de transmitere prin conductie a caldurii

o **Rezumatul etapei**

In aceasta etapa s-a urmarit determinarea conditiilor optime pentru realizarea izolarii termice pasive de tip multistrat, in domeniul temperaturilor foarte joase. Aplicatiile directe vizate sunt in domeniul criogeniei, in constructia incintelor cu heliu lichid.

Sistemul de izolare este de tip izolator multistrat, in geometrie cilindrica, cu un numar optim de straturi compuse din folii neconductoare si de emisivitate mica, concentrice, separate prin incinte in care se realizeaza un vid inaintat (sau cu material de foarte mica conductivitate) si fixate prin intermediul unor elemente de spatiere din materiale cu proprietati termice speciale.

Pentru izolarea termica a incintei cu heliu lichid, este necesar sa se asigure un scut termic fata de sursele de caldura externe, pe de o parte, si sa se reduca cat mai mult posibil fluxul de caldura in interiorul criostatului catre incinta centrala. In acest scop, sunt analizate si modelate matematic doua mecanisme fizice care contribuie la transferul de caldura catre incinta centrala a criostatului: radiatia termica a foliilor conductoare si conductia termica a elementelor de spatiere solide dintre acestea.

Studiile experimentale sistematice sunt dificile in conditii criogenice, deoarece conductibilitatea termica a diverselor materiale depinde puternic si intr-un mod propriu de temperatura, astfel ca fiecare experiment trebuie sa desfasoare in conditii cat mai

apropiate de cele reale, implicand existenta incintei cu heliu lichid si a tuturor instalatiilor aferente. In aceste conditii se impune in prealabil un studiu teoretic foarte riguros al mecanismelor de transmisie a caldurii in sisteme criogenice, astfel ca sa se poareasca realizarea experimentală de la parametri cat mai apropiati de cei optimi.

Nivelul de izolare depinde de o serie de parametri cum ar fi: natura materialelor folosite, numarul si pozitionarea straturilor izolatoare, densitatea lor, nivelul de vid si densitatea gazului rezidual.

Tratarea exacta a radiatiei termice intre succesiunea de suprafete cilindrice coaxiale , care implica un mare numar de conditii pe frontiera, este o problema dificila, in care gradul de dificultate este sporit de faptul ca marimile de camp ale undei transmise au valori mici fata de cele ale undei reflectate, motiv pentru care aproximatiile sunt pretentioase. Pe de alta parte, chiar daca densitatea de energie a campului electromagnetic este mica, aportul ei la caldura transferata catre incinta criogenica este semnificativ si poate sa provoace cresteri necontrolate ale temperaturii.

Un obiectiv important al etapei I-a constituit modelarea cu buna precizie a densitatii de energie a radiatiei termice in incinta criogenica, precum si a fluxului de energie electromagnetica (a radiatiei termice) prin peretii incintei. Modelul matematic realizat urmareste obtinerea de efecte optime de izolatie considerand diferite conditii, atat liniare cat si neliniare la frontiera.

Alta activitate din cadrul etapei a fost elaborarea unui model pentru descrierea procesului de transmitere prin conductie a caldurii. Pentru a se asigura o acuratete cat mai ridicata, s-a tinut cont de variatia cu temperatura a conductivitatii termice a materialului din care sunt construiti suportii incintei de heliu lichid precum si a rezistentei mecanice a acestora. In aceste conditii s-au obtinut formule originale care descriu fluxul de caldura si distributia de temperatura precum si profilul optim al barelor de sustinere care sa asigure un compromis cat mai favorabil intre pierderile prin conductie si rezistenta mecanica. S-au realizat calcule numerice care au demonstrat o buna rata de convergenta a metodelor numerice folosite pentru calculul complet al caracteristicilor elementelor de sustinere pentru o izolare optima a criostatului de heliu.

De asemenea s-a realizat proiectul sistemului de masurare a temperaturilor in mai multe puncte in care se plaseaza senzorii in sistemului criogenic. S-a optat pentru o varianta cu microcontroler RISC cu convertor analog numeric integrat, multiplexor analogic si interfata de transmitere de date in standard RS 232 catre un calculator pentru centralizarea, memorarea, prelucrarea si afisarea datelor. Din analiza structurii si functionalitatii acestor blocuri ale microcontrolerului s-au stabilit parametrii de functionare adecvati acestei aplicatii si s-a elaborat metodologia de utilizare a sistemului de achizitie de date.

- **Descrierea stiintifica si tehnica, cu punerea in evidenta a rezultatelor etapei si gradul de realizare a obiectivelor;** (se vor indica rezultatele)

Activitatea 1.1 Analiza pierderilor de caldura si a metodelor de reducere a acestora

Pentru izolarea termica a incintei cu heliu lichid, este necesar sa se asigure un scut termic fata de sursele de caldura externe, pe de o parte, si sa se reduca cat mai mult posibil fluxul de caldura in interiorul criostatului catre incinta centrala. In acest scop, sunt analizate si modelate matematic doua mecanisme fizice care contribuie la transferul de caldura catre incinta centrala a criostatului: radiatia termica a foliilor conductoare si conductia termica a elementelor de spatiere solide dintre acestea.

Conductia termica a elementelor de sustinere a vasului de heliu lichid se poate minimiza prin folosirea unor materiale adecvate si cu o sectiune cat mai redusa. Acesta micsoreaza insa rezistenta mecanica a suportilor, in special in conditii criogenice, unde caracteristicile mecanice ale materialelor se inrautatesc drastic. De aceea trebuie efectuate calcule cat mai precise pentru realizarea unui compromis optim intre aceste doua aspecte contradictorii.

Pentru a se minimiza fluxul termic prin radiatie, trebuie luate masuri pentru a se asigura atenuarea in mai multe faze a radiatiei electromagnetice. In acest scop se vor plasa in incinta vidata, intre vasul exterior si cel interior, mai multe straturi reflectorizante. Fiecare dintre acestea va atenua puternic radiatia dar daca sunt in numar mare pot mari transferul de caldura prin conductie. De aceea trebuie efectuate calcule foarte precise pentru a se putea face un bilant corect din punct de vedere cantitativ al celor doua procese si a se determina numarul optim de straturi care asigura transferul minim de caldura.

Tratarea exacta a radiatiei termice intre succesiunea de suprafete cilindrice coaxiale, care implica un mare numar de conditii pe frontiera, este o problema dificila, in care gradul de dificultate este sporit de faptul ca marimile de camp ale undei transmise au valori mici fata de cele ale undei reflectate, motiv pentru care aproximatiile sunt pretentioase. Pe de alta parte, chiar daca densitatea de energie a campului electromagnetic este mica, aportul ei la caldura transferata catre incinta criogenica este semnificativ si poate sa provoace crestere necontrolate ale temperaturii.

Un obiectiv important al etapei l-a constituit modelarea cu buna precizie a densitatii de energie a radiatiei termice in incinta criogenica, precum si a fluxului de energie electromagnetica (a radiatiei termice) prin peretii incintei. Modelul matematic realizat urmareste obtinerea de efecte optime de izolatie considerand diferite conditii, atat liniare cat si neliniare la frontiera

In cadrul acestei activitati se realizeaza o analiza riguroasa care va permite elaborarea de coduri simbolice si numerice care sa permita evaluarea precisa a radiatiei termice. Se considera cazul campului electromagnetic in sisteme cu simetrie axiala, un caz de real interes in criogenie.

1.1.1 Campul electromagnetic intr-o cavitate de cilindru gol cu pereti conductori

Se considera un camp electromagnetic in interiorul unei cavitati a unui cilindru gol cu pereti conductori si cu spectrul frecventelor de rezonanta asociate diferitelor moduri ale campului.

Se considera o dependenta temporala monocromatica $e^{i\omega t}$ a campului. Axa de simetrie se alege ca axa z a sistemului de coordonate. Cu aceasta alegere, campul electric se descompune in doua componente ortogonale

$$\vec{E} = \vec{e}_z E_z + \vec{E}_\perp \quad (1.1)$$

Peretii cavitatii sunt descrisi de ecuatiile $\rho = b$, $z = 0$ si $z = l$ (Fig. 1)

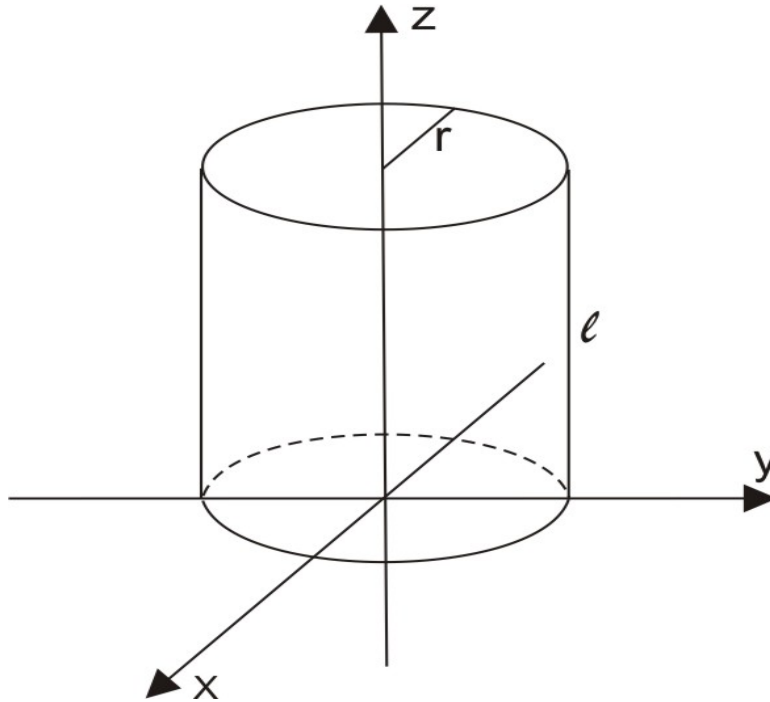


Fig. 1.1 Parametrii geometrici ai sistemului

Componenta tangentiala a campului se anuleaza pe peretii conductori, adica $E_z = E_\phi = 0$ pe suprafata cilindrului $\rho = b$ si $E_\rho = E_\phi = 0$ pentru $z = 0$ si $z = l$. In cazul unui camp armonic cu frecventa ω , in interiorul cavitatii campul satisface ecuatia de unda

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \vec{E} = 0$$

sau, in cazul unui camp armonic de frecventa ω , ecuatia devine

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{c^2} \right) \vec{E} = 0$$

Componenta axiala a partii spatiale a campului electric satisface aceeasi ecuatie ca si partea transversala $\vec{E} : (E_\rho, E_\varphi)$. In coordonate cilindrice ecuatie se scrie sub forma

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{c^2} \right) E_z(\rho, \varphi, z) = 0 \quad (1.2)$$

Ecuatie poate fi scrisa in coordonate cilindrice sub forma

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \right) E_z = 0 \quad (1.3)$$

Ecuatie **Error! Reference source not found.** se poate rezolva prin metoda separarii variabilelor: $E_z(\rho, \varphi, z) = R(\rho)\Phi(\varphi)Z(z)$

Astfel, ecuatie de mai sus devine

$$\frac{1}{R} \left(\frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dR}{d\rho} \right) + \frac{1}{\rho^2 \Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} = 0$$

sau

$$\frac{1}{R} \left(\frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dR}{d\rho} \right) + \frac{1}{\rho^2 \Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} + \frac{\omega^2}{c^2} = -\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = k^2 \quad (1.4)$$

Reflexia pe baza de sus $z=l$ si, respectiv, pe cea de jos $z=0$ implica o dependenta corespunzatoare de z pentru undele stationare. Astfel, in ec. (1.4) constanta $k^2 \geq 0$ iar solutia $Z(z)$ este o combinatie liniara de $\sin kz$ si $\cos kz$ care trebuie sa indeplineasca conditiile pe frontiera. De asemenea, $\Phi(\varphi)$ trebuie sa fie o functie periodica cu perioada 2π (functia Φ nu poate sa fie o functie multiforma). Din conditia de periodicitate rezulta $\Phi(\varphi) =$

Unde m ia valori intregi, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Ecuatie radiala devine

$$\frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dR}{d\rho} + \left(\gamma^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right) R = 0 \quad (1.5)$$

$$\text{unde } \gamma^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - k^2$$

Ecuatie 1.5 este ecuatie Bessel de ordinul $m = \text{intreg}$ iar solutia particulara este o combinatie lineara de functiile Bessel si Neumann de ordinul m , $J_m(\gamma\rho)$ si $N_m(\gamma\rho)$. Daca se are in vedere ca solutia trebuie sa fie finita pentru orice valoare a variabilei ρ , inclusiv pentru $\rho = 0$, avand in vedere comportarea functiilor Bessel si Neumann in vecinatatea originii

$$J_m(x) \rightarrow \frac{1}{\Gamma(m+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^m$$

Respectiv

$$N_m(x) \rightarrow -\frac{\Gamma(m)}{\pi} \left(\frac{2}{x}\right)^m$$

Pentru $m \geq 1$ si

$$N_0(x) \rightarrow \frac{2}{\pi} \left[\ln\left(\frac{x}{2}\right) + 0.5772\dots \right]$$

Se constata ca numai solutia $J_m(\gamma\rho)$ este acceptabila.

