

CODEN: LUTFD2/(TFRT-5286)/1-077/(1982)

NEUTRONFLÖDESMÄTSYSTEM MED SPN-DETEKTORER
KOMPENSERING FÖR NEUTRONAKTIVERINGSEFFEKTER MED
DATORISERAD SIGNALBEHANDLING

MICHAEL LUNDH

INSTITUTIONEN FÖR REGLERTEKNIK
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

OKTOBER 1982

LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY DEPARTMENT OF AUTOMATIC CONTROL Box 725 S 220 07 Lund 7 Sweden	Document name	
	Report	
	Date of issue	
	Oktober 1982	
	Document number	
	CODEN:LUTFD2/(TFRT-5286)/1-077/(1982)	
Author(s)	Supervisor	
	Sponsoring organization	
Michael Lundh		
Title and subtitle		
NEUTRONFLÖDESMÅTSYSTEM MED SPN-DETEKTORER. Kompensering för neutronaktiveringseffekter med datoriserad signalbehandling. (NEUTRON FLUX MONITORING SYSTEM BASED ON SPN-DETECTORS. Compensation for effects due to neutronactivation by computerized signal		
Abstract / processing)		
<p>A system for neutronflux monitoring is under development. It is based on Self-powered neutront detectors with cobaltemitter. The characteristic of this type of detector change, due to irradiation, and must be compensated for. A model based on the two domination components in the detectorcurrent has been developed. One component is proportional to thermal neutronflux and the quantity of the isotope ⁵⁹Co in the emitter. The other is a not wanted background current caused by the beta-decaying isotope ⁶⁰Co. To be able to make a correct compensation of the detectorchanges it is necessary to estimate the isotopequantities in the emitter. This is done by the computer in the system. The here described program calculates the new isotope-quantities every twenty hour and has the capacity to administrate forty Self-Powered neutront detectors.</p>		
Key words		
Classification system and/or index terms (if any)		
Supplementary bibliographical information		
ISSN and key title		ISBN
Language	Number of pages	Recipient's notes
Swedish	77	
Security classification		

DOKUMENTATABLAD RT 3/81

Distribution: The report may be ordered from the Department of Automatic Control or borrowed through the University Library 2, Box 1010, S-221 03 Lund, Sweden, Telex: 33248 lubbis lund.

NEUTRONFLÖDESMÄTSYSTEM MED SPN-
DETEKTORER, KOMPENSERING FÖR
NEUTRONAKTIVERINGSEFFEKTER MED
DATORISERAD SIGNALBEHANDLING.

EXAMENSARBETE

AV

MICHAEL LUNDH

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	<u>Sid</u>
1. PROBLEMFÖRMULERING	1
2. SYFTE	1
3. AVGRÄNSNING	1
4. BAKGRUND	2
4.1 Allmänt	2
4.2 Mätnoggrannhet	4
4.3 Neutron- och gammaflöden i reaktorhärden	5
4.4 Kort beskrivning av en SPN-detektor med förstärkare	6
5. FYSIKALISKA FÖRÄNDRINGAR I EMITTERNS ISOTOPSAMMANSÄTTNING	8
5.1 Teori	8
5.2 Beräkning av isotopsammansättningen	10
6. DETEKTORNS STRÖMMAR	13
6.1 Prompt ström	13
6.2 Fördröjd ström	15
7. UTVÄRDERING AV EXPERIMENT	17
7.1 Riggen Kl62 i R2-reaktorn	17
7.2 Sond 3 i Ol-reaktorn	22
7.3 Slutsatser	23
8. DETEKTORMODELL	24
9. ANALYS AV PARAMETERAVVIKELSER	26
9.1 Simulering	26
9.2 Resultat från simuleringen	28

	<u>Sid</u>
10. KOMPENSERING MED DATOR	30
10.1 Val av samplingsintervall	30
10.2 Beskrivning av datorprogram	31
11. AVSLUTNING	35

.....REFERENSER

BILAGOR

Examensarbetet har tillkommit på uppdrag av Studsvik Energiteknik AB och är huvudsakligen utfört i Nyköping.

Programmeringsarbetet är dock gjort på Institutionen för Reglerteknik vid Lunds tekniska högskola.

Handledare på Studsvik Energiteknik AB var Sam Sjöoquist och Lennart Svansson.

Handledare på Institutionen för Reglerteknik var Björn Wittenmark.

I RAPPORTEN FÖREKOMMANDE BETECKNINGAR

σ_{59} = $(37.0 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2)$ tvärsnitt för infångning av termiska neutroner i ^{59}Co

σ_{60} = $(2.0 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2)$ tvärsnitt för infångning av termiska neutroner i ^{60}Co

λ_{60} = $(4.17 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1})$ sönderfallskonstant för ^{60}Co

λ_{61} = $(1.17 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1})$ sönderfallskonstant för ^{61}Co

e = $(1.60 \cdot 10^{-19} \text{ As})$ elektronens laddning

ξ = (0.74) flödesdepressionsfaktor, beskrivs i Bilaga 2

Φ_{th} = termiskt neutronflöde

Φ_e = estiment neutronflöde

Φ = neutronflöde

N_{59} = antal atomer i emittorn av isotopen ^{59}Co

N_{60} = antal atomer i emittorn av isotopen ^{60}Co

N_{61} = antal atomer i emittorn av isotopen ^{61}Co

M_{59} = (N_{59}/N_{590}) relativ mängd i emittorn av isotopen ^{59}Co

M_{60} = (N_{60}/N_{590}) relativ mängd i emittorn av isotopen ^{60}Co

M_{61} = (N_{61}/N_{590}) relativ mängd i emittorn av isotopen ^{61}Co

I_{det} = total ström från detektor

I_{mod} = total ström från detektormodell

I_{pr} = prompt ström

I_{60} = ström från ^{60}Co -sönderfallet

I_x = konstant strömkomponent

• Känsligheten för termiska neutroner för en absorberad dos är

- K = känsligheten för termiska neutroner för en
obestrålad detektor
- B = (I_{60}/M_{60}) proportionalitetskonstant för
strömmen från ^{60}Co
- G = förstärkning vid bestrålningens början
- Y = förstärkarens utsignal.

Övriga beteckningar förklaras i texten.

1. PROBLEMFÖRMULERING

Då en detektor med coboltemitter utsätts för ett neutronflöde uppkommer en ström från vilken man kan bestämma neutronflödet. Då detektorn bestrålas förändras dess egenskaper. Känsligheten minskar eftersom emittermaterialet bränns ut och dessutom uppkommer oönskade strömmar från dotterisotopernas sönderfall. Även extern gammastrålning från klyvningsprodukterna kan ge ett icke önskat bidrag till den totala detektorströmmen. Alla dessa faktorer försvårar en korrekt uppskattning av neutronflödet.

2. SYFTE

Syftet med rapporten är att kartlägga de i detektorströmmen förekommande komponenternas storlekar och orsaker samt att härifrån bygga upp en modell innehållande de ej försumbara strömbidragen. Utifrån detektormodellen skall ett datorprogram skrivas som kontinuerligt kompenserar för de detektorförändringar som uppkommer vid bestrålning.

3. AVGRÄNSNING

I denna rapport behandlas endast den typ av SPN-detektor, tillverkad av Studsvik Energiteknik AB, vilken har coboltemitter med 2 mm diameter och en 0.5 mm isolator av aluminiumoxid.

4. BAKGRUND

4.1 Allmänt

I alla typer av reaktorer önskar man mäta effekten. Den termiska effekten kan man beräkna från mätvärden på massflödet genom härden samt temperatur och tryck vid inloppet och utloppet. Detta ger endast ett medelvärde för effekten över hela härden och säger ingenting om den lokala effektfördelningen. Denna är emellertid viktig att känna till för att reaktorn skall arbeta så att bränslet utnyttjas optimalt. Skulle t ex en del av härden ha en mycket större effektutveckling än en annan så kommer det fissila bränslet att brännas ut alltför snabbt med dålig lönsamhet som följd.

Ett sätt att bestämma den lokala effekten vore att mäta temperaturen på ett antal ställen i reaktorhärden. Denna teknik är idag ej praktiskt genomförbar.

Man utnyttjar i stället det samband som föreligger mellan lokal effekt och lokalt neutronflöde. Om man försummar den ökning i neutronflödet som beror på bränslets utbränning kan man påstå att proportionalitet föreligger.

Detta effektövervakningssystem som mäter det lokala neutronflödet ingår också i säkerhetssystemet och går under beteckningen LPRM (Local Power Reactor Monitoring) och är avsett att användas då effekten överskrider 10 % av fulleffekt.

För lägre effekter finns s k uppstartningssystem som mäter vid låga neutronflöden. Dessa system är baserade på detektorer av fissionskammartyp vars utsignal är ett pulståg där antalet pulser per tidsenhet är direkt proportionellt mot neutron-

flödet. Vanligtvis är det samma detektor som används i dessa båda lågeffektmätsystem. Skillnaden mellan dem ligger i signalbehandlingsmetoden.

SRM- (Source Range Monitoring) systemet används för flöden underskridande 10^{13} neutroner/m² och s, dvs endast i allra första början av reaktorns uppstartningsförlopp. Signalbehandlingen är en pulsräkning eftersom antalet pulser per tidsenhet är så lågt att det finns markerade mellanrum mellan pulserna.

IRM- (Intermediate Range Monitoring) systemet tar över när pulserna börjar överlagra varandra. Strömkomponenterna från pulserna adderas och ger upphov till en strömsignal som är proportionell mot neutronflödet. Övre gränsen för detta mätsystem ligger ungefär vid 10^{17} neutroner per m² och s. Vid detta neutronflöde övertar LPRM-systemet mätningen och därefter dras SRM/IRM-detektorerna ut ur härden för att de inte skall brännas upp.