In cazul modurilor transversale magnetice (TM), $H_z = 0$ in toate punctele cavitatii, in timp ce componentele transversale ale intensitatii campului electric si ale inductiei magnetice sunt

$$\vec{E}_\perp = \frac{1}{\gamma} \nabla_\perp \frac{\partial E_z}{\partial z} \quad (1.6)$$

respectiv,

$$\vec{B}_\perp = \frac{i\omega}{c^2 \gamma^2} \vec{e}_z \times \nabla_\perp E_z \quad (1.7)$$

unde $\nabla_\perp : \left(\frac{\partial}{\partial \rho}, \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi}\right)$ este operatorul Hamilton in coordonate polare. Prin urmare,

solutia particulara E_z este de forma

$$E_z(\rho, \varphi, z) = E^0 J_m(\gamma\rho) e^{\pm im\varphi} \cos\left(p\pi \frac{z}{l}\right) \text{ with } p = 0, 1, 2, \dots \quad (1.8)$$

astfel incat \vec{E}_\perp sa satisfaca conditiile pe frontiera pentru $z = 0$ si $z = l$. De asemenea, conditia pe frontiera $E_z = 0$ pentru $\rho = b$ cere ca argumentul γb sa fie unul din zerourile functiei Bessel J_m . Astfel, γ va avea numai valori discrete

$$\gamma_{mn} = \frac{x_{mn}}{b}$$

Unde x_{mn} este zeroul de ordinul n al lui J_m .

Solutia generala a ecuatiilor (1.8) in interiorul cavitatii care respecta conditiile pe frontiera este o suprapunere de moduri normale si este data de expresia

$$E_z(\rho, \varphi, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} E_{mnp} J_m(x_{mn} \frac{\rho}{b}) e^{\pm im\varphi} \cos\left(p\pi \frac{z}{l}\right) \quad (1.9)$$

Frecvențele de rezonanță ale cavității depind de trei parametri și sunt date, în cazul modurilor TM de expresia (1.10)

$$\omega_{mnp} = c \sqrt{\left(\frac{x_{mn}}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2} \quad (1.10)$$

cu $m = 0, 1, 2, \dots$; $n = 1, 2, \dots$; $p = 0, 1, 2, \dots$

1.1.2 Inel cilindric gol

În acest capitol se consideră câmpul electromagnetic în interiorul unei cavități goale de forma unui inel cilindric cu pereți conductori, cu raza interioară a , raza exterioară b și înălțimea l .

Condițiile pe frontieră pe care câmpul electromagnetic le îndeplinește sunt aceleași ca și în cazul cavității cilindrice, cu excepția faptului că apare o frontieră suplimentară pentru $\rho = a > 0$. Deoarece originea $\rho = 0$ nu mai aparține domeniului de valori ale lui ρ , soluția particulară a ecuației radiale este o combinație liniară de funcțiile Bessel și Neumann:

$$R_m(\rho) = AJ_m(\gamma\rho) + BN_m(\gamma\rho) \quad (2.1)$$

Deoarece câmpul satisface condiții pe frontieră omogenă, atât pentru $\rho = a$ cât și pentru $\rho = b$, funcția radială dată de ecuația 2.1 este de forma

$$R_m(\rho) = A \left[J_m(\gamma_{mn}\rho) - \frac{J_m(\gamma_{mn}a)}{N_m(\gamma_{mn}a)} N_m(\gamma_{mn}\rho) \right] \quad (2.2)$$

unde γ_{mn} , $n = 1, 2, 3, \dots$ sunt soluțiile ecuației

$$J_m(\gamma_{mn}b)N_m(\gamma_{mn}a) - J_m(\gamma_{mn}a)N_m(\gamma_{mn}b) = 0$$

Valorile lor vor fi determinate prin metode numerice adecvate.

În cazul modurilor TM soluția generală pentru componenta E_z este combinația liniară

$$E_z(\rho, \varphi, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} E_{mnp} \left[J_m(\gamma_{mn}\rho) - \frac{J_m(\gamma_{mn}a)}{N_m(\gamma_{mn}a)} N_m(\gamma_{mn}\rho) \right] e^{\pm im\varphi} \cos\left(p\pi \frac{z}{l}\right) \quad (2.3)$$

Iar frecventele de rezonanta sunt

$$\omega_{mnp} = c \sqrt{(\gamma_{mn})^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2} \quad (2.4)$$

cu $m = 0, 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots; p = 0, 1, 2, \dots$.

1.1.3. Concluzii

Formulele prezentate permit un calcul exact al campului electric in interiorul cavitatilor axiale cu pereti conductori care pot fi utilizate intr-un calcul riguros al fluxului radiatiei termice printr-un astfel de sistem. Pentru sisteme criogenice, calculele numerice necesita astfel de ecuatii exacte, avand in vedere numarul mare de izolatori termici coaxiali care trebuie intervin in instalatii si orice erori se vor propaga si vor fi amplificate recursiv. Unica posibilitate de a minimaliza erorile globale este de a le mentine cat mai mici in orice etapa a calculului, aceasta implica de la inceput solutii analitice exacte. Din acest motiv, calculul numeric al functiilor speciale care intervin trebuie condus cu precautie, ele implicand un effort de calcul marit daca se doreste descrierea cu precizie a ratei transferului de caldura prin radiatie in instalatiile criogenice.

Appendix

Functiile Bessel $J_\nu(x)$ sunt solutiile ecuatiei Bessel

$$\left[\frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d}{dx} + \left(1 - \frac{\nu^2}{x^2}\right) \right] R(x) = 0 \quad (A.1)$$

Care poate fi dezvoltata in serie

$$J_\nu(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^\nu \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j! \Gamma(j + \nu + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2j} \quad (A.2)$$

si

$$J_{-\nu}(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^{-\nu} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j! \Gamma(j - \nu + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2j}$$

Aceste functii Bessel satisfac relatii de ortogonalitate pe intervalul $p \in [0, a]$

$$\int_0^a \rho J_\nu\left(x_{\nu n} \frac{\rho}{a}\right) J_\nu\left(x_{\nu k} \frac{\rho}{a}\right) d\rho = \frac{a^2}{2} [J_{\nu+1}(x_{\nu n})]^2 \delta_{nk} \quad (A.3)$$

Solutiile A.2 si A.3 sunt liniar independente pentru orice ν cu exceptia cazului in care ν este un intreg, $\nu = m = 0, 1, 2, \dots$, cand exista relatia

$$J_{-m}(x) = (-1)^m J_m(x)$$

In acest caz ce-a de-a doua solutie independenta a ecuatiei Bessel este functia Neumann

$$N_\nu(x) = \frac{J_\nu(x) \cos \nu\pi - J_{-\nu}(x)}{\sin \nu\pi} \quad (\text{A.4})$$

Functiile Neumann satisfac relatiile de recurenta

$$H_\nu^{(1)}(x) = J_\nu(x) + iN_\nu(x)$$

si

$$H_\nu^{(2)}(x) = J_\nu(x) - iN_\nu(x)$$

Functiile Hankel $H_\nu(x)$ satisfac si ele relatiile

$$\Omega_{\nu-1}(x) + \Omega_{\nu+1}(x) = \frac{2\nu}{x} \Omega_\nu(x) \quad (\text{A.5})$$

si

$$\Omega_{\nu-1}(x) - \Omega_{\nu+1}(x) = 2 \frac{d\Omega_\nu(x)}{dx} \quad (\text{A.6})$$

Bibliografie

- [1] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 3-rd ed. John Wiley and Sons, 1999 chapters 3 and 8.
- [2] G.B. Arfken, H.J. Weber, Mathematical Methods for Physicists , 6-th ed. Elsevier Inc. 2005, chapter 11.
- [3] L. D. Landau, E. M. Lifshitz and L. P. Pitaevskii, Electrodynamics of Continuous Media”, Elsevier Inc. (2nd edition, 1984).

Activitatea 1.2 Proiectarea sistemului de senzori pentru incinta izolatoare, pentru masurarea distributiei radiale a temperaturii

1.2.1. Prezentare generală a sistemului de masurare a temperaturii in incinta izolatoare

Sistemul de senzori trebuie sa asigure citirea temperaturilor de-a lungul barei de sustinere a criostatului cu heliu lichid, pentru a se putea testa eficienta izolatiilor multistrat pentru transmiterea prin radiatie a caldurii de la exterior catre interior. Se vor folosi senzori integrati care furnizeaza o tensiune crescatoare cu temperatura si care se vor cupla la intrarile unui multiplexor analogic cuplat la un convertor analog numeric.

Toate aceste blocuri pot fi implementate prin utilizarea unui sistem cu microcontrolerul ATmega 8535 care include pe cip un convertor analog numeric (ADC) pentru cuplarea cu blocuri analogice si un multiplexor cu 8 intrari. Astfel se dispune de un numar corespunzator de canale, cu o precizie si viteza de conversie absolut suficiente (aprox. 15000 masuratori pe secunda, cu erori de 0.1 %).

Utilizarea unui microcontroler asigura o serie de avantaje printre care enumeram:

- Sistemul este compact si foarte fiabil
- Zgomotele de inductie din exterior sunt micorate datorita lungimii reduse a traseelor
- Se poate utiliza interfata seriala in standard RS 232 pentru comunicatia cu un calculator pentru memorarea, prelucrarea si afisarea datelor
- Se pot schimba prin program, fara interventii hardware anumite caracteristici ale sistemului de achizitie de date

S-a ales un microcontroler din familia ATMEL AVR de tip RISC cu magistrala de date de 8 biti, deoarece aceasta familie are una dintre cele mai avansate arhitecturi existente la ora actuala, dispune de instrumente de dezvoltare software foarte eficiente si are incluse aproape toate blocurile necesare sistemului de achizitie de date.