LPRM-systemet är idag uppbyggt av fissionskammare av liknande typ som finns i SRM/IRM-systemen. Nackdelen med denna detektortyp är att den bränns ut väldigt fort och måste kalibreras ungefär varannan till var tredje vecka för att det skall vara möjligt att bestämma neutronflödet med ett fel understigande 4-5 % av maximalt neutronflöde. Man önskar ersätta fissionskammarna i LPRM-systemet med SPN- (Self Powered Neutron) detektorer, som har en mycket lägre utbränning. En SPN-detektor med coboltemitter är speciellt lämpad för detta då denna har ungefär samma tidskonstant (10^{-14} s) som fissionskammarna har. Den detektor som har en så liten tidskonstant sägs ha prompt svar.

4.2 Mätnoggrannhet

Kriteriet på mätnoggrannheten för SPN-detektorerna är att felet i estimerat neutronflöde skall vara mindre än det fel som erhålls vid motsvarande mätning med fissionskammare, samtidigt som tiden mellan två manuella kalibreringar är längre för SPN-detektorerna. Önskemålet är att detektorn skall kunna vara i drift i 18 månader (maximal tid med kontinuerlig drift mellan bränslebyten, ännu ej uppnådd i Sverige) utan manuella mätningar samtidigt som felet i estimerat neutronflöde under hela denna tid är lägre än 2.0 % av fullflöde.

Av speciellt stort intresse är den noggrannhet med vilken LPRM-systemet mäter de låga neutronflöden som förekommer vid reaktorns uppstartningsfas i samband med att mätningen övergår från SRM/IRM- till LPRM-systemet. Det är viktigt att detta system ej visar för högt neutronflöde ty skulle så vara fallet föreligger risk för prompt kritisk reaktor. Orsaken till detta är att vid uppkörningen av reaktor är effekten den parameter som styr hastigheten med vilken reaktor-effekten ökas. Anger mätsystemet högre neutronflöde (=effekt) än vad som är fallet kommer effekten att ökas otillåtet snabbt och kontrollsvårigheter uppstår med ovan nämnda risk som följd. Skulle emellertid felet vara sådant att LPRM-systemet anger för låg effekt (under 5 % av fulleffekt, =larmgräns) kommer, när IRM-systemet säger att effekten är 10 % och att LPRM skall ta över, en sk scram att inträffa och reaktorn snabbstoppas. Reaktorn går ej att starta upp vid denna typ av fel.

Av det ovan nämnda framgår nödvändigheten att bestämma neutronflödet med stor noggrannhet vid så-

väl höga flöden (i ekonomisk aspekt) som vid låga flöden (i säkerhetsmässig aspekt).

4.3 Neutron- och gammaflöden i reaktorhärden

En SPN-detektor påverkas i första hand av flödet av termiska neutroner, men även av snabbare neutroner och gammastrålning.

Neutronflödet i reaktorn kan indelas i olika grupper efter neutronernas energi. Energin är beroende på hastigheten med vilken neutronerna rör sig och man talar om snabba, medelsnabba och långsamma neutroner. De snabba har en energi som överstiger 0.1 MeV, de långsamma en som understiger 1 eV och de medelsnabba en som ligger däremellan. Man talar också om termiska neutroner, vilka karakteriseras av att de är i jämvikt med omgivningen, dvs de har ungefär samma rörelsesenergi som molekylerna i det medium de rör sig i. Omgivningens energi är ju temperaturberoende och därmed kan även de termiska neutronernas energi sägas vara temperaturberoende.

Endast de neutroner som är i energetisk jämvikt med sin omgivning kan på något sätt reagera med omgivningens atomkärnor. De snabba neutronerna har varken förmågan att klyva bränslet eller att ge något nämnvärt bidrag till signalen från neutrondetektorerna. Dessa neutroners energi minskar emellertid genom oelastiska stötar med moderatorns atomkärnor. Efter ett tillräckligt antal stötar har energin minskat så att neutronen har blivit termisk. Det är alltså i huvudsak de termiska neutronerna som står för klyvningen av det fissionella bränslet och därmed dessa man skall mäta flödet av för att kunna bestämma den lokala effekten i härden. Därför är det termiska neutroner som avses när det i fortsättningen talas om neu-

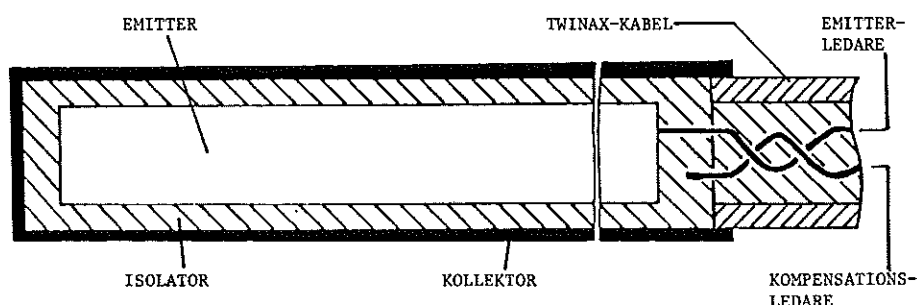
troner i allmänhet. Neutroner kan också indelas i prompta och fördröjda. De prompta emitteras vid själva fissionen och de fördröjda under en viss tid efter fissionsögonblicket. Dessa klingar av med halveringstiden 8.66 s.

Gammaflödet kan liksom neutronflödet indelas i en prompt och en fördröjd del. Den prompta delen kommer från själva fissionen och från det infångningsgamma som emitteras vid neutronabsorption i reflektor, bränsle, byggelement i härden m m. Den kan antagas vara ungefär proportionell mot det prompta neutronflödet. Den fördröjda delen kommer från reaktioner i klyvningsprodukterna. Denna del har en så långsam avklingning att den kan ses som en ungefär konstant bakgrundskomponent.

Eftersom varje reaktor har ett specifikt neutronspektrum och en specifik nivå av både prompt och fördröjd gammastrålning är det viktigt att detektorerna kalibreras i den reaktor som de skall mäta i. Den känslighet för termiska neutroner som fås vid kalibreringen gäller endast för ett enda neutronspektrum.

4.4 Kort beskrivning av en SPN-detektor med förstärkare

En SPN-detektor består av emitter, isolator och kollektor ordnade koaxialt enligt Figur 1.



Figur 1 SPN-detektor i skala 7:1.

Då emitttern utsätts för ett neutronflöde kommer β -strålning att utsändas. Denna uppfångas av kollektorn som därmed blir negativt laddad i förhållande till emitttern. Detektorn kan ses som en strömkälla vars styrka är proportionell mot neutronflödet.

Kollektorn som också är ytterhölje för detektorn är tillverkad av Inconel 600 och har en ytterdiameter på 3.5 mm. Isolatorn är 0.5 mm tjock och består av aluminiumoxid (Al_2O_3) i form av ett hårt packat pulver. Slutligen emitttern som framför allt är den komponent i detektorn som ger den dessa karakteristik. En coboltemitter ger ett prompt svar på neutronflödet. Längden hos emitttern avgör detektorns känslighet, och normal längd är 210 mm, vilket ger känsligheten $5.6 \cdot 10^{-25} \text{ A}/(\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$. Kabeln från detektorn är av twinax-typ och har två ledare. Den ena är ansluten till emitttern medan den andra saknar anslutning vid detektorn där den hänger fritt. Då det är strömdifferensen mellan ledarna som förstärks kommer alla strömbidrag från kabeln att elimineras och kvar blir endast bidraget från detektorn.

En schematisk bild av förstärkarenheten och dess anslutningar återfinnes i Bilaga 6, där dess egenskaper också beskrivs. Förstärkaren har ett antal logiska ingångar med vars hjälp olika funktioner kan väljas. Förstärkningen kan varieras med en faktor 2 och upp till 100 pA av ingångsströmmen kan avbäckas för att kompensera för bakgrundsströmmar.

5. FYSIKALA FÖRÄNDRINGAR I EMITTERNS ISOTOPSAMMANSÄTTNING

En SPN-detektor med prompt svar har, då den ej blivit bestrålad, en homogen emitter bestående av enbart isotopen ^{59}Co . Då den bestrålas kommer dess sammansättning att förändras. Isotopsammansättningen är intimt förknippad med såväl detektorns känslighet för termiska neutroner som med förekomsten av oönskade bakgrundsströmmar, och då det sedan skall kompenseras för de oönskade effekterna i signalströmmen är det nödvändigt att känna till de parametrar som påverkar emitters isotopsammansättning.

5.1 Teori

Isotopen ^{59}Co är stabil och infångar termiska neutroner med tvärsnittet $\sigma_{59} = 37.0 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$. Vid neutronabsorptionen utsänds γ -kvanta med en totalenergi på ca 7 MeV samtidigt som en dotterisotop med masstalet 60 bildas. Antalet neutronabsorptioner är detsamma som minskningen av mängden ^{59}Co , vilken beskrivs av differentialekvationen

$$\frac{dN_{59}}{dt} = -\sigma_{59} \cdot \xi \cdot \phi_{th} \cdot N_{59}$$

Den här bildade isotopen med masstalet 60 förekommer i två tillstånd, som båda är instabila och sönderfaller varvid β - och γ -strålning utsänds. Ett exiterat tillstånd $^{60}\text{Co}^m$ som har halveringstiden 10.5 minuter. Det sönderfaller antingen till ^{60}Co som är isotopens andra tillstånd varvid ett lågenergetiskt γ -kvantum (59 keV) utsänds eller till ^{60}Ni via β - (1.59 MeV) och γ -sönderfall (1.33 MeV). Det andra tillståndet ^{60}Co har halveringstiden 5.26 år och sönderfaller även det till ^{60}Ni via β - och γ -sönderfall, där elektronen har energin 0.31 MeV och de båda γ -kvanta

som utsänds har energierna 1.17 MeV och 1.33 MeV. Endast 0.3 % av sönderfallet till ^{60}Ni kommer från $^{60}\text{Co}^m$ som därför har liten betydelse i förhållande till det andra tillståndet.

Vid sönderfallet av ^{60}Co ger de två högenenergetiska γ -kvanta upphov till comptonelektroner, som orsakar en icke önskvärd bakgrundsström vilken kommer att behandlas senare. Isotopen ^{60}Ni är stabil och har ett så lågt neutrontvärsnitt ($2.6 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$) att den kan bortses ifrån.

Även isotopen ^{60}Co utsätts för neutronflöde och kommer då att infånga neutroner. Detta sker med tvärsnittet $\sigma_{60} = 2.0 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$ varvid ^{61}Co bildas. Infångningsgammat är dock så litet att det kan försummas i förhållande till det från infångningen i ^{59}Co . Förändringen i mängden ^{60}Co är resultatanten av den mängd som bildas från ^{59}Co genom neutronabsorption, den mängd som spontant sönderfaller till ^{60}Ni och den mängd som genom neutronabsorption bildar ^{61}Co vilket också beskrivs av differentialekvationen

$$\frac{dN_{60}}{dt} = \sigma_{59} \cdot \xi \cdot \Phi_{th} \cdot N_{59} - \lambda_{60} \cdot N_{60} - \sigma_{60} \cdot \xi \cdot \Phi_{th} \cdot N_{60}$$

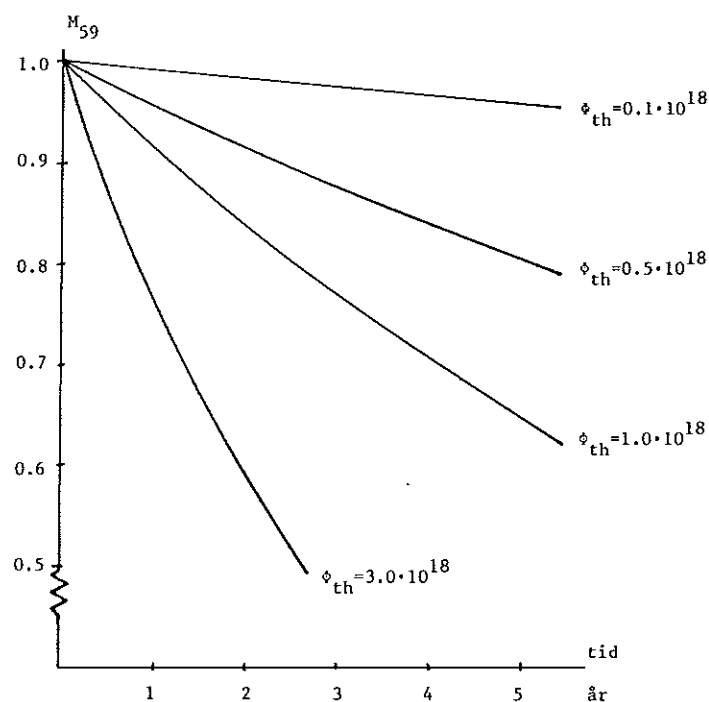
Den här bildade isotopen ^{61}Co är ej stabil utan sönderfaller med halveringstiden 99 minuter. Då utsänds en β -partikel med energin 1.22 MeV samtidigt som ^{61}Ni bildas. Även detta sönderfall kan ge upphov till en oönskad bakgrundsström. Nickelisotopen är stabil och har ett så lågt neutrontvärsnitt ($2.0 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$) att den kan bortses ifrån. Mängden ^{61}Co beskrivs av ekvationen

$$\frac{dN_{61}}{dt} = \sigma_{60} \cdot \xi \cdot \phi_{th} \cdot N_{60} - \lambda_{61} \cdot N_{61}$$

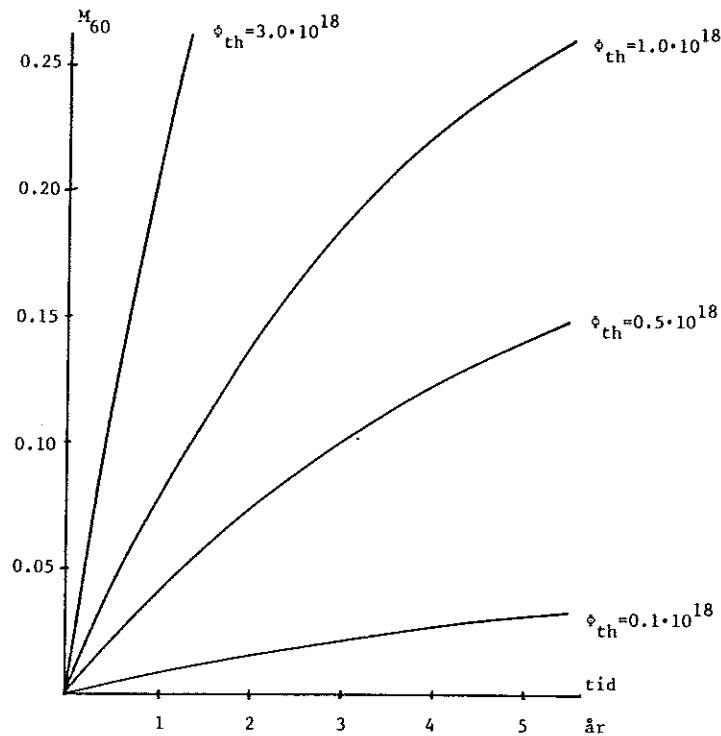
där högra ledets termer betecknar den mängd som bildats från ^{60}Co och den mängd ^{61}Co som sönderfaller till nickel.

5.2 Beräkning av isotopsammansättningen

Systemet med de tre ovan angivna differential-ekvationerna löses i Bilaga 1 och emitterns relativa mängder av coboltisotoperna 59 och 60 vid bestrålning i några olika neutronflöden visas i Figurerna 2 och 3.



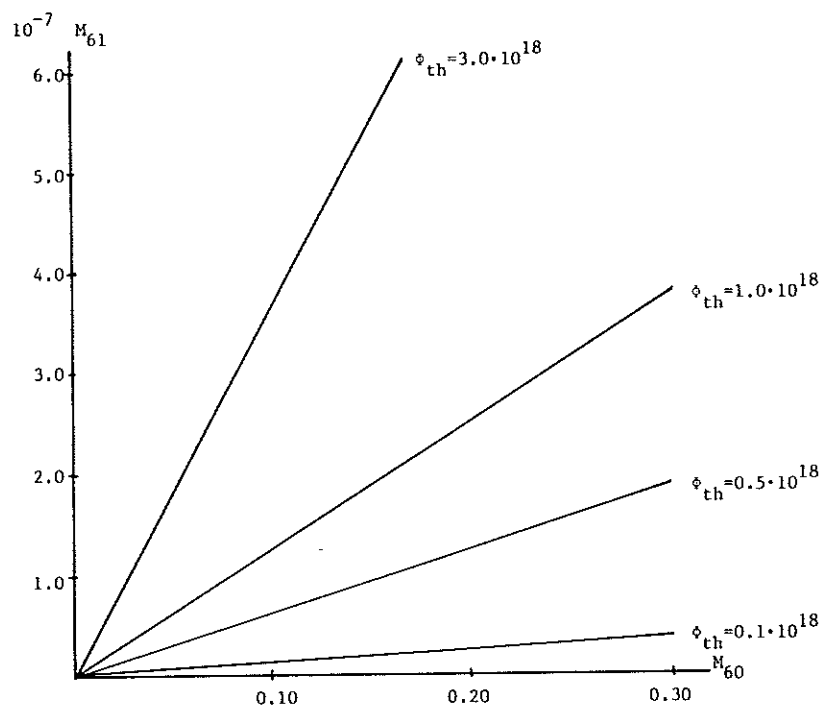
Figur 2 Emittersns relativa mängd av isotopen ^{59}Co som funktion av tid och neutronflöde.



Figur 3 Emittersnens relativa mängd av isotopen ^{60}Co som funktion av tid och neutronflöde.

Mängden ^{61}Co får med anledning av det snabba sönderfallet behandlas lite annorlunda. Det är ej en funktion av tidsintegrerat neutronflöde och drifttid utan beror istället på mängden ^{60}Co och det momentana neutronflödet. Det är tillräckligt med 11 timmars avställning av reaktorn för att mängden ^{61}Co skall minska till mindre än en procent av mängden före stoppet. Då reaktorn åter startas byggs mängden ^{61}Co upp lika snabbt som den klingat av. Det stationära värdet som uppnås kan lätt beräknas från differentialekvationen för ^{61}Co . Det är ej helt korrekt att kalla det ett stationärt värde eftersom mängden ^{60}Co tillväxer vid bestrålning. Tillväxten är emellertid så långsam att man kan bortse från den vid betraktelsen av uppbyggnaden och avklingningen av mängden ^{61}Co i samband med ett reaktorstopp. Den

stationära relativa mängden ^{61}Co i emitttern har beräknats för några olika neutronflöden vid olika relativa mängder ^{60}Co och visas i Figur 4.



Figur 4 Emitterns relativa mängd av isotopen ^{61}Co som funktion av relativ mängd ^{60}Co och neutronflöde.

6. DETEKTORNS STRÖMMAR

En SPN-detektor placerad i en reaktor är utsatt för både neutron- och gammaflöden. Neutronflödet ger både direkt och indirekt upphov till fria elektroner i emittorn. De elektroner vars energi överstiger utträdesenergin kommer med en viss sannolikhet att lämna emittorn och transporteras genom isolatorn för att absorberas i kollektorn. Utträdesenergin är 378 keV för de detektorer med coboltemitter som tillverkas av Studsvik Energiteknik AB.

Detektorsignalen kan delas upp i två huvudkomponenter. En prompt del som är beroende av de momentana flödena och en fördröjd del som framförallt beror på det tidsintegrerade neutronflödet.