1.2.2 Caracteristicile convertorului analog-numeric

Principalele caracteristici ale ADC din microcontrolerul ATmega 8535 sunt urmatoarele:

- Rezoluție 10 biti;
- Acuratețe ± 2 LSB;
- Neliniaritate integrală 0,5 LSB
- Timp de conversie 65 - 260 μ s;
- Viteză de până la 15 kSPS (mii de eşantioane pe secundă)
- 8 intrari analogice multiplexate de mod comun
- 7 intrari analogice diferentiale
- 2 intrari diferentiale cu amplificare de 10x si 200x (la anumite tipuri)
- Ajustare la zero a rezultatului conversiei (optional)
- Domeniu al tensiunii de intrare intre 0 si V_{cc}

- Sursa de referinta selectabila de 2,56V
- Mod Free Run sau Single Conversion
- Start conversie de la sursele de intrerupere
- Întrerupere la terminarea conversiei
- Reducere de zgomot prin intrare în modul Sleep.

Convertorul analog numeric este cu aproximații succesive, de 10 biți. Intrarea sa este cuplată la un multiplexor analogic de 8 canale, care permite ca fiecare pin al portului A să poată fi utilizat ca intrare pentru ADC. Este prevăzut de asemenea un circuit Sample and Hold (esantionare și mentinere) care asigură ca tensiunea de intrare în ADC este menținută constantă pe durata unei conversii. Schema bloc a convertorului analog numeric este prezentată în figura 2.1

Pe pinul AREF poate fi aplicată o tensiune de referință externă, sau se poate folosi tensiunea de referință internă de 2,56V.

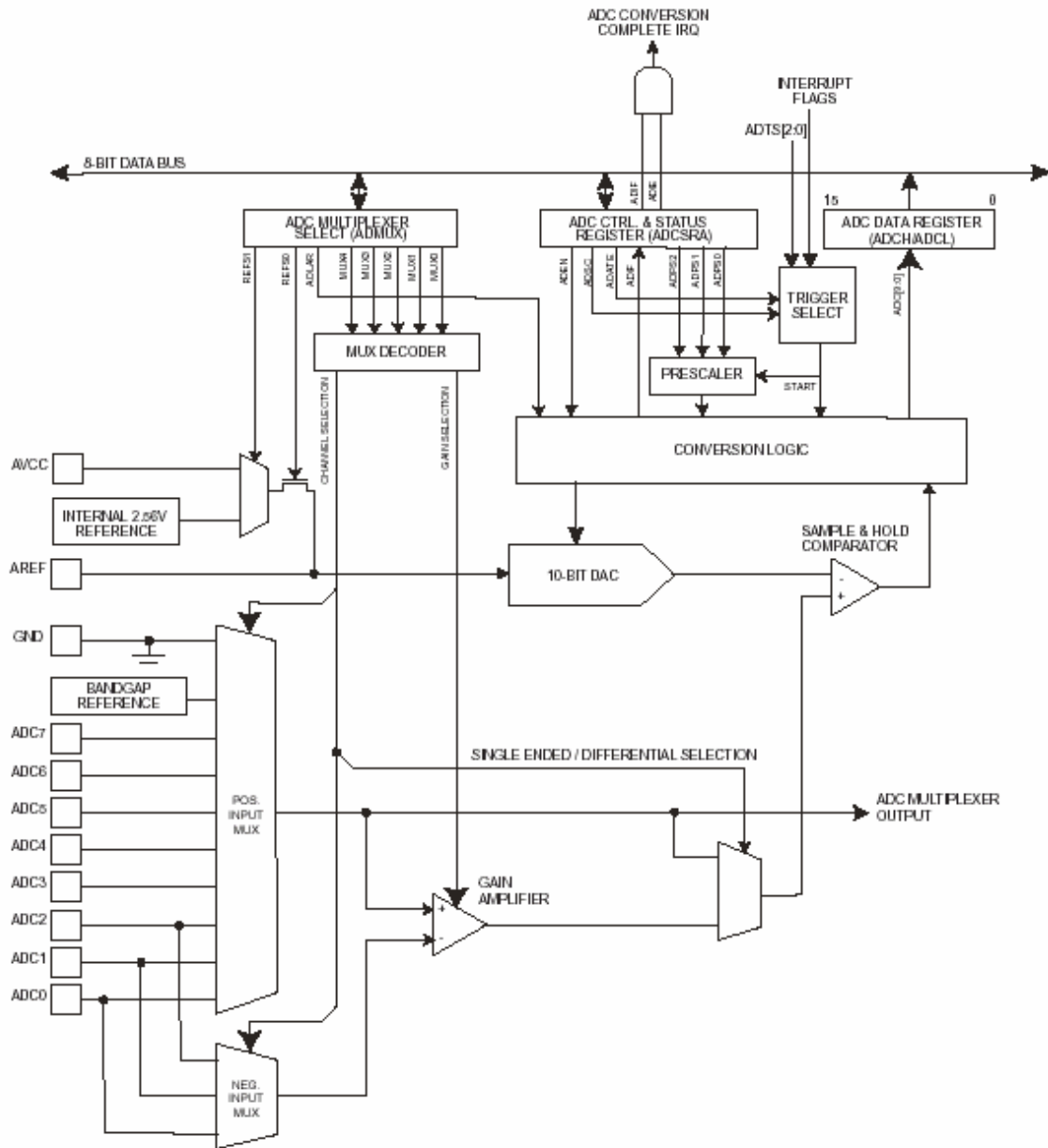


Figura 2.1 –Schema bloc a convertorului analog numeric

1.2.3 Semnalele de intrare

Pot fi folosite semnale de mod comun (tensiuni raportate la nivelul GND) si semnale in mod diferential. In acest ultim caz, rezultatul conversiei este proportional cu diferenta de tensiune intre oricare dintre cele 7b intrari distincte si a opta care este comuna.

Sursa de referinta poate fi o tensiune externa, poate fi AVCC sau cea interna. Aceasta se poate cupla si la pinul AREF, pentru a putea fi decuplata in exterior cu un condensator, pentru micșorarea zgomotului.

În modul diferențial se pot cupla și amplificatoarele interne de 20 dB (10x) sau 46 dB (200x). În aceste cazuri se poate conta doar pe o precizie de 8, respective 7 biți.

Pentru o conversie de mod comun, rezultatul este un număr pozitiv de 10 biți cuprins între 0 și 1023d (0x3FF), dat de ecuația:

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}}$$

unde V_{in} este tensiunea de intrare iar V_{ref} este tensiunea de referință selectată.

Pentru o conversie de mod diferențial, rezultatul este un număr de 10 biți reprezentat în complement față de 2, cuprins între -512d și 511d (0x200 până la 0x1FF), dat de ecuația:

$$ADC = \frac{(V_{POS} - V_{NEG}) \cdot GAIN \cdot 512}{V_{REF}}$$

unde V_{POS} este tensiunea pe intrarea neînversoare, V_{NEG} este tensiunea pe intrarea inversoare, $GAIN$ este amplificarea, iar V_{ref} este tensiunea de referință selectată. Rezultatul fiind în complement față de 2, bitul cel mai semnificativ indică semnul: negativ dacă acesta este 1 și pozitiv dacă acesta este 0.

1.2.4. Funcționarea ADC

Convertorul analog numeric poate funcționa în două moduri: "Single Conversion" (o singură conversie) și "Free Run" (Conversie continuă). În modul Single Conversion, fiecare conversie trebuie să fie inițiată de utilizator. În modul Free Running convertorul analog numeric eșantionează semnalul și reactualizează registrul de date al ADC în mod continuu. Selecția unuia din aceste două moduri se face prin bitul ADFR din registrul ADCSR.

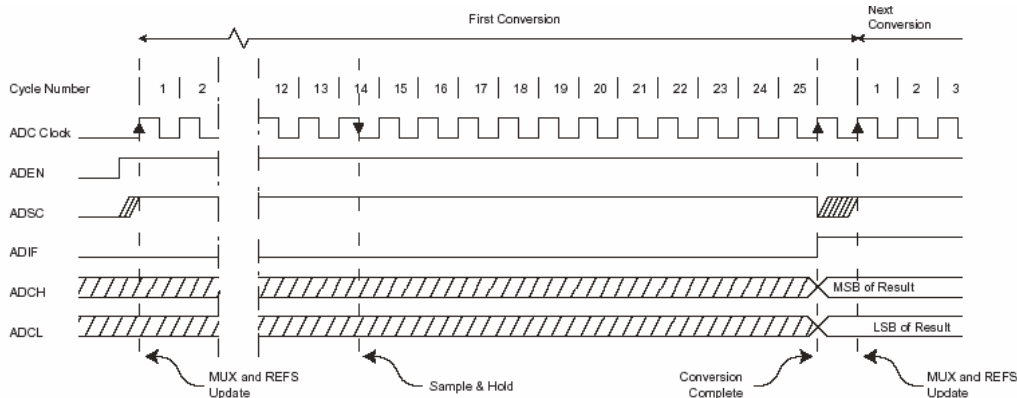


Figura 2.2 – Ciclul unei prime conversii în mod Single Conversion

Funcționarea ADC este validată prin scrierea în 1 logic a bitului de validare ADEN din registrul ADCSR. Prima conversie care este pornită după validarea ADC va fi precedată de o conversie de inițializare ("dummy conversion"), al cărui rezultat nu va fi introdus în registrul de date (figura 2.2). Singura diferență pentru utilizator va fi că această conversie va avea un timp mai lung cu 12 impulsuri de ceas decât o conversie normală.

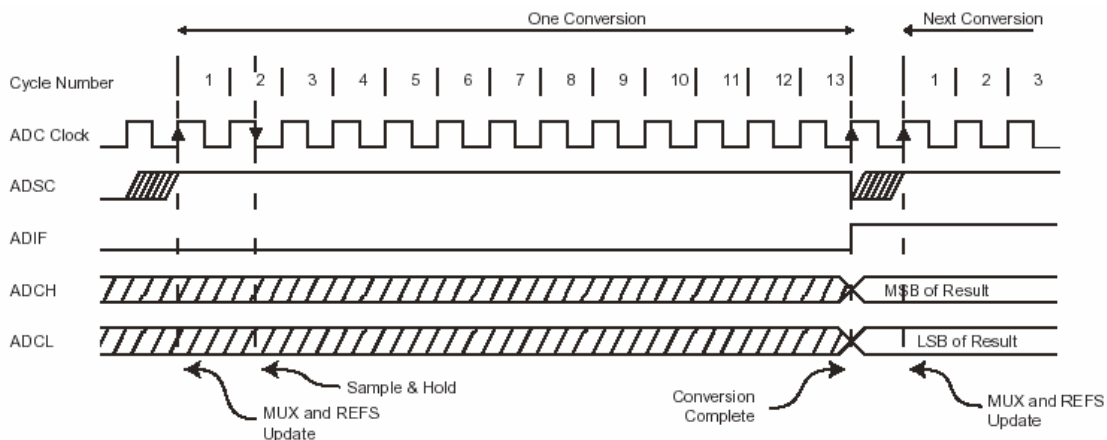


Figura 2.3 - Ciclul de conversie normală în mod Single Conversion

Deoarece convertorul generează un rezultat pe 10 biți, trebuie citite două registre de date, ADCL și ADCH, pentru a obține rezultatul conversiei. S-au prevăzut circuite logice în mod special pentru a asigura că în cele două registre se află rezultatul aceleiași conversii atunci când sunt citite. Acestea funcționează în felul următor:

Când se citesc datele, se citește mai întâi ADCL. Din momentul în care s-a citit ADCL accesul ADC la registrele de date este blocat. Aceasta înseamnă că dacă s-a citit ADCL și o nouă conversie se termină înainte de a se citi ADCH, nici unul dintre aceste registre nu este reactualizat și rezultatul noii conversii este pierdut. Atunci când este citit ADCH, se permite din nou accesul ADC la registrele ADCL și ADCH.

Rezultatul este aliniat implicit la dreapta, cei mai puțin semnificativi 8 biți fiind în ADCL. Rezultatul se poate alinia însă și la stânga, prin setarea bitului ADLAR din registrul ADMUX. În acest caz, cei mai semnificativi 8 biți ai rezultatului se află în ADCH, și dacă este suficientă o precizie de 8 biți, se poate citi doar acest registru.

ADC are propria sa întrerupere, ADIF, care poate fi declanșată atunci când se termină o conversie. Atunci când accesul ADC la registrele de date este blocat, între citirea ADCL și ADCH, întreruperea se va declanșa totuși, chiar dacă rezultatul se pierde.

1.2.5 Startul unei conversii

O conversie este pornită prin scrierea unui 1 logic în bitul de start conversie, ADSC. Acest bit va sta în 1 logic pe toată perioada conversiei și va fi trecut în 0 logic prin hardware atunci când conversia s-a terminat (figurile 10.3 și 10.4).

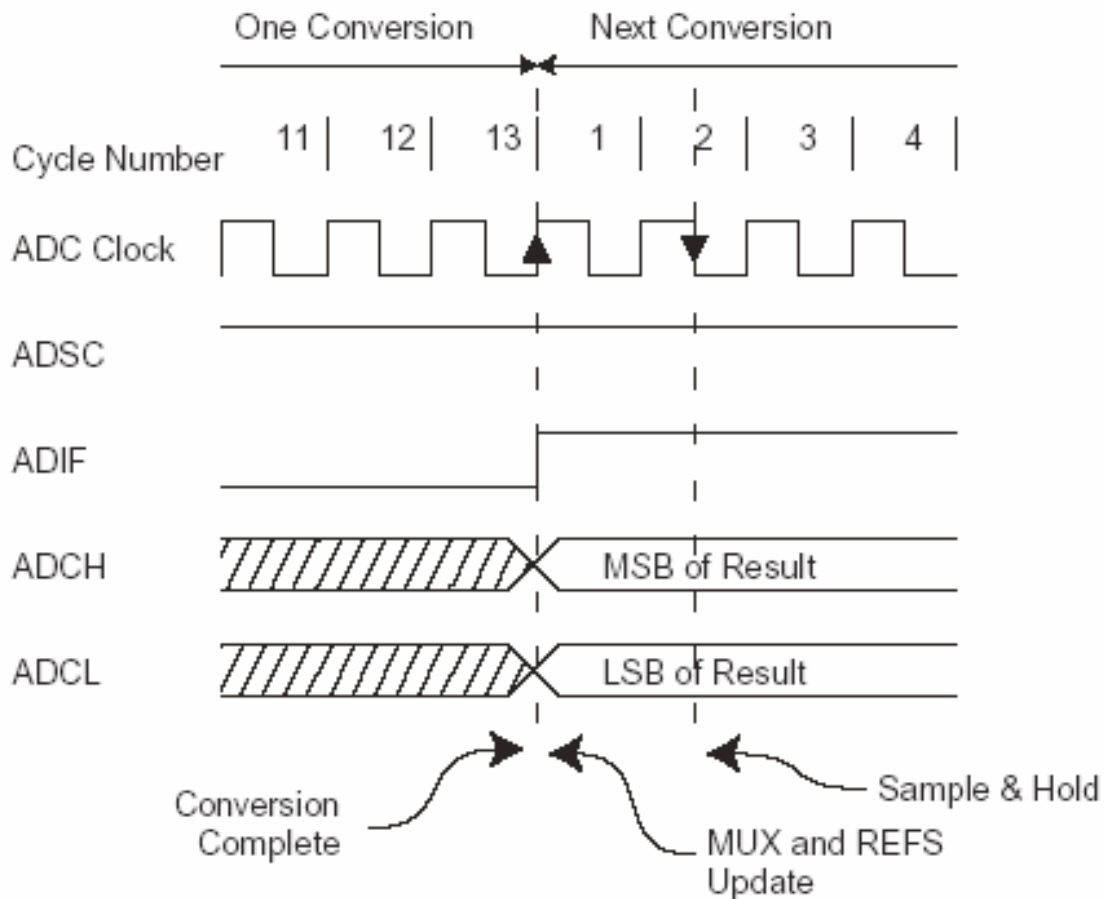


Figura 2.4 - Ciclu de conversie normală în modul Free Run

Dacă se selectează un alt canal de intrare în timpul unei conversii, ADC termină mai întâi conversia curentă înainte de a schimba canalul.

Conversia poate fi de asemenea declanșată automat și de alte surse, prin setarea bitului de validare a autodeclanșării, ADSC din registrul ADCSRA (figura 2.4a). Sursa de declanșare este selectată de bitii ADTS din registrul de funcții speciale de intrar/iesire SFIO (vezi descrierea bitilor asociați ADC din registrul SFIO pentru lista acestor surse). Atunci când apare un front crescător de la sursa de declanșare selectată, prescalerul ADC este sters și începe o nouă conversie. În felul acesta se pot declanșa conversii la intervale fixe. Dacă sursa de declanșare rămâne în 1 după conversie, sau dacă un nou front pozitiv apare în timpul conversiei, nu se va declanșa o nouă conversie. Conversia este declanșată de flagul de întrerupere specificat, chiar dacă întreruperea respectivă nu este activată, și chiar dacă întreruperile globale sunt dezactivate. Este deci posibil să se declanșeze conversii chiar fără să se declanșeze întreruperi. Totuși, flagul de întrerupere selectat trebuie sters pentru a permite declanșarea unei noi conversii la următorul

eveniment care cere intrerupere. Se poate utiliza si propriul flag de intrerupere, ADIF, pentru declansarea unei conversii. In acest caz imediat dupa terminarea unei conversii se declanseaza una noua, si deci ADC va functiona in modul Free Running (vezi si bitii asociati ADC din SFIOR). Prima conversie va porni prin setarea bitului ADSC din ADSRA, si conversiile vor continua indiferent daca flagul ADIF va fi sters sau nu.

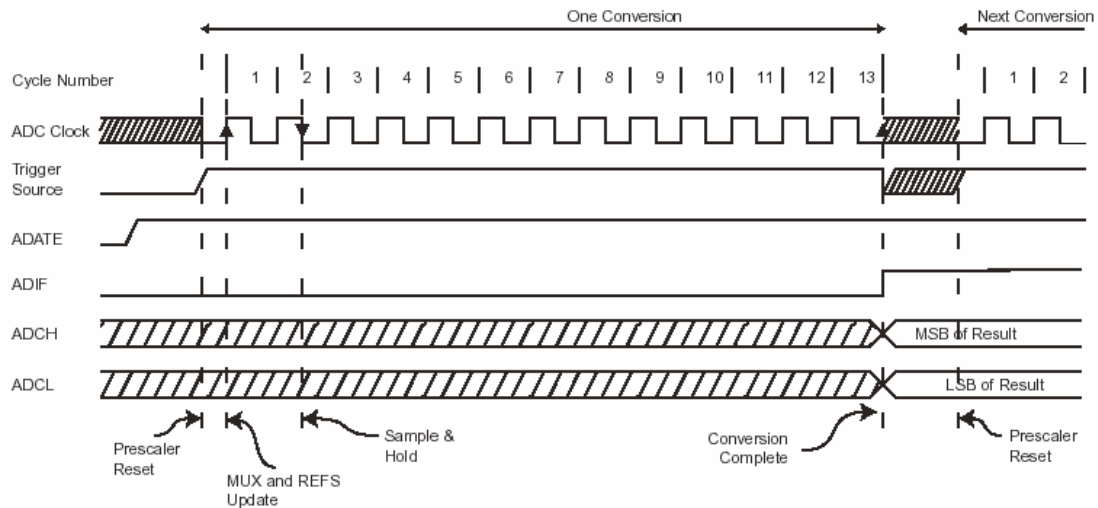


Figura 2.4a - Ciclu de conversie normală în modul autodeclansat

Convertorul analog-numeric are un prescaler, care divizează ceasul sistemului până la o frecvență de ceas acceptabilă pentru ADC, în domeniul 50-200 KHz (figura 2.5). Aplicarea unei frecvențe de intrare mai mari conduce la o acuratețe mai scăzută, și la viteze de conversie mai mari.

Biții ADPS0-ADPS2 din registrul ADCSR sunt folosiți pentru a selecta o frecvență convenabilă pentru ADC, pornind de la orice cristal de cuarț de minim 100 KHz. Prescalerul funcționează atâta timp cât bitul ADEN este în 1 logic și stă în reset atâta timp cât bitul ADEN este în 0 logic.

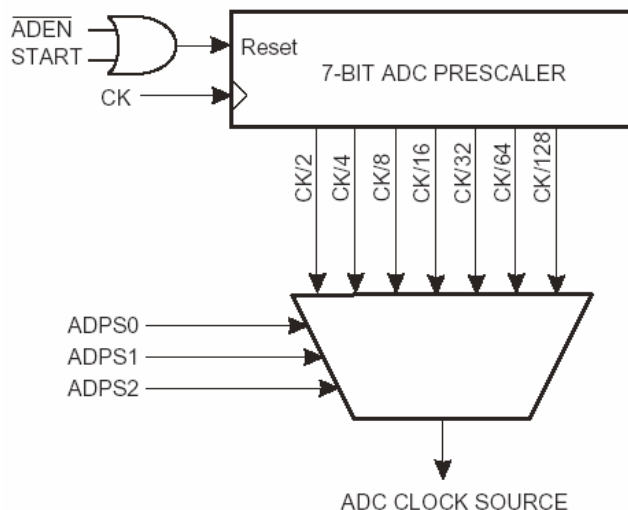


Figura 2.5 – Prescalerul convertorului analog numeric

Atunci când se comandă startul unei conversii prin punerea în 1 logic a bitului ADSC din registrul ADCSR, conversia pornește atunci când apare următorul front crescător al ceasului ADC. Eșantionarea și memorarea durează 1,5 cicluri de ceas al ADC după startul conversiei. Rezultatul este disponibil în registrul de rezultat al ADC după 13 cicluri de ceas (cu excepția primei conversii, care va dura 25 de cicluri, după cum s-a arătat). Când conversia se termină, rezultatul este introdus în registrele de date, flagul ADIF este setat iar dacă modul este Single Conversion, simultan este sters și bitul ADSC. Programul poate apoi seta din nou acest bit și reincepe un ciclu de conversie.

În modul cu autodeclansare, între conversii sunt inserate trei perioade suplimentare de ceas sistem pentru sincronizarea circuitelor. În modul Free Running, conversiile se succed fără pauze. Folosind modul Free Running și o frecvență de ceas de 200 KHz se obține cea mai mică perioadă de conversie - 65 μs echivalentă cu o viteză de conversie de 15,4 kSPS. Timpii de conversie sunt prezentați sintetic în tabelul 2.1.

Condițiile de funcționare	Ciclul în care se face eșantionarea	Timp total de conversie (cicluri)
Prima conversie	14,5	25
Conversie normală, mod comun	1,5	13
Conversie autodeclansată	2	13,5
Conversie normală, mod diferențial	1,5/2,5 (în funcție de faza CK_{ADC})	13/14 (în funcție de faza CK_{ADC})

Tabelul 2.1 - Timpii de conversie ai ADC

Modul diferențial pe intrări necesită unele precauții atunci când se folosesc amplificatoarele interne. Astfel, banda de frecvență a acestora este de numai 4 KHz, peste această valoare putând să apară neliniarități, ceea ce recomandă utilizarea unui filtru trece-jos în exterior pentru rejectarea componentelor de frecvențe mai mari din semnalul de intrare. Trebuie ținut totodată seama că stabilizarea amplificatorului după schimbarea canalului diferențial durează 125 μs, ceea ce face ca rezultatul conversiilor în acest interval să fie afectat de erori. De asemenea, dacă se folosește modul cu autodeclansare, este necesar ca între conversii să se dezactiveze ADC, prin punerea în 0 și apoi în 1 a bitului ADEN din registrul ADCSRA.