6.1 Prompt ström

Detektorns prompta signal härrör från neutronflödet och den prompta externa γ -strålningen. Då emittorn utsätts för ett neutronflöde kommer termiska neutroner att infångas av huvudsakligen isotopen ^{59}Co , då denna har det högsta tvärsnittet av de i detektorn förekommande isotoperna. De kraftiga γ -kvanta som härvid emitteras ger upphov till compton- och fotoelektroner. Även andra isotoper i emittorn (t ex ^{60}Co) infångar neutroner, men infångningsgammata är här så litet att det kan försummas i jämförelse med det ovannämnda. Detektorns ström vilken orsakas av ett neutronflöde kan principiellt tecknas

$$I_{\text{pr}} = e \cdot V_{59} \cdot R(\phi, E_n) \cdot P(E_\gamma)$$

där V_{59} är volymen av isotopen ^{59}Co i emittorn, $R(\phi, E_n)$ är antalet infångade neutroner/(s \cdot m³) som funktion av neutronflöde och neutronenergier,

och $P(E_\gamma)$ som är sannolikheten att en infångad neutron ger upphov till en fri elektron som uppfångas av kollektorn och är en funktion av energier och intensiteter hos infångningsgammat. Jaschik och Seifritz (ref 2) har beräknat R och P för ett i en kraftreaktor normalt förekommande neutronspektrum. För en obestrålad ($M_{59} = 1.0$) detektor av den typ som Studsvik Energiteknik AB tillverkar beräknades känsligheten för termiska neutroner till

$$I_{pr}/\phi_{th} = 5.25 \cdot 10^{-25} \text{ A/(m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$$

dvs för de neutroner som är intressanta i effekt-hänseende. I denna känslighet har härvid hänsyn tagits till neutroner med högre energier.

Den prompta externa γ -strålningen bildar compton- och fotoelektroner i detektorns alla delar och ger beroende på vissa tillverkningsparametrar antingen ett positivt eller ett negativt bidrag till detektorströmmen. Vanligtvis har detektorerna negativ γ -känslighet men det är möjligt att ge dem en positiv istället och en del sådana detektorer har också tillverkats. Eftersom den prompta γ -strålningen är ungefär proportionell mot neutronflödet kommer γ -känsligheten att antingen öka eller minska den signal som sägs vara proportionell mot det termiska neutronflödet. Då strömkomponenten från prompt γ -strålning är obetydlig i förhållande till den totala prompta strömmen kan den bortses ifrån vid utbränningsanalysen och man kan påstå att känsligheten för termiska neutroner i ett neutronspektrum är direkt proportionell mot mängden ^{59}Co i emittorn.

Eventuella andra komponenter i den prompta strömmen är små och kan försummas. Hänsyn till alla

prompta strömbidrag tas emellertid vid kalibreringen av detektorn i driftspositionen.

6.2 Fördröjd ström

Den fördröjda detektorströmmen orsakas av instabila isotopers sönderfall och av den externa fördröjda γ -strålningen. De isotoper som sönderfaller är cobolt 60 och 61 i emittern, aluminium i isolatorn, och mangan och nickel i kollektorn. Strömbidragen från de tre sistnämnda är emellertid försumbara.

Isotopen ^{60}Co , med halveringstiden 5.26 år, sönderfaller under utsändande av β - och γ -strålning. Den högenergetiska γ -strålningen ger upphov till comptonelektroner, vars energi överstiger utträdesenergin. Detta ger ett strömbidrag som är så stort att det ej kan försummas. Det är proportionellt mot mängden ^{60}Co i emittern och kommer sålunda att växa allt eftersom detektorn bestrålas. Vid reaktorstopp sjunker strömbidraget något pga att mängden ^{60}Co klingar av. Strömbidraget kan tecknas

$$I_{60} = e \cdot \lambda_{60} \cdot A \cdot M_{60} \cdot P_{60}$$

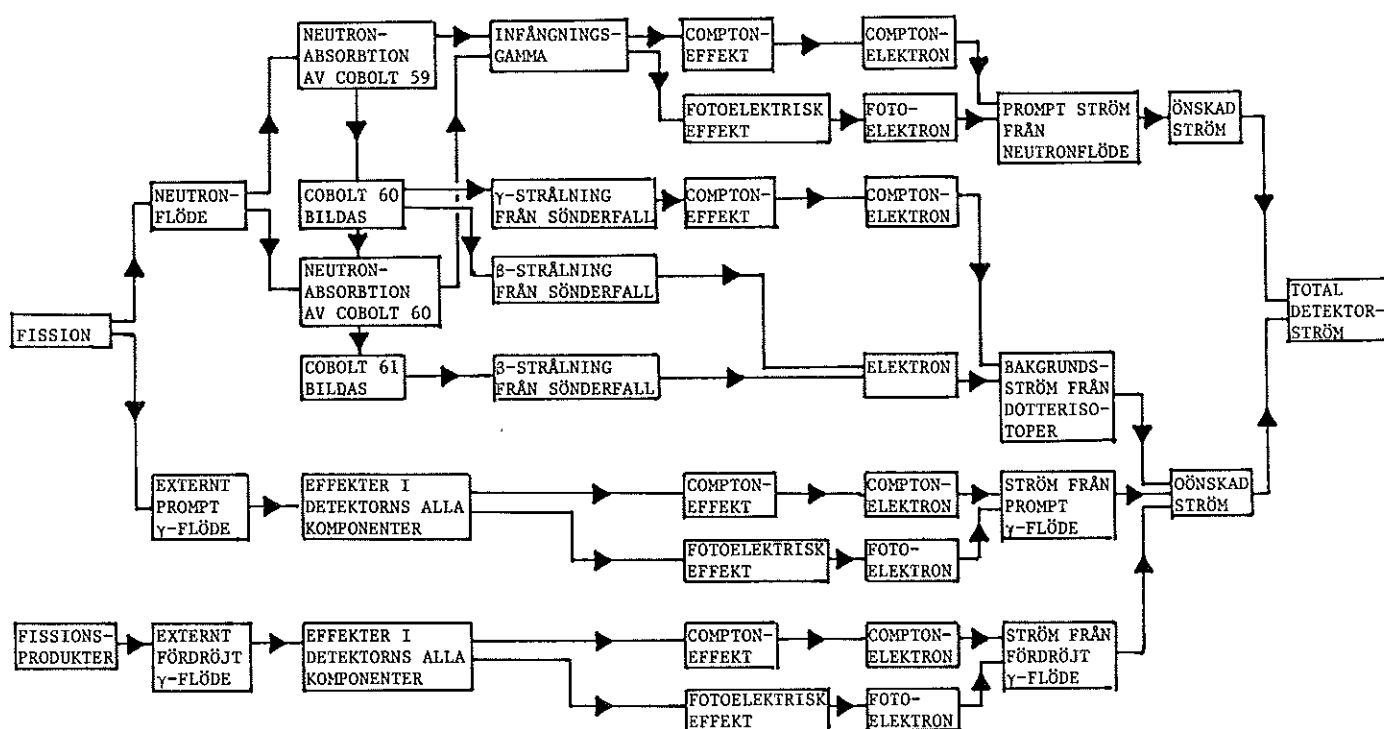
där $A (=5.93 \cdot 10^{22})$ är antalet coboltatomer i en obestrålad detektor och $P_{60} (=0.0124)$ är sannolikheten för att en comptonelektron skall bildas och transporteras till kollektorn. För Studsviks detektorer blir förhållandet mellan strömbidrag och relativ mängd ^{60}Co

$$\frac{I_{60}}{M_{60}} = 4.90 \cdot 10^{-7} \text{ A}$$

Även isotopen ^{61}Co ger ett bidrag till detektorströmmen genom sitt β -sönderfall. Elektronerna

har dock så låg energi att endast en ringa del förmår att lämna emittorn då denna är så tjock som i Studsviks detektorer. Strömmen är proportionell mot mängden ^{61}Co och uppgår till några nanoampere vilket är försumbart i förhållande till den totala detektorströmmen. För detektorer med tunnare emittor kan strömbidraget dock vara besvärande. Vid ett reaktorstopp minskar mängden ^{61}Co och därmed även strömmen från β -sönderfallet mycket snabbt. Redan 11 timmar efter nedkörningen har strömbidraget minskat med mer än 99 % av sitt forna värde. Vid uppstartningen av reaktorn kommer därför strömmen att vara helt försumbar och ej medföra någon risk för en prompt kritisk reaktor.

Den externa fördröjda γ -strålningen ger beroende på detektorns γ -känslighet ett ungefär konstant positivt eller negativt bidrag till detektorströmmen. Bidraget kan försummas i de flesta typer av reaktorer. Undantagna är sådana som har en extremt hög γ -bakgrund.



Figur 5 Schema över komponenterna i detektorströmmen.

7. UTVÄRDERING AV EXPERIMENT

För att verifiera giltigheten hos de tidigare uppställda teorierna gjordes utvärderingar av experimentella data från försök med coboltdetektorer i R2-reaktorn i Studsvik och i Ol-reaktorn i Oskarshamn. Avsikten med försöken i R2 var genomgripande, så här har en noggrann undersökning gjorts beträffande detektorströmmens alla komponenter. Målsättningen för Ol-försöken var lägre ställd så att här kunde endast bakgrundsströmmen från ^{60}Co behandlas.