Schimbarea canalului analogic trebuie făcută de asemenea cu anumite precauții. Trebuie evitată schimbarea canalului la mai puțin de 1 ciclu de ceas după declansarea unei conversii, și atunci când conversiile pot fi declansate de întreruperi (nu se mai poate ști de la ce canal provine rezultatul conversiei curente).

Și comutarea sursei de tensiune de referință necesită timpi interni de stabilizare, astfel ca primele rezultate după schimbare vor fi afectate de erori, recomandându-se ignorarea lor.

1.2.6. Funcția de reducere a zgomotului.

Convertorul analog numeric este prevăzut cu un reducător de zgomot care permite efectuarea unei conversii atunci când procesorul intră în modul idle, micșorând astfel zgomotele datorate funcționării nucleului procesor. Pentru a folosi această facilitate, se procedează în modul următor:

1. Se va avea grijă ca ADC să fie validat și să nu se fie ocupat cu o conversie (trebuie deci să fie selectat modul Single Conversion). Trebuie de asemenea să fie validată întreruperea de sfârșit de conversie.

ADEN=1

ADSC=1

ADIE=1

2. Se va intra în modul Reducere zgomot ADC sau Idle. ADC va începe automat o conversie atunci când nucleul procesor se oprește.

3. Dacă nici o altă întrerupere nu apare înainte ca ADC să termine conversia întreruperea ADC va reporni nucleul procesor și va executa rutina de conversie terminată. Dacă în timpul conversiei apare o altă întrerupere, rutina acesteia va fi executată și apoi va fi executată rutina întreruperii de sfârșit de conversie. Procesorul rămâne activ până la noua instrucțiune sleep.

De menționat că ADC nu se oprește automat când se intră în alte moduri de sleep decât Idle și Reducere zgomot ADC, deci pentru reducerea consumului este necesar să se steargă bitul ADEN. La trezirea din astfel de moduri sleep este recomandat să se oprească și să se repornească ADC pentru a executa cicluri extinse și a se obține un rezultat fără erori.

1.2.7 Registrele asociate convertorului analog numeric

Registrul de selecție al multiplexorului convertorului - ADMUX

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
\$07(\$27)	REFS1	REFS0	ADLAR	MUX4	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0
Citește/Scrie	C/S	C/S	C/S	C/S	C/S	C/S	C/S	C/S
Valoare inițială	0	0	0	0	0	0	0	0

- Bit 7:6- REFS1:0: Selecția tensiunii de referință
Acești biți selectează sursa de tensiune de referință conform tabelului 2.2. Când valoarea lor se schimbă, tensiunea de referință este schimbată doar după ce se termina

conversia in curs. Daca se foloseste o tensiune interna, nu se va cupla nici o tensiune externa pe pinu AREF pentru a nu se produce scurtcircuitarea celor doua surse.

Tabelul 2.2 - Selectia sursei tensiunii de referinta

REFS1	REFS0	Sursa de tensiune de referinta
0	0	AREF, tensiunea de referinta interna decuplata
0	1	AVCC, cu condensator extern pe pinul AREF
1	0	Rezervat
1	1	Tensiunea interna de 2,56V, cu condensator extern pe pinul AREF

- BIT 5 –ADLAR: Alinierea la stanga a rezultatului

Daca acest bit este setat, rezultatul conversiei este aliniat la stanga, cu cel mai semnificativ bit in pozitia din stanga registrului superior, ADDRH. Daca este sters, rezultatul va fi aliniat normal, la dreapta cu cel mai putin semnificativ bit in pozitia din dreapta registrului inferior ADRL. (Vezi si registrele de date ADCL si ADCH). Cand acest bit se schimba, rezultatul conversiei este aliniat corespunzator imediat, indiferent daca exista o conversie in curs.

- Bit 40:0 – MUX4:0 : Biții de selecție a canalului de intrare si amplificarii
Biții MUX4-MUX0 ai acestui registru selecteaza combinatiile de intrari analogice care se conecteaza la intrarile ADC, conform tabelului 2.3.
Cand acesti biti se schimba, efectul apare numai dupa terminarea conversiei aflata in curs.

Tabelul 2.3 – Selectia intrarilor si amplificarii

MUX4:	Intrare de	Intrare diferentiala	Intrare diferentiala	GAIN
0	mod comun	neinversoare	inversoare	
00000	ADC0	N/A		

00001	ADC1			
00010	ADC2			
00011	ADC3			
00100	ADC4			
00101	ADC5			
00110	ADC6			
00111	ADC7			
01000	N/A	ADC0	ADC0	10x
01001		ADC1	ADC0	10x
01010		ADC0	ADC0	200x
01011		ADC1	ADC0	200x
01100		ADC2	ADC2	10x
01101		ADC3	ADC2	10x
01110		ADC2	ADC2	200x
01111		ADC3	ADC2	200x
10000		ADC0	ADC1	1x
10001		ADC1	ADC1	1x
10010		ADC2	ADC1	1x

10011		ADC3	ADC1	1x
10100		ADC4	ADC1	1x
10101		ADC5	ADC1	1x
10110		ADC6	ADC1	1x
10111		ADC7	ADC1	1x
11000		ADC0	ADC2	1x
11001		ADC1	ADC2	1x
11010		ADC2	ADC2	1x
11011		ADC3	ADC2	1x
11100		ADC4	ADC2	1x
11101		ADC5	ADC2	1x
11110	1,22V (V_{BG})	N/A		
11111	0V (GND)			

Cand acesti biti se schimba, efectul apare numai dupa terminarea conversiei aflata in curs.

Registrul A de control și stare al ADC - ADCSRA

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
\$06(\$26)	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0
Citește/ Scrie	C/S	C/S	C/S	C/S	C/S	C/S	C/S	C/S
Valoare	0	0	0	0	0	0	0	0

inițială								
----------	--	--	--	--	--	--	--	--

- Bit 7 - ADEN : activarea ADC.

Punerea în 1 logic a acestui bit activează ADC. Prin punerea în 0 logic, acesta este oprit, chiar dacă în acel moment este în curs de efectuare o conversie.

- Bit 6 – ADSC: Startul unei conversii

În modul Single conversion se va scrie un 1 logic în acest bit pentru a porni o conversie. În modul Free Running, punerea în 1 logic a acestui bit va porni prima conversie. Prima oară când este scris bitul ADSC după ce ADC a fost activat, sau dacă aceste evenimente se petrec simultan, se va efectua mai întâi o conversie de inițializare (“dummy conversion”) și abia după aceea conversiile normale.

ADSC rămâne în 1 pe durata unei conversii și trece în 0 după ce conversia s-a terminat, dar înainte ca rezultatul să fie scris în registrele de date. Aceasta permite ca o nouă conversie să fie inițiată înainte ca prezenta conversie să se termine. Noua conversie va porni astfel imediat ce se termina cea curentă. Când se face conversia de inițializare, bitul ADSC va rămâne în 1 până când se va termina conversia reală care urmează automat.

Punerea în 0 a acestui bit nu are nici un efect.

- Bit 5- ADATE: Selectarea modului cu autodeclansare

Cand acest bit este setat, un front pozitiv generat de sursa selectata de bitii ADTS din registrul SFIOR, va declansa o conversie.

- Bit 4 – ADIF : Flagul de întrerupere al ADC

Acest bit este trecut în 1 logic atunci când se termină o conversie și registrele de date sunt reactualizate. În continuare, dacă bitul ADIE și bitul I din SREG sunt în 1 logic, se va executa o întrerupere de sfârșit de conversie. Când se execută vectorul de întrerupere respectiv, acest bit este trecut automat în 0 logic prin hardware. Ca alternativă acest bit poate fi șters scriind un 1 peste el. Trebuie ținut seama că dacă se execută un ciclu citire-modificare-scriere a registrului ADCSRA, o eventuală întrerupere în așteptare poate fi dezactivată. Acest lucru se poate întâmpla și dacă se folosesc instrucțiunile SBI și CBI cu acest registru.

- Bit 3 – ADIE : Activarea întreruperii ADC

Când acest bit este în 1 logic și bitul I din SREG este tot în 1 logic va putea fi generată o întrerupere de sfârșit de conversie.

- Bit 2..0 – ADPS2-ADPS0 : Biții de selecție pentru prescalerul ADC

Acești biți determină factorul de divizare a frecvenței cristalului și frecvența de intrare a ADC, conform tabelului 2.4

ADPS2	ADPS1	ADPS0	Factor de divizare
0	0	0	2
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	8
1	0	0	16
1	0	1	32

1	1	0	64
1	1	1	128

Tabelul 2.4 – Factorul de divizare al prescalerului ADC

1.2.8 Registrele de date al ADC – ADCL si ADCH

Aceste registre contin rezultatul unei conversii, pe 10 biti. Daca se foloseste modul diferential, rezultatul este un numar negativ sau pozitiv, in reprezentare in complement fata de doi. Cei 10 biti sunt plasati in cele 16 pozitii ale celor doua registre in functie de bitul ADCLAR din registrul ADMUX, ca in tabelele urmatoare:

Registrele de date pentru cazul ADCLAR=0

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8
\$05(\$25)							ADC9	ADC8
\$04(\$24)	ADC7	ADC6	ADC5	ADC4	ADC3	ADC2	ADC1	ADC0
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Citește/	C	C	C	C	C	C	C	C
Scrie	C	C	C	C	C	C	C	C
Valoare inițială	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

Registrele de date pentru cazul ADCLAR=1

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8
\$05(\$25)							ADC9	ADC8
\$04(\$24)	ADC7	ADC6	ADC5	ADC4	ADC3	ADC2	ADC1	ADC0
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Citește/	C	C	C	C	C	C	C	C
Scrie	C	C	C	C	C	C	C	C
Valoare inițială	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

Daca se citeste ADCL, registrele nu vor fi reactualizate pana cand nu se citeste si ADCH. Daca rezultatul este aliniat la stanga si este suficienta o precizie de 8 biti, se poate citi numai ADCH.

- Bit 9:0: Rezultatul conversiei ADC, conform ecuatiilor prezentate anterior.

Registrul de functii speciale de I/O- SFIOR

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
\$30	ADTS2	ADTS1	ADTS0	-	ACME	PUD	PSR2	PSR10
Citeste/ scrie	C/S	C/S	C/S	C	C/S	C/S	C/S	C/S
Valoare inițială	0	0	0	0	0	0	0	0

Acest registru contine urmasorii biti implicati in functionarea comparatorului analogic.