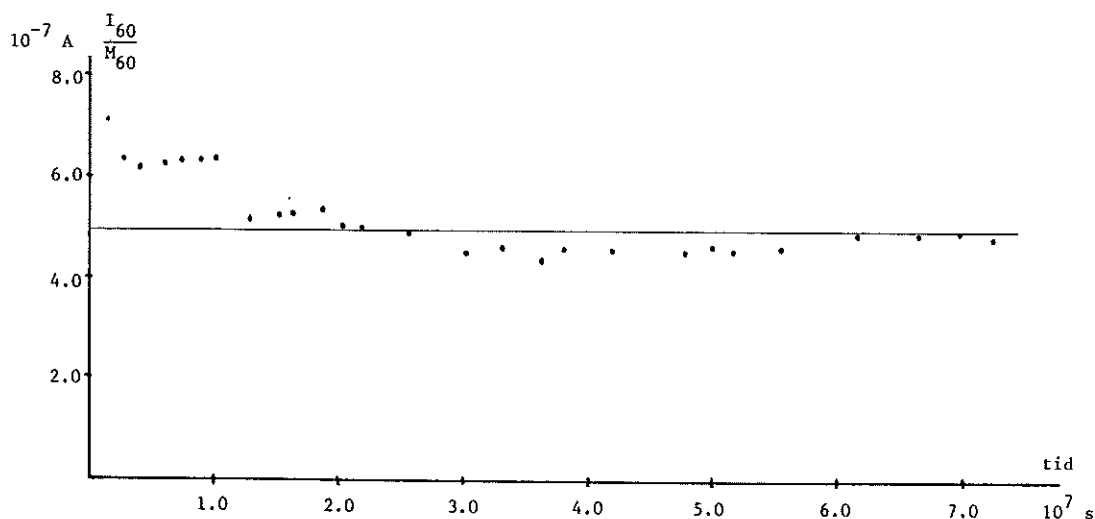
7.1 Riggen K162 i R2-reaktorn

Denna mätrigg monterades in i augusti 1974 och detektorströmmarna mättes kontinuerligt fram till våren 1977. Riggen var bestyckad med sex detektorer, två med vanadin-, två med magnesium- och två med coboltemittrar. Coboltdetektorerna benämns N15 och N16. Den förstnämnda var i drift under hela försöksperioden medan den andra havererade under våren 1975 och ersattes med en annan detektor benämnd N16_{ny}. Riggen var placerad ute i berylliumreflektorn, vilket bidrog till att ytterligare höja det redan höga flödet av termiska neutroner. Detta höga neutronflöde har gjort att detektorförändringarna uppkommit mycket snabbare än i en normal kraftreaktor. Det tidsintegrerade neutronflödet för varje detektor har med kännedom om flödesfördelningen i riggen erhållits från mätningar med sk moniteringstrådar.

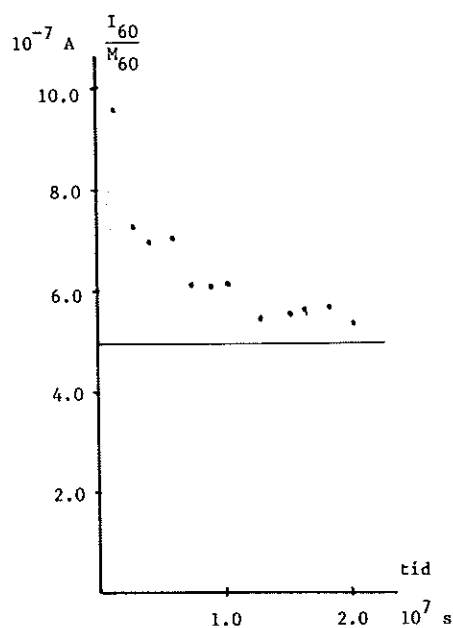
Fördröjda strömmar

Varje gång reaktorn varit avställd har detektorströmmen mätts. Det har gjorts så lång tid efter avställningen att alla eventuella strömbidrag från kortlivade isotoper har avklingat samt att komponenten från den externa fördröjda γ -strål-

ningen har försvunnit. Med kännedom om det tidsintegrerade neutronflödet, den tid som detektorn blivit bestrålad och hur länge sedan detektorn började bestrålas, har den teoretiska mängden ^{60}Co vid mättillfällena beräknats. Förhållandet mellan uppmätt bakgrundsström och relativ mängd ^{60}Co visas för detektorerna N15 och N16 i figurerna 6 och 7. Det teoretiska värdet $4.90 \cdot 10^{-7}$ A är inritat.



Figur 6 Förhållandet mellan uppmätt bakgrundsström och relativ mängd ^{60}Co för detektor N15.



Figur 7 Förhållandet mellan uppmätt bakgrundsström och relativ mängd ^{60}Co för detektor N16.

Avvikelserna för de sju första mättillfällena härrör troligen från den noll-drift hos förstärkaren som upptäcktes i januari 1975 och som där-efter justerades bort med jämna mellanrum. Noll-felet fick en stor inverkan eftersom strömmen från ^{60}Co var liten vid dessa tidpunkter. Förhållandet I_{60}/M_{60} är något högre för detektorn N_{16} och sannolikt beror detta antingen på någon tillverkningskillnad eller på någon förstärkar-skillnad, ty motsvarande skillnad återfinnes i känsligheten.

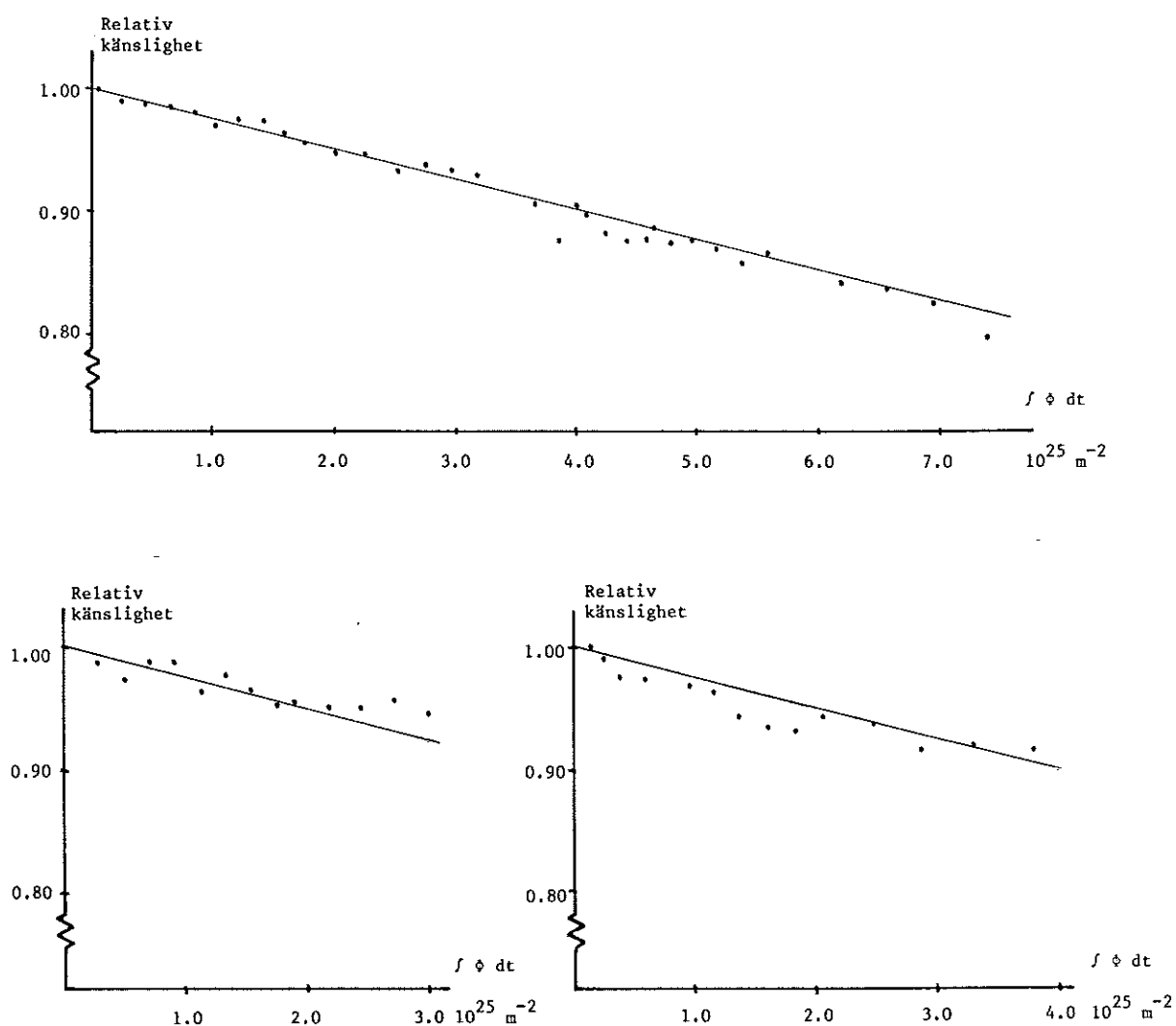
Detektorströmmen har mätts noggrant i samband med snabbstopp av reaktorn för att upptäcka eventuella strömbidrag från kortlivade isotoper som cobolt 61, nickel och aluminium. I Bilaga 4 visas detektor-strömmens avklingning för detektorerna N_{15} , med negativ γ -känslighet och N_{16}_{ny} , med ungefär lika stor positiv γ -känslighet. De är annars identiska.

Härifrån kan man sluta sig till att den externa fördröjda γ -strålningen ger ett bidrag i storleksordningen 10 nA. Att det är så stort beror på den höga γ -nivå som finns i R2-reaktorn. Detektorströmmen minskad med bidragen från ^{60}Co och extern fördröjd γ -strålning följer mycket väl avklingningen för neutronerna, vars halveringstid är 8.66 sekunder. Några bidrag från de kortlivade isotoperna går alltså ej att urskilja i detektorströmmen.