- Bit 7:5 - ADTS2:0 –Sursa de declansare a ADC.
Daca bitul ADATE din ADCSRA este setat, acesti biti selecteaza ce sursa va declansa o conversie. Cand ADATE este sters, acesti biti nu au nici un efect. Conversia este declansata la trecerea din 0 in 1 a flagului selectat, sau daca se comuta de la un flag care era in 0 la un alt flag care era in 1

ADTS2	ADTS1	ADTS0	Sursa de declansare
0	0	0	Mod Free running
0	0	1	Comparator analog
0	1	0	Intreruperea externa 0
0	1	1	T/C0 egalitate la comparatie
1	0	0	T/C0 depasire
1	0	1	T/C1 egalitate la comparatie B
1	1	0	T/C1 depasire
1	1	1	T/C1 eveniment de captura

1.2.9. Tehnici de reducere a zgomotului ADC

Circuitele digitale din interiorul și exteriorul microcontrolerului generează inducții electromagnetice care pot afecta acuratețea măsurătorilor analogice. Dacă acuratelyea conversiei este critică, nivelul de zgomot poate fi redus prin aplicarea următoarelor tehnici:

1. Partea analogică a microcontrolerului și toate componentele analogice ale aplicației trebuie să aibă un plan de masă analogică separat pe placa de circuit imprimat. Acest plan de masă analogic va fi conectat cu cel digital într-un singur punct pe placă.
2. Traseele analogice trebuie să fie cât mai scurte posibil. Trebuie ca aceste trasee analogice să fie plasate deasupra planului de masă analogic și să fie la o distanță cât mai mare față de circuitele care comuta cu frecvență ridicată.
3. Pinul Avcc trebuie conectat la pinul de alimentare digitală Vcc printr-o rețea RC ca în figura 2.6

4. Se va utiliza funcția de reducere de zgomot pentru a micșora influența nucleului procesor asupra ADC.
5. Dacă unii din pini portului A sunt utilizați ca ieșiri digitale, este esențial ca acestea să nu comute în timpul unei conversii.

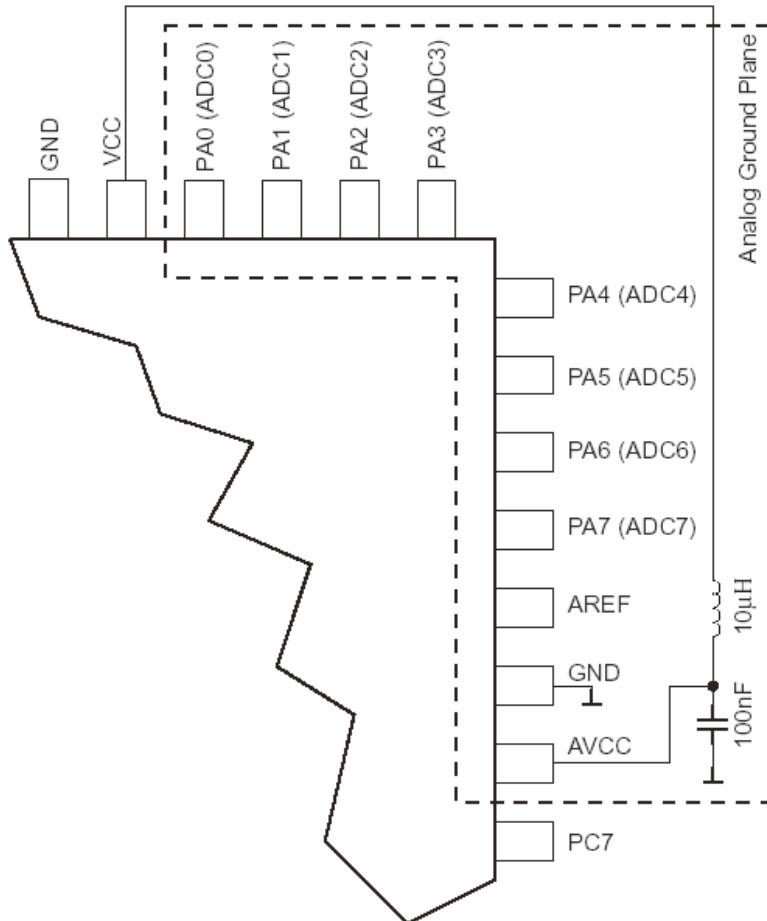


Figura 2.6 – Conexiunile de alimentare ale ADC

Symbol	Parameter	Condition	Min ⁽¹⁾	Typ ⁽¹⁾	Max ⁽¹⁾	Units
	Resolution	Single Ended Conversion		10		Bits
	Absolute Accuracy (Including INL, DNL, Quantization Error, Gain and Offset Error)	Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{DC} = 4V$ ADC clock = 200 kHz		1.5		LSB
		Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{DC} = 4V$ ADC clock = 1 MHz		3		LSB
		Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{DC} = 4V$ ADC clock = 200 kHz Noise Reduction mode		1.5		LSB
		Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{DC} = 4V$ ADC clock = 1 MHz Noise Reduction mode		3		LSB
	Integral Non-Linearity (INL)	Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{DC} = 4V$ ADC clock = 200 kHz		0.75		LSB
	Differential Non-Linearity (DNL)	Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{DC} = 4V$ ADC clock = 200 kHz		0.25		LSB
	Gain Error	Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{DC} = 4V$ ADC clock = 200 kHz		0.75		LSB
	Offset error	Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{DC} = 4V$ ADC clock = 200 kHz		0.75		LSB
	Clock Frequency		50		1000	kHz
	Conversion Time		13		260	μs
AVCC	Analog Supply Voltage		$V_{DC} - 0.3^{(2)}$		$V_{DC} + 0.3^{(3)}$	V
V_{REF}	Reference Voltage		2.0		AVCC	V
V_{IN}	Input Voltage		GND		V_{REF}	V
	ADC Conversion Output		0		1023	LSB
	Input Bandwidth			38.5		kHz
V_{INT}	Internal Voltage Reference		2.3	2.56	2.7	V
R_{REF}	Reference Input Resistance			32		k Ω
R_{AIN}	Analog Input Resistance			100		M Ω

Tabelul 2.5 – Caracteristicile ADC in modul comun

1.2.10 Concluzii

Prin utilizarea unui microcontroler performant se poate realiza sistemul de masurare a temperaturilor in mai multe puncte simultan in sistemul de izolatie multistrat al criostatului de heliu lichid. Microcontrolerul AVR de tip ATmega 8535 cuprinde principalele blocuri necesare realizarii sistemului de achizitie de date, iar modificarea caracteristicilor sale functionale pentru adaptarea la noi conditii experimentale se poate face intr-o masura insemnata prin software. Astfel se asigura o flexibilitate si fiabilitate foarte ridicate precum si o mare varietate de experimente posibile. Rezultatele primare achizitionate de la senzori se vor transfera catre un computer care efectueaza prelucrarea,

memorarea si afisarea datelor referitoare la temperaturile in diverse puncte ale izolatiei multistrat.

Bibliografie

- [1] Atmel, AVR RISC Microcontroller, Data Book, San Jose CA. 1999
- [2] Balan Radu, *Microcontrolere - Structura s i aplicatii*, Ed. Todesco
- [3] Balan Radu, *Microcontrolere – Indruma tor de laborator*, Ed. Todesco
- [4] Ciascai Ioan, *Sisteme electronice dedicate cu microcontrolere AVR RISC*, Ed. Casa Cartii de Stiinta
- [5] Ciascai Ioan, *Microcontrolerul AT90S8515 In 12 lucrari practice*
- [6] Demian, T., *Elemente constructive de mecanica fina*, Ed. Didactica si Pedagogica, Bucuresti 1980
- [7] Demian T., Demian, T., *Mecanisme de mecanica fina* , Ed. Didactica si Pedagogica , Bucuresti, 1982
- [8] Kuhnel, Claus , *BASCOM Programming of Microcontrollers with Ease*
- [9] Maties, V. , Mandru, D. , Balan, R. , Tatar, O. , Rusu, C. , *Tehnologie si educatie mecatronica*
- [10] Maties, V., Mandru, D., Tatar, O., s.a. *Actuatori in mecatronica*,
- [12] ***7805.pdf
- [13] ***AT90S8515.pdf, Atmel
- [20] www.atmel.com

Activitatea 1.3 Analiza transferului de caldura prin conductie in suportii vasului de heliu

3.1.Generalitati

Sistemul de mentinere a temperaturii foarte joase in interiorul criostatului de heliu lichid are in general structura prezentata in figura 1. Vasul interior contine heliul lichid (la 4,2k), vasul exterior, cu pereti dublii contine azot lichid (la 77 k) iar intre ele se afla vid. Caldura este transferata dinspre exterior spre interior producand evaporarea heliului lichid, proces care trebuie minimizat pe cat posibil, datorita pretului ridicat de al heliului lichid.

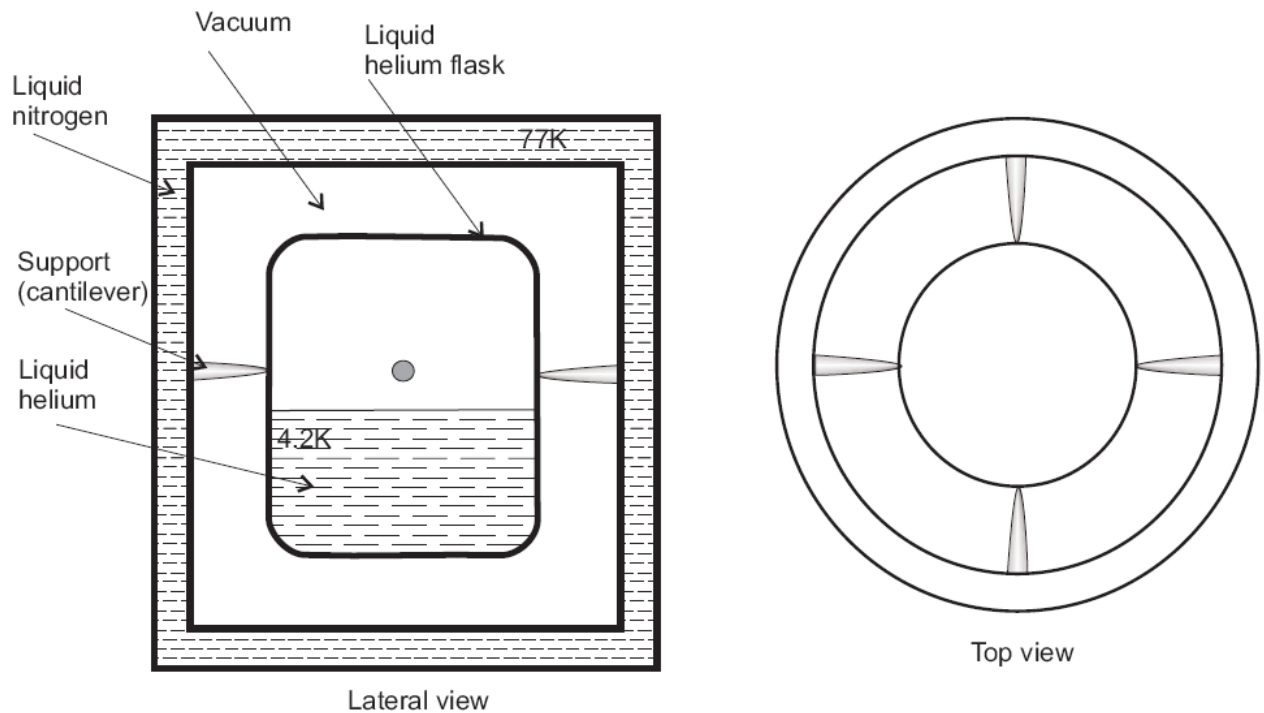


Figura 1. Reprezentare schematica a sistemului criogenic de stocare a heliului lichid

Se pot identifica doua procese care asigura transferul de caldura de la exterior catre interior :

- a) transferul prin radiatie intre suprafata interioara a vasului cu azot lichid si suprafata exterioara a vasului cu heliu lichid;
- b) transferul de caldura prin conductie care, datorita vidarii spatiului dintre cele doua vase, poate avea loc numai prin elementele de sustinere ale vasului interior.