Prompt ström

För att kunna beräkna känsligheten måste momentana värden på prompt detektorström och termiskt neutronflöde bestämmas. Den totala detektorströmmen är uppmätt med jämna mellanrum under hela försöksperioden. Om bidraget från ^{60}Co avbackas fås den önskade strömmen. Det är emellertid något krångligare att mäta det momentana neutronflödet. För att göra detta utnyttjades strömmarna från vanadindetektorerna i riggen. Vanadindetektorernas utbränning kompenseras härvid. Då vanadindetektor N11 som ligger nära coboltdetektor N15, har strömmen från N11 använts för att, med hjälp av flödesfördelningen i riggen, beräkna det momentana termiska neutronflödet som N15 utsätts för. På samma sätt har vanadindetektor N12 använts för att bestämma neutronflödet för coboltdetektorerna N16 och N16_{ny}. En viss försiktighet måste dock iakttagas eftersom detektorerna med olika emitterar har olika snabba svar. Snabba flödesvariationer registreras ej av vanadindetektorerna men väl av coboltdetektorerna. För att minska risken för denna typ av fel har ett väldigt stort antal mätvärden använts och dessutom endast sådana där ett antal efter varandra liggande mät-punkter haft värden på detektorströmmen som endast varierat något eller några få nanoampere. Med

hjälp av ett datorprogram beräknades förhållandet mellan aktuell känslighet och känsligheten vid bestrålningens början för coboltdetektorerna N15, N16 och N16_{ny}. Den teoretiska relativa mängden ⁵⁹Co är inritad i figurerna.

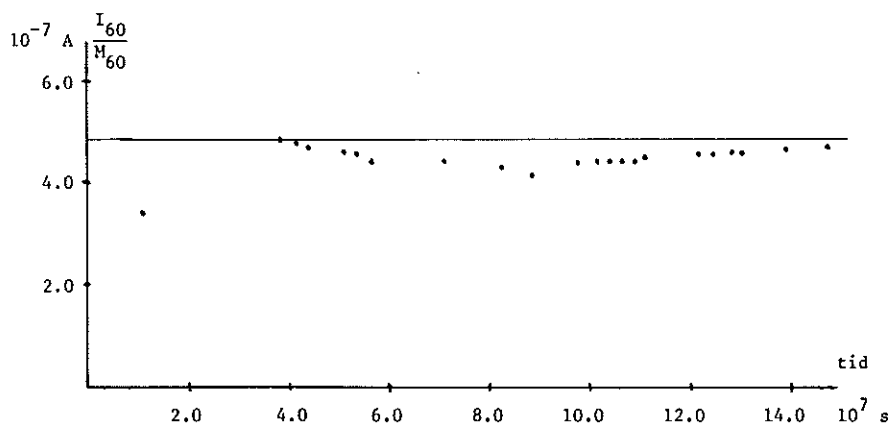


Figur 8 Känsligheten för termiska neutroner relativt känsligheten i obestrålat tillstånd för detektorerna N15 (överst), N16 (nere t v) och N16_{ny} (nere t h).

7.2 Sond 3 i Ol-reaktorn

Denna mätsond installerades i november 1974 och är fortfarande i drift. Den innehåller 8 st SPN-detektorer varav två har coboltemittrar. Dessa sitter emellertid så långt ifrån andra detektorer att det ej är möjligt att kunna bestämma det momentana neutronflödet. Därför har ej någon känslighetsanalys gjorts.

Det tidsintegrerade neutronflödet som cobolt-detektorerna utsatts för har dock bestämts. På samma sätt som för Kl62 har förhållandet mellan uppmätt bakgrundsström och relativ mängd ^{60}Co bildats.



Figur 9 Förhållandet mellan uppmätt bakgrundsström och relativ mängd ^{60}Co . Medelvärde för detektorerna i Ol.

Vid reaktoravställningen i augusti 1976 mättes detektorströmmen kontinuerligt ett dygn efter nedkörningen. Den största reström, bortsett från ^{60}Co -bidraget, uppmättes till 4 nA. Denna avklingade snabbt och efter 4 timmar understeg den 1 nA. Restströmmen kan sägas vara summan av bidragen från ^{61}Co , nickel och aluminium samt strömmen från den externa fördröjda γ -strålningen.

7.3 Slutsatser

Utvärderingen visar att det som väntat fanns två dominerande komponenter i detektorströmmen. En prompt del som är proportionell mot termiskt neutronflöde och mängden ^{59}Co i emittorn och en fördröjd del som orsakas av ^{60}Co -sönderfallet och är proportionell mot mängden av isotopen i emittorn. I reaktorer med extremt hög extern γ -strålning tillkommer dessutom en konstant komponent i detektorströmmen. Övriga bidrag är försumbara.

8. DETEKTORMODELL

Utifrån de teoretiska resonemangen och de försök som gjorts kan man bygga upp en modell för detektorns strömmar. Modellen skall ligga till grund för den kompensering som måste göras för detektorns förändringar. Den tar hänsyn till de två dominerande komponenterna i detektorströmmen och har följande utseende:

$$I_{\text{mod}} = I_{\text{pr}} + I_{60}$$

$$I_{\text{pr}} = K \cdot \phi_{\text{th}} \cdot M_{59}$$

$$I_{60} = B \cdot M_{60}$$

M_{59} och M_{60} beräknas ur matrisen

$$\begin{bmatrix} M_{59}(kh+h) \\ M_{60}(kh+h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E1 & 0 \\ \frac{\sigma_{59} \cdot \phi \cdot \xi \cdot (E2-E1)}{\sigma_{59} \cdot \phi \cdot \xi - \lambda_{60} - \sigma_{60} \cdot \phi \cdot \xi} & E2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{59}(kh) \\ M_{60}(kh) \end{bmatrix}$$

där $E1 = \exp(-\sigma_{59} \cdot \phi \cdot \xi \cdot h)$

$$E2 = \exp(-\lambda_{60} \cdot h - \sigma_{60} \cdot \phi \cdot \xi \cdot h)$$

Kompenseringen sker i förstärkaren där den teoretiska bakgrundsströmmen från ^{60}Co först backas av från den verkliga detektorströmmen. Den resterande signalen som antas bestå endast av det prompta bidraget förstärks med en faktor G/M_{59} , vars nämnare kompenserar för utbränningen. Förstärkarens utsignal blir då

$$Y = \frac{G}{M_{59}} \cdot (I_{\text{det}} - B \cdot M_{60})$$

Neutronflödet kan uppskattas med hjälp av förstärkar-signalen och fås med

$$\phi_e = \frac{Y}{K \cdot G}$$

En perfekt modell innebär att $I_{\text{mod}} = I_{\text{det}}$ vilket medför att $\phi_e = \phi_{\text{th}}$, dvs en korrekt uppskattning av neutronflödet.

9. ANALYS AV PARAMETERAVVIKELSER

Det är ofrånkomligt att detektormodellen ej perfekt motsvarar en verklig detektor då endast hänsyn tas till detektorns två dominerande strömkomponenter. Avvikelserna kan yttra sig på många olika sätt men i analysen här kommer endast tre typer att beaktas. Tillsammans kan de dock representera de flesta tänkbara avvikelserna. Parameteravvikelserna ger upphov till skillnader mellan estimerat och verkligt neutronflöde. Skillnaden skall av säkerhetsmässiga skäl hållas under 2.0 % av det maximala neutronflödet. Efter en mätning av bakgrundsströmmen från ^{60}Co och en påföljande kalibrering av känsligheten ligger felet under denna nivå. Det kommer emellertid att växa allt eftersom detektorn bestrålas. För att få reda på när mätning av bakgrundsströmmen och kalibrering av känsligheten åter måste göras, för att felet i neutronflöde skall hållas under den önskade nivån, gjordes simuleringar med dator.

9.1 Simulering

Förebilden för de detektorer som simulerades var de som satt i riggen K162 i R2-reaktorn. Från dessa hämtades detektordata och känsligheten vid simuleringen sattes till $5 \cdot 10^{-25} \text{ A/m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) och proportionalitetskonstanten för bakgrundsströmmen sattes till $5 \cdot 10^{-7} \text{ A}$. Neutronflödet i R2 försökte också efterliknas. Då systemet är avsett att arbeta i effektintervallet överstigande 10 % av fulleffekt, fick det simulerade neutronflödet variera mellan 7 % och 100 % av maximalt flöde. Simuleringen motsvarade 20 000 timmars drift vilket skulle utsätta detektorerna för fluensen $7 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-2}$. Simuleringen avbröts dock då felet i neutronflöde översteg 2 % av maxflöde.

Vid simuleringarna varierades detektorns parametrar för att studera deras inverkan på det estimerade flödet, medan kompenseringens enhet hela tiden följde den teoretiska modellen. En av de parametrar i detektorn som varierades för de olika simuleringarna var flödesdepressionsfaktorn, (ξ , Bilaga 2) vilken inverkar på hastigheten med vilken isotopsammansättningen förändras i emittorn. Den fick anta värden mellan 0.8 och 1.2 av det teoretiska. Felets fysikaliska tolkning kan förutom flödesdepressionen vara felaktigheter i neutrontvärsnittet. En annan var proportionalitetskonstanten B_v mellan ström från och relativ mängd i emittorn av isotopen ^{60}Co . Denna fick variera mellan 0.6 och 1.4 av det teoretiska värdet. Felet kan tolkas som en positiv eller negativ okänd ström från detektorn (t ex från ^{61}Co). Den tredje och sista är den konstanta komponent (I_x) som antas motsvara ett eventuellt bidrag från den fördröjda γ -strålningen. Strömbidraget antogs vara 0, -5 eller -10 nanoampere. Dessa parameteravvikelser kombinerades på alla sätt vid simuleringen för att avgöra deras resulterande inverkan på felet mellan verkligt och estimerat neutronflöde. Den simulerade detektorströmmen kan tecknas

$$I_{\text{det}} = K \cdot \phi_{\text{th}} \cdot M_{59v} + B_v \cdot M_{60v} + I_x$$

där M_{59v} och M_{60v} beräknas som i kapitel 8 men med ett annat värde på flödesdepressionsfaktorn.

Kompenseringen för detektorns förändringar sker emellertid helt enligt den teoretiska modellen. Det härifrån estimerade neutronflödet blir

$$\phi_e = \frac{M_{59v}}{M_{59}} \cdot \phi_{\text{th}} + \frac{B_v \cdot M_{60v} - B \cdot M_{60}}{K \cdot M_{59}} + \frac{I_x}{K \cdot M_{59}}$$

9.2 Resultat från simuleringen

Den första simuleringen gjordes för en helt ideal detektor. Här kompeniserades ej för detektorns förändringar. Vid fluensen $1.25 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-2}$ översteg felet i estimerat neutronflöde nivån 2 %.

Vid nästa simulering medtogs alla felaktigheterna i detektorn. Isotopförändringen i emittern kompeniserades kontinuerligt enligt den modell som tidigare framtagits. Förändringarna beräknades med hjälp av det estimerade neutronflödet. Utan γ -bidrag uppnåddes fluensen $1.72 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-2}$ innan tillåten nivå överstegs. Med ett bidrag på -5 nA från den fördröjda γ -strålningen uppnåddes fluensen $1.25 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-2}$ och med bidraget -10 nA endast $0.62 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-2}$.

Utifrån dessa fluenser kalibrerades detektorernas känslighet vid den tredje simuleringen så att tiden mellan två kalibreringar understeg den tid från förra simuleringen då nivån 2 % uppnåddes. Vid kalibreringen subtraherades detektorströmmen först med den teoretiska strömmen från isotopen ^{60}Co . Sedan beräknades ett nytt värde för modellens relativa mängd av isotopen ^{59}Co . Härvid antas det att det termiska neutronflödet kan mätas på något annat sätt (t ex med en rörlig detektor speciellt avsedd för kalibrering). Modellens nya relativa mängd ^{59}Co blir

$$M_{59} = \frac{I_{\text{det}} - B \cdot M_{60}}{\Phi_{\text{th}} \cdot K}$$

Man bör dock observera att denna storhet ej överensstämmer med detektorns eftersom någon korrekt subtraktion av detektorns verkliga bakgrundsström ej görs. Utan γ -bidrag uppnåddes fluensen

$1.81 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-2}$, med bidraget -5 nA uppnåddes
 $1.54 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-2}$ och med -10 nA uppnåddes
 $0.62 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-2}$. Förbättringen i jämförelse med
 förra simuleringen är obetydlig och detta beror
 på att en kalibrering är mer eller mindre värde-
 lös utom för ett litet intervall kring det neu-
 tronflöde som kalibreringen gjordes i, om man
 ej har noggrann kontroll över bakgrundsströmmen.
 Här gjordes kalibreringen då neutronflödet upp-
 gick till 73 % av det maximala.

Innan man kalibrerar känsligheten (dvs beräknar
 ett nytt värde på M_{59}) bör man mäta strömbidraget
 från ^{60}Co . Detta kan göras vid ett reaktorstopp.
 Vid den sista simuleringen föregicks kalibreringen
 av en mätning av bakgrundsströmmen från ^{60}Co . Ett
 nytt värde för proportionalitetskonstanten B be-
 räknades härvid enligt

$$B = \frac{I_{60} \text{ (uppmätt)}}{M_{60}}$$

Sedan gjordes kalibreringen av känsligheten på
 samma sätt som vid förra simuleringen. Det visade
 sig att felet i estimerat neutronflöde hela tiden
 höll sig under den tillåtna nivån (2 %), trots
 att tiden mellan de "manuella" mätningarna var
 samma som vid förra simuleringen.

Man kan dra den slutsatsen att ju bättre man kan
 uppskatta det verkliga bakgrundsbidraget från
 ^{60}Co , inom desto större flödesintervall medför
 kalibreringen en minskning av felet i estimerat
 neutronflöde.

10. KOMPENSERING MED DATOR

Kompenseringen av detektorns förändringar görs i förstärkarenheten, där först den teoretiska bakgrundsströmmen subtraheras från detektorströmmen. Sedan förstärks den resterande signalen så att detektorns minskade känslighet för termiska neutroner kompenseras.

En dator skall med jämna mellanrum mäta strömmen från detektorn (efter förstärkaren) och från denna bestämma det termiska neutronflödet så att förändringen i detektorns isotopsammansättning kan beräknas. Med kännedom om isotopsammansättningen kan förstärkning och bakgrundsström beräknas och ställas ut till förstärkaren via digital-analog-omvandlare.

Datorn skall betjäna en fjärdedel av reaktorns detektorer vilket innebär åtta till tio mätsonder med vardera fyra detektorer.

10.1 Val av samplingsintervall

För att den beräknade isotopsammansättningen skall överensstämma med detektorns verkliga är det viktigt att göra en väntevärdesriktig uppskattning av det termiska neutronflödet. Förändringarna i neutronflöde i en reaktor är normalt så långsam att det är tillräckligt att mäta detektorströmmen några gånger per timme för att ej gå miste om några variationer i neutronflöde. Det är emellertid ej lämpligt att beräkna nya värden för isotopsammansättningen i emittern varje gång som detektorströmmen mätts. Anledningen till detta är att argumenten till exponentialfunktionerna, som ingår i uttrycken för isotopsammansättningen, blir så små att signifikanta siffror förloras. Antag att argumentet ej får understiga 10^{-5} , samt att det minimala neutronflöde som detektorn utsätts för vid kontinuerlig drift är $10^{17} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Den mini-

var tjugonde timme beräknar nya värden på de relativa mängderna av ^{59}Co och ^{60}Co i emittern. Dessutom skall vissa rutiner exekveras på kommando från en operatör.

En initieringsrutin läser in antalet mätsonder, antalet detektorer i de olika sönerna och data för varje detektor. Detta görs via ett tangentbord, som sedan ej längre används. Operatören påverkar sedan datorn genom en potentiometer och en switch. Då switchen påverkas är det en signal till datorn att avläsa potentiometerens värde.

Operatören kan från en meny välja mellan sex olika rutiner för att antingen ändra på eller bara skriva ut parametrarna på bildskärmen. De olika rutinerna är:

Samplingsint	Väljer samplingstid för mätningen av detektorströmmen. Den kan väljas till 10, 20, 30, 40, 50 eller 60 minuter.
Nydetektor	Initierar en ny detektor som t ex ersatt en som havererat.
Matbakgrund	Skall exekveras då reaktorn är avstängd och fördröjd γ -strålning avklingat. Rutinen mäter bakgrundsströmmen och beräknar en ny proportionalitetskonstant mellan bakgrundsström och relativ mängd ^{60}Co .
Changepar	Ändrar på önskad parameter i önskad detektor. Vid ändring av känsligheten ändras en parameter (uvar) så att den teoretiska utbränningen anpassas till den uppmätta enligt sambandet

$$\frac{\text{ny känslighet}}{\text{initialkänslighet}} =$$

$$= \exp(-\sigma_{59} \cdot \xi \cdot \text{uvar} \cdot \text{totfite})$$

där totfite är fluensen som detektorn utsatts för. Vid ändring av bakgrundsströmmen kommer proportionalitetskonstanten för denna att ändras som i rutinen Matbakgrund.

mala tiden mellan två beräkningar av isotopsammansättningen är 10 timmar och fås ur uttrycket

$$10^{-5} < \sigma_{59} \cdot \xi \cdot \Phi_{th} \cdot h_{min}$$

Det är ej heller önskvärt att låta detektorn förändras för mycket innan ny isotopsammansättning beräknas, ty det skulle medföra felaktigheter i det estimerade neutronflödet. Antag att man vill hålla minskningen i relativa mängden ^{59}Co (relativa minskningen i neutronkänslighet) under 0.1 % och det maximala neutronflöde som detektorn utsätts för är $3 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Serietutveckling ger uttrycket

$$0.1 \cdot 10^{-2} > \sigma_{59} \cdot \xi \cdot \Phi_{th} \cdot h_{max}$$

ur vilket den maximala tiden mellan två beräkningar av isotopsammansättningen fås. Den blir 34 timmar.

I datorprogrammen mäts detektorströmmen enligt operatörens önskemål en till sex gånger per timme.

Medelvärden av dessa strömmar används för att beräkna det flöde av termiska neutroner från vilket en ny isotopsammansättning beräknas. Detta görs var tjugonde timme.

10.2 Beskrivning av datorprogram

Datorprogrammet är skrivet i Pascal på en LSI-II minidator från Digital Equipment och återfinnes i Bilaga 7.

Programmet skall med jämna mellanrum exekvera den rutin som avläser detektorströmmen och som

Showpar	Visar önskad detektors parameteruppsättning på bildskärmen.
Test	Exakt vad denna rutin skall göra är ej bestämt men då den exekveras är detektorn bortkopplad från förstärkaren och insignalen till denna väljs med en potentiometer. När denna rutin exekveras kommer den periodiska registreringen av detektorströmmarna ske som tidigare men istället för att mäta detektorströmmen används den ström som uppmättes vid mättillfället omedelbart före det att rutinen Test började exekveras.

Datorprogrammet skall betjäna upp till tio mätsonder med högst fyra detektorer i varje sond.

Varje mätsond beskrivs av en post som innehåller information om antalet detektorer i sonden samt en post för varje detektor.

Detektorposterna innehåller information om

- när detektorn togs i drift
- totalt mottagen stråldos
- tid sedan bestrålningen började
- relativa mängder ^{59}Co och ^{60}Co
- känsligheten för termiska neutroner
- förstärkning
- bakgrundsström
- proportionalitetskonstant mellan bakgrundsström och relativ mängd ^{60}Co
- parameter som anpassar teoretisk utbränning till uppmätt utbränning
- datum då parametrar ändrades.

Problemet med de gemensamma variablerna är löst på ett sådant sätt att den periodiskt exekverade mät-rutinen arbetar med en uppsättning variabler och operatörsrutinerna med en annan.

Varje gång mätrutinen skall exekveras testas en logisk variabel. Om den är sann har en operatörs-rutin exekverats färdigt, i vilken parametrar har ändrats. I så fall överförs operatörsrutinens para-metrar till mätrutinens innan rutinen exekveras vidare. Sedan sätts den logiska variabeln till falsk.

På motsvarande sätt testas om den logiska variabeln är falsk när en operatörsrutin skall exekveras. Om så är fallet överförs mätrutinens parametrar till operatörsrutinens för att denna rutin skall ha så aktuella parametrar som möjligt. När opera-törsrutinen exekverats färdigt sätts den logiska variabeln till sann.

11. AVSLUTNING

Så snart ett datorsystem är valt och datorprogrammet är implementerat i detta kan detta nya LPRM-system med SPN-detektorer inmonteras i något av våra svenska kärnkraftverk för vidare uttestning.

Datorprogrammets rutiner för kommunikation med förstärkarenheten kan behöva modifieras något för att passa det datorsystem som skall användas.

REFERENSER

1. SOVKA, J A
Response of Cobalt Neutron Flux Detectors
AECL-3368, Chalk River, Ontario 1969
2. JASCHIK, W and SEIFRITZ, W
Model for Calculating Prompt-Response Self
Powered Neutron Detectors
Nuclear Science and Engineering: 53, 1974
3. GLASSTONE, S
Principles of Nuclear Reactor Engineering
D Van Nostand Company, Inc, USA 1955
4. Hazards Summary Report for the Aktiebolaget
Atomenergi R2 Reactor
Allis-Chalmers Manufacturing Company
Washington D C 1955
5. Table of Isotopes, Sixth Edition
John Wiley & Sons, Inc, USA 1968
6. SÖDERLUND, B
Verifikationsprov av SPN-detektorer
AE-IM-1019, Studsvik 1977
7. SÖDERLUND, B
PRM-system. Slutrapport över Verifikationsprov
av SPN-detektorer i Oskarshamn 1 under 1977/78
K5-78/8, Studsvik 1978
8. SÖDERLUND, B
Verifikationsprov av SPN-detektorer i 01.
Slutrapport 1978/79
K5-80/10, Studsvik 1980
9. JOHANSSON, O
Mätnoggrannhet hos SPN-detektorer
VI-1006, Studsvik 1976
10. SJÖÖQUIST, S
Funktionsbeskrivning SPND-system
Studsvik 1982
11. EKMAN, T, KARLSSON, J
Pascal för dig som kan programmera
Studentlitteratur, Lund 1981
12. ELMQVIST, H, MATTSSON, S E, OLSSON, G
Datorer i Reglersystem, Realtidsprogrammering
Institutionen för Reglerteknik, LTH, Lund 1981

BILAGOR

1. Lösning av systemekvationerna
2. Flödesdepressionsfaktorn
3. Rigen K162 i R2-reaktorn
4. Avklingning vid scram
5. Simulering
6. Beskrivning av förstärkarens funktioner
7. Realtidsprogram

LÖSNING AV SYSTEMEKVATIONERNA

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} N_{59} \\ N_{60} \\ N_{61} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi & 0 & 0 \\ \sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi & -(\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi) & 0 \\ 0 & \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi & -\lambda_{61} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{59} \\ N_{60} \\ N_{61} \end{bmatrix}$$

Förkortat skrivit:

$$\frac{dN}{dt} = A \cdot N$$

Inför beteckningarna nedan för att minska skrivarbetet.

$$x = \sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi$$

$$z = \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi$$

$$l = \lambda_{60}$$

$$k = \lambda_{61}$$

$$\text{Då fås matrisen } A = \begin{bmatrix} -x & 0 & 0 \\ x & -(l+z) & 0 \\ 0 & z & -k \end{bmatrix}$$

Lösningen till systemet är

$$N(kh+h) = e^{A \cdot h} \cdot N(kh)$$

och $e^{A \cdot h}$ beräknas med hjälp av den inversa laplacetransformen enligt

$$e^{A \cdot h} = \mathcal{L}^{-1} (s \cdot I - A)^{-1}$$

$$(s \cdot I - A) = \begin{bmatrix} s+x & 0 & 0 \\ -x & s+l+z & 0 \\ 0 & z & s+k \end{bmatrix}$$

Matrisinversion

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} s+x & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -x & s+l+z & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -z & s+k & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

ger efter vissa räkningar

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \frac{1}{s+x} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{x}{(s+x)(s+l+z)} & \frac{1}{s+l+z} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{x \cdot z}{(s+x)(s+l+z)(s+k)} & \frac{z}{(s+l+z)(s+k)} & \frac{1}{(s+k)} \end{array} \right]$$

Invers laplacetransformering med hjälp av tabell
ger

$$e^{A \cdot h} = \begin{bmatrix} E11 & 0 & 0 \\ E21 & E22 & 0 \\ E31 & E32 & E33 \end{bmatrix}$$

där

$$E11 = \exp(-\sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi \cdot h)$$

$$E21 = \sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi \cdot \frac{(\exp(-\sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi \cdot h) - \exp(-(\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi) \cdot h))}{(\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi - \sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi)}$$

$$E22 = \exp(-(\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi) \cdot h)$$

$$E31 = \sigma_{59} \cdot \sigma_{60} \cdot \Phi^2 \cdot \xi^2 \cdot \frac{\exp(-\sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi \cdot h)}{(\lambda_{61} - \sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi) (\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi - \sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi)} +$$

$$+ \frac{\exp(-(\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi) \cdot h)}{(\sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi - \lambda_{60} - \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi) (\lambda_{61} - \lambda_{60} - \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi)} +$$

$$+ \frac{\exp(-\lambda_{61} \cdot h)}{(\sigma_{59} \cdot \Phi \cdot \xi - \lambda_{61}) (\sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi + \lambda_{60} - \lambda_{61})}$$

$$E32 = \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi \cdot \frac{(\exp(-(\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi) \cdot h) - \exp(-\lambda_{61} \cdot h))}{(\lambda_{61} - \lambda_{60} - \sigma_{60} \cdot \Phi \cdot \xi)}$$

$$E33 = \exp(-\lambda_{61} \cdot h)$$

FLÖDESDEPRESSIONSFAKTORN

En SPN-detektor som är placerad i en reaktor och utsatt för ett neutronflöde orsakar en minskning av detta flöde. Minskningen beror på neutronabsorption i detektorn och är intimt förknippad med neutrontvärsnittet för detektorns olika komponenter. Ett högt neutrontvärsnitt medför en stor minskning av neutronflödet.

Flödet som träffar emittorn är ej representativt för flödet i detektorns omgivning. Man har infört ett förhållandetal; flödesdepressionsfaktorn ξ som anger förhållandet mellan neutronflödet som träffar emittorn och det ostörda flödet i detektorns omgivning.

$$\xi = \frac{\phi_{\text{emitter}}}{\phi_{\text{omgivning}}}$$

Flödesdepressionsfaktorn inverkar på såväl den intensitet med vilken emittorn bränns ut som den hastighet som parasitströmmar uppkommer med. Dess direkta inverkan på detektorns känslighet elimineras vid kalibreringen av detektorn.

Flödesdepressionsfaktorn varierar med energin hos neutronerna och är störst för de neutroner som har lägst energier. För en obestrålad cobolt-emitter med radien 1.0 mm blir flödesdepressionsfaktorn 0.73 om man bildar ett medelvärde för termiska neutroner av olika energier. Denna ökar något med utbränningen, beroende på att de bildade isotoperna har lägre tvärsnitt än de gamla. Ökningen är emellertid så liten att man kan använda ett medelvärde för detektorns hela livslängd. Detta medelvärde är uppskattat till 0.74.

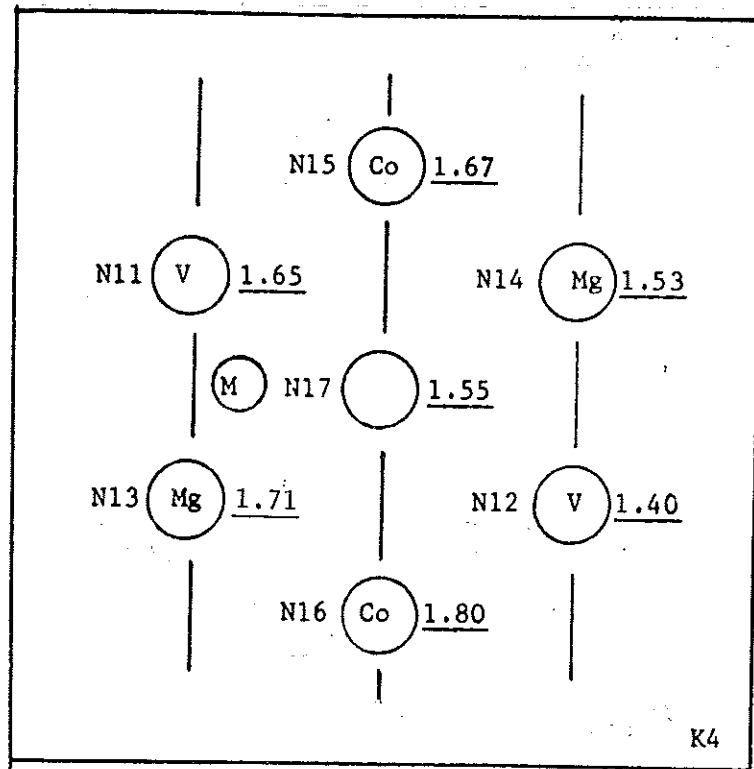
RIGGEN K162 I R2-REAKTORN

Riggen var placerad ute i berylliumreflektorn i position K4. Man ville nämligen inte att styrstavarna skulle störa neutronflödet i riggen.

A	A	B	B	B	B	B	B	A	A
A	A	B	F	F	F	F	B	A	A
B	B	B	F	F	F		B	B	B
B	F	F		F	F	F	F	F	K162
B	F	F	F	A	A		F	F	B
B	F	F		A	A	F	F	F	B
B	F	F	F	F	F		F	F	B
B	A	A		F	F	F	B	B	B
B	A	A	F	F	F	F	B	A	A
B	B	B	B	B	B	B	B	A	A

R2-reaktorn med riggen K162 sedd uppifrån. De svarta fälten betecknar styrstavar, F betecknar bränsleelement, B betecknar berylliumreflektorn och A betecknar aluminiumelement.
(