Proiectarea acestor elemente trebuie sa minimizeze transefrul de caldura prin conductie prin alegerea unor materiale si geometrii corespunzatoare. Din nefericire, conditiile care se impun sunt in contardictie cu cele referitoare la rezistenta si stabilitatea mecanica a sistemului; de aceea se urmareste realizarea unui compromis cat mai bun intre ecle doua aspecte: cel termic si cel mecanic.

In aceasta etapa s-a urmarit obtinerea unor formule analitice care sa decsrie cat mai exact cele doua aspecte, pentru a fi posibila realizarea practica a sistemului cu cat mai putine experimente costisitoare. Metodele standard de masurare a fluxului de caldura se bazeaza pe masurarea cantitatii de heliu lichid evaporat in unitatea de timp, ceea ce evident , conduce la costuri destul de mari ale experimentelor.

Deducerea unor formule cat mai corecte necesare in proiectarea sistemului este totusi destul de dificila adtorita conditiilor extreme, departate de ecle obisnuite in care trebuie sa se lucreze: temperaturi cuprinse intre 4,2k si 77k.

Desi teoria transferului de caldura este foarte simpla si bine pusa la punct pentru conditii obisnuite (sute de grade Kelvin) ea trebuie totusi ajustata destul de serios pentru temperetauri criogenice. Astfel, in aceasta gama de temperaturi, conductivitatea termica a

materialelor depinde foarte puternic de temperatura iar rezistenta mecanica de asemenea. Aceste dependente trebuie obligatoriu luate in considerare pentru ca formulele sa fie intr-adevar utile, ceea ce impune atat un model fizic mult mai complicat cat si ecuatii si calcule matematice mai elaborate.

Problema este generata de implicarea reciproca a parametrilor procesului. Astfel, temperatura variaza de-a lungul tijei de sustinere, ceea ce implica si o variatie a conductivitatii termice si a rezistentei mecanice. Aceasta impune conditii mai dure din punct de vedere mecanic in anumite regiuni, ceea ce implica variatii ale parametrilor geometrici si acestia la randul lor modifica proprietatile de conductie termica.

3.2. Transferul de caldura in baia de sustinere cu profil variabil in conditii criogenice

Obiectivul acestei activitati il constituie determinarea fluxului de caldura printr-o bara de sectiune variabila plasata in vid, in conditii stationare, cu capetele aflate la temperaturile constante $T_1 = 4,2\text{ K}$ si $T_2 = 77\text{ K}$.

Fluxul termic poate fi descris de legea lui Fourier care arata ca acesta este proportional cu gradientul de temperatura si aria normala prin care se transfera caldura:

$$J = -KS\nabla T \quad (1.1)$$

unde:

- \bar{J} este fluxul termic [Wm^{-2}];
- K este conductivitatea termica a materialului [$Wm^{-3}k^{-1}$];
- S este sectiunea barei [m^2];
- ∇T este gradientul de temperatura [km^{-1}];

Deoarece nu exista conductie termica de la suprafata laterala a barei (aceasta fiind pusa in vid), problema este unidimensionala iar solutia se poate scrie ca:

$$J = \frac{dQ}{dt} = K \cdot S \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (1.2)$$

unde:

- T_1 si T_2 sunt temperaturile constante de la capetele barei [k];
- L este lungimea barei [m];

Aceasta ecuatie este insa valabila numai pentru sectiune si conductivitate constanta de-a lungul barei si diferente nu prea mari de temperatura. Daca acestea nu corespund situatiei de fapt, bara trebuie divizata in felii subtiri a caror suprafata si conductivitate poate fi considerata constanta pentru a asigura valabilitatea ecuatiei (1.2).

Astfel, putem scrie :

$$J = K \cdot S(x) \cdot \frac{dT(x)}{dx}$$

(1.3)

Luand de asemenea in considerare dependenta conductivitatii materialului cu temperatura:

$$K = K(T(x))$$

(1.4)

ecuatia (1.3) devine :

$$J = K(T(x))S(x) \frac{dT(x)}{dx}$$

(1.5)

Pentru temperaturi criogenice (mai mici decat temperatura Debye), drumul liber mijlociu al fononilor poate depasi dimensiunile barei si deci conductivitatea va fi o functie numai de caldura specifica C_v [4]

$$K(T) = \chi C_v(T)$$

(1.6)

Unde constanta χ este o caracteristica de material.

Conform modelului clasic Debye [5], in acest domeniu caldura specifica creste cu temperatura dupa legea [4]

$$C_v = aT^3$$

(1.7)

Implicand o alta constanta de material a .

Mai general, aproximatia Rosseland [6][7] permite considerarea unei alte constante aditive b , datorita conductivitatii moleculare

$$C_v = b + aT^3$$

(1.8)

Deoarece pentru $b=0$ este regasita dependenta Debye, vom considera in continuare aceasta ultima dependenta, mai generala, cu constanta b mai mult sau mai putin semnificativa pentru diverse materiale.

Din ecuatiile (1.5), (1.6) si (1.8) obtinem:

$$J = \chi [b + aT^3(x)] S(x) \frac{dT(x)}{dx}$$

(1.9)

Separand variabilele putem integra ecuatia diferentiala ordinara obtinuta:

$$J \frac{dx}{S(x)} = \chi [b + aT^3(x)] dT(x)$$

(1.10)

$$J \int_0^L \frac{dx}{S(x)} = \chi [b(T_2 - T_1) + \frac{a}{4}(T_2^4 - T_1^4)]$$

(1.11)

unde am tinut cont de faptul ca fluxul termic J este constant in conditii stationare.

Din ecuatia (1.11) obtinem fluxul termic J ca :

$$J = \chi [b(T_2 - T_1) + \frac{a}{4}(T_2^4 - T_1^4)] \left[\int_0^L \frac{dx}{S(x)} \right]^{-1}$$

(1.12)

Putem de asemenea obtine distributia de temperatura de-a lungul barei, care ne va fi necesara pentru calculele de rezistenta mecanica .

Din ecuatia (1.5) putem scrie:

$$dT(x) = J \frac{dx}{K(T(x)) \cdot S(x)}$$

(1.13)

La distanta l de sursa T_1 , temperatura $T(l)$ este obtinuta prin integrarea ecuatiei (1.13):

$$\int_{T_1}^{T(l)} \chi [b + aT^3(x)] dT(x) = J \int_0^l \frac{dx}{S(x)}$$

(1.14)

$$\chi \{ b[T(l) - T_1] + \frac{a}{4}[T^4(l) - T_1^4] \} = J \int_0^l \frac{dx}{S(x)}$$

(1.15)

Utilizand ecuatia (1.12) pentru fluxul termic J , distributia de temperatura este data de urmatoarea ecuatie, care poate fi rezolvata numeric:

$$bT(l) + \frac{a}{4}T^4(l) = bT_1^4 + \frac{a}{4}T_1^4 + [b(T_2 - T_1) + \frac{a}{4}(T_2^4 - T_1^4)] \left[\int_0^L \frac{dx}{S(x)} \right]^{-1} \int_0^l \frac{dx}{S(x)}$$

(1.16)

3.3. Consideratii privind profilul barelor de sustinere in conditii criogenice

Este cunoscut ca ecuatia generala Euler-Bernoulli pentru teoria barei incastrate neglijeaza deformatiile de forfecare si deviatia barei este data de ecuatia:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}) = F$$

(1.17) unde

- E este modulul lui Young;
- I este momentul de inertie al ariei;
- F este forta distribuita (fora pe unitatea de lungime);

Teoria mult mai generala a lui Timoshenko include si fortele de forfecare conducand la un sistem de ecuatii liniare cu derivate partiale:

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} (AkG(\frac{\partial u}{\partial x} - \theta)) + F$$

(1.18)

$$\rho I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} (EI \frac{\partial \theta}{\partial x}) + AkG(\frac{\partial u}{\partial x} - \theta)$$

(1.19) unde:

- ρ este densitatea materialului barei;
- A este sectiunea;
- G este modulul de forfecare;
- k este coeficientul de forfecare Timoshenko;

Tensiunea in bara la o distanta y de la axa neutra si in acelasi plan cu bara si forta aplicata este:

$$\sigma = Ey \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{My}{I}$$

(1.20) unde M este momentul de incovoiere proportional cu distanta de la forta aplicata (Figura 2).

$$M = F(L - x)$$

(1.21)

Evident, tensiunea in bara nu trebuie sa depaseasca rezistenta barei σ_{\max} care este o caracteristica a materialului, iar in conditii criogenice depinde de temperatura.

Astfel, din ecuatiile (1.20) si (1.21) rezulta:

$$\frac{y_{\max}}{I} F(L - x) \leq \sigma_{\max}$$

(1.22)

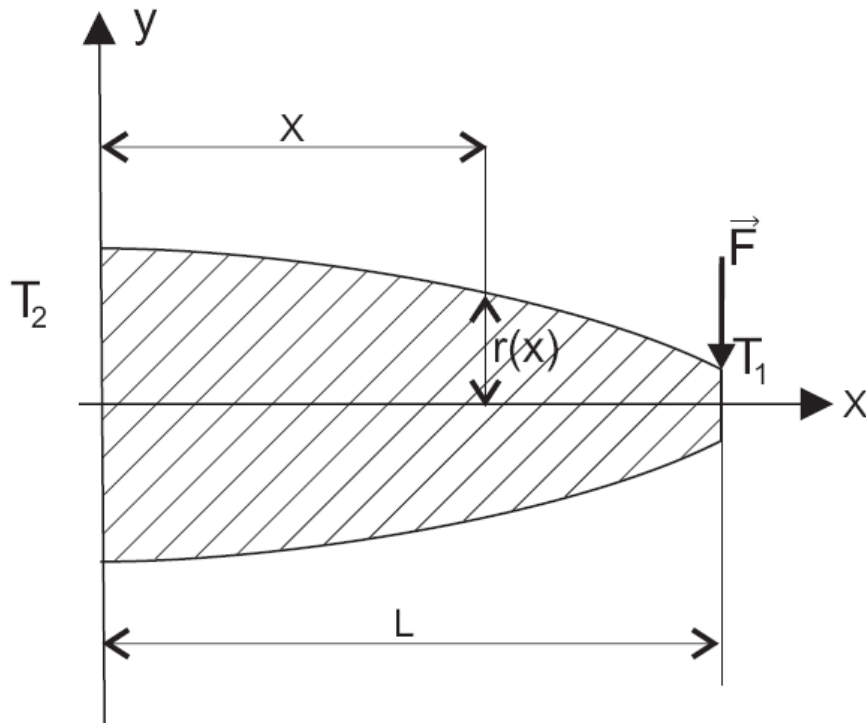


Figura 2. Profilul optimal al barei de sustinere

Se poate vedea ca tensiunea in bara creste liniar cu distanta de la forta aplicata fiind maxima la capatul fix al barei si 0 la capatul mobil. Astfel, este necesara o rezistenta mecanica mai mare catre capatul fix ceea ce insemna ca bara trebuie sa fie mai groasa cand x descreste. Reamintim ca pierderile de caldura cresc odata cu cresterea sectiunii barei, astfel ca aceasta trebuie mentinuta cat de mica posibil.

Evident, solutia este sa se utilizeze o bara cu sectiune variabila, mai subtire in regiunile cu tensiune scazuta si mai groasa in cele cu tensiune mai mare. Dependenta ideala a acestei sectiuni trebuie sa pastreze acelasi raport intre tensiunea permisa maxima si tensiunea existenta in fiecare punct de-a lungul barei. Aceasta va influenta de asemenea si conductivitatea termica a barei si fluxul de caldura [9].

Pentru o sectiune variabila a barei, momentul de inertie al ariei I este de asemenea variabil.

Pentru a gasi profilul optim, trebuie sa alegem mai intai forma sectiunii si sa gasim dependenta momentului de inertie al ariei de caracteristicile geometrice.

In cele mai multe cazuri, forta aplicata se afla intr-un plan fixat si cel mai mare moment de inertie al ariei cu o sectiune minima este asigurat de o bara cu sectiunea in I. Totusi, in cazul de fata daca vasul este inclinat, forta aplicata isi schimba palnul relativ iar bara cu sectiune in I are o tensiune maxima admisibila mult mai mica in astfel de situatii.

De aceea, este mai potrivit sa se utilizeze o bara cu sectiune circulara sau rectangulara in pofida performantelor mai scazute in cazurile cu un singur plan.

a) Bara cu sectiune de forma circulara

Momentul de inertie al ariei in acest caz este:

$$I = \frac{\pi r^4}{4}$$

(1.23)

Din ecuatia 1.21 cu $y_{\max} = r$ obtinem:

$$\frac{4F}{\pi r^3} (L-x) \leq \sigma_{\max} (T(x))$$

(1.24)

iar profilul barei este dat de:

$$r(x) \geq \left[\frac{4F}{\pi \sigma_{\max} (T(x))} (L-x) \right]^{\frac{1}{3}}$$

(1.25)

Desigur, trebuie sa se asigure si o rezerva pentru parametrul r (raza turbuei sa aiba o valoare nenula r_0 la capatul mobil) astfel ca ecuatia recomandata este:

$$r(x) = r_0 + \left[\frac{4F}{\pi \sigma_{\max} (T(x))} (L-x) \right]^{\frac{1}{3}}$$

(1.26)

In figura 2 este reprezentata dependenta recomandata a razei de distanta pana la capatul fix. Cea mai dificila parte a acestei ecuatii este generata de dependenta de temperatura a tensiunii maxime admisibile a materialului. Calitativ, se stie ca aceasta descreste atunci cand temperatura descreste in regim criogenic, dar nu este disponibila o formula generala exacta pentru aceasta dependenta. Problema poate fi rezolvata numai numeric sau folosind unele aproximatii. Pentru rezolvarea numerica a intregii probleme, trebuie sa se foloseasca un tabel care contine valorile tensiunii maxime admisibile in material pentru mai multe temperaturi in domeniul dorit. Se poate obtine o functie de aproximare polinomiala suficient de exacta folosind de exemplu metoda interpolarii Lagrange.

$$\sigma_{\max} (T(x)) = \sum_{i=1}^n \sigma_{\max} (T_i) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{T(x) - T_j}{T_i - T_j}$$

(1.27)

Introducem aceasta functie in ecuatia 1.10 si impreuna cu ecuatia 1.12 obtinem un sistem de doua ecuatii neliniare care poate fi rezolvat numeric.

O metoda mai simpla dar mai putin precisa este sa se aproximeze tensiunea maxima admisibila cu un polinom de gradul intai in variabila x .

$$\sigma_{\max} (T(x)) = \sigma_0 - cx$$

(1.28)

Unde constanta c poate fi obtinuta ca panta a unei drepte care aproximeaza cel mai bine datele din tabelul mentionat.

Astfel ecuatia (1.26) devine:

$$r = r_0 + \left[\frac{4F}{\pi(\sigma_0 - cx)} (L - x) \right]^{\frac{1}{3}}$$

(1.29)

Inserand aceasta ecuatie in (1.28) obtinem urmatoarea expresie pentru fluxul termic intr-o bara cu sectiune circulara si profil optimal:

$$J = \chi [b(T_2 - T_1) + \frac{a}{4}(T_2^4 - T_1^4)] I_1$$

(1.30) unde $I_1 = \left[\int_0^L \frac{dx}{S_1(x)} \right]^{-1}$ are o solutie analitica exacta care poate fi exprimata in

termeni de functii hipergeometrice Gauss ${}_2F_1(a, b; c; z)$ [10].

$$I_1 = \frac{\sigma_0 \sqrt[3]{\frac{4FL}{\sigma_0} + \pi r_0} [4\sqrt[3]{2} {}_2F_1\left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}; \frac{4}{3}; \frac{4cFL + c\pi\sigma_0 r_0}{4cFL - 4F\sigma_0}\right) + \left(\frac{\sigma_0(4F + c\pi r_0)}{F(\sigma_0 - cL)}\right)^{2/3}]}{\pi(4F + c\pi r_0) \left(-\frac{4F\sigma_0 + c\pi r_0 \sigma_0}{cFL\pi - F\pi\sigma_0}\right)^{\frac{2}{3}}} +$$

$$+ \frac{(cL - \sigma_0) \sqrt[3]{r_0} [4\sqrt[3]{2} {}_2F_1\left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}; \frac{4}{3}; -\frac{c\pi r_0}{4F}\right) + \left(\frac{c\pi r_0}{F} + 4\right)^{2/3}]}{(4F + b\pi r_0) \left(\frac{c\pi r_0}{F} + 4\right)^{2/3}}$$

(1.31)

b) Bara cu sectiune de forma rectangulara

In cazul sectiunii rectangulare momentul de inertie al ariei este:

$$I(x) = \frac{wh(x)^3}{12}$$

(1.32)

unde w este latimea(dimensiunea orizontala) iar h este inaltimea(dimensiunea verticala) a barei. Deoarece dimensiunea h are o influenta mult mai mare asupra rezistentei mecanice totale vom face ca doar aceasta sa depinda de x .

Introducand aceasta formula in ecuatie (1.32) si considerand $y_{\max}(x) = \frac{h(x)}{2}$

obtinem:

$$h(x) = \left[\frac{6F}{w\sigma_{\max}} (L - x) \right]^{\frac{1}{2}} + h_0$$

(1.33)

Din nou, luand in considerare dependenta de temperatura a rezistentei materialului putem folosi formula de interpolare Lagrange pentru o aproximare polinomiala sau sa ne multumim cu o formula liniara. In ultimul caz ecuatie profilului barei devine:

$$h(x) = h_0 + \left[\frac{6F}{w(\sigma_0 - bx)} (L-x) \right]^{\frac{1}{2}}$$

(1.34)

De asemenea, introducand aceasta ecuatie in (1.12) obtinem urmatoarea expresie pentru fluxul termic in bara cu sectiune de forma rectangulara si profil optim:

$$J = \chi [b(T_2 - T_1) + \frac{a}{4}(T_2^4 - T_1^4)] I_2$$

(1.35) unde $I_2 = \left[\int_0^L \frac{dx}{wh(x)} \right]^{-1}$ poate fi calculata numeric

3.4. Rezultate numerice

Folosind aceste formule analitice pentru sectiunea barei cu rezistenta mecanica optima si conductanta termica minima am obtinut rezultatele numerice din tabelul 1. Am prevazut o valoare nenula a razei la capatul mobil unde momentul este teoretic nul pentru a preveni deformarea de forfecare care nu a fost inclusa in ecuatie Euler-Bernoulli. Nu s-a luat in considerare variatia rezistentei mecanice cu temperatura astfel ca se recomanda utilizarea unor valori mai mari pentru raza catre capatul mobil, aflat la temperatura mai joasa. Aceasta sugereaza ca un profil tronconic poate fi o buna aproximatie pentru un compromis optim intre caracteristicile mecanice si termice ale barei.

3.5. Concluzii

Modelul prezentat include dependenta de temperatura a conductivitatii si rezistentei mecanice a suportilor in regim criogenic. Aceste caracteristici pot fi estimate teoretic sau determinate experimental pentru materialele folosite.

Formulele propuse vor fi utilizate pentru proiectarea corespunzatoare a recipientului de heliu lichid astfel incat sa se minimizeze transferul de caldura si sa se pastreze caracteristicile mecanice.

Desi profilul generat de aceste formule poate fi complicat, el poate fi aproximat cu unul tronconic pentru scopurile practice, cu conditia ca sectiunea in fiecare punct sa fie mai mare sau egala decat cea obtinuta teoretic.

Bibliografie

[1] J. Fourier, J. The Analytical Theory of Heat. Dover Publications Inc. New York, 1955;

[2] P. Lebrun, Advanced superconducting technology for global science: the Large Hadron Collider at CERN, Adv. Cryog. Eng., **47A**: 3-14 (2002);

[3] G. Claudet, Superfluid helium from physics laboratory to industry, Proceedings of ICEC19, Gistau-Seyfert ed., Narosa Publishing House, New Delhi: 743-750 (2002);

- [4]D. G. Cahill and R. O. Pohl, "Lattice Vibrations and Heat Transport in Crystals and Glasses," Ann. Rev. Phys. Chem **39**:93-121, (1988);
- [5]P. Debye, Zur Theorie der spezifischen Waerme, Annalen der Physik (Leipzig) **39**(4), p. 789 (1912);
- [6] S. Rosseland, Ap Phys J, **61**, 424,(1925);
- [7] S. Rosseland, "The Principles of Quantum Theory", Ergänzungsband, pp. 243-249, (1936);
- [8]M. R. Sridhar and M. M. Yovanovich, "Thermal Contact Conductance of Tool Steel and Comparison with Model," Int. J. of Heat Mass Transfer **39**(4): 831-839, (1996);
- [9]M. M. Yovanovich, P. Teertstra, and J. R. Culham, "Modeling Transient Conduction From Isothermal Convex Bodies of Arbitrary Shape," Journal of Thermophysics and Heat Transfer **9** (3):385-390, 1995;
- [10]M. Abramowitz and I. A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions,Dover, New York, 1965.

Tabelul 1. Rezultatele numerice pentru variatia cu distanta de la punctul fix a razei barei de sustinere din otel austenitic pentru diverse forte de incovoiere

x[m]	F=10N	F=20 N	F=30 N	F=40 N
0.01	3.68484	4.38268	4.8722	5.26191
0.02	3.63688	4.32226	4.80304	5.18579
0.03	3.58712	4.25957	4.73127	5.10679
0.04	3.53536	4.19436	4.65663	5.02464
0.05	3.4814	4.12637	4.5788	4.93898
0.06	3.42499	4.05529	4.49744	4.84943
0.07	3.36582	3.98074	4.4121	4.7555
0.08	3.30353	3.90227	4.32226	4.65663
0.09	3.23768	3.8193	4.22729	4.55209
0.10	3.1677	3.73114	4.12637	4.44102
0.11	3.0929	3.63688	4.01848	4.32226
0.12	3.01232	3.53536	3.90227	4.19436
0.13	2.92471	3.42499	3.77592	4.05529
0.14	2.82831	3.30353	3.63688	3.90227
0.15	2.72051	3.1677	3.4814	3.73114
0.16	2.59718	3.01232	3.30353	3.53536
0.17	2.45113	2.82831	3.0929	3.30353
0.18	2.26768	2.59718	2.82831	3.01232
0.19	2.00616	2.26768	2.45113	2.59718
0.20	2.00000	2.00000	2.00000	2.00000

- anexe (documentatie de executie, caiet de sarcini, teme de proiectare, buletine de incercari, atestari, certificari, etc. – dupa caz);
- concluzii(se prezinta punctual)
- bibliografie;

2. Indicatorii de rezultat generali si specifici pentru etapa raportata

3. Procesele verbale de avizare si receptie a lucrarilor

In cazul ultimei etape pentru sectiunea stiintifica si tehnica se vor prezenta documente ca si pentru raportarea intermediara, si, in plus:

- Raportul final de activitate (conform modelului)
- Rezumatul publicabil in romana si in engleza (maxim 3 pagini), din care sa rezulte gradul de noutate si elementele de dezvoltare economica ale intregului proiect

Cod: PO-04-Ed2-R0-F5

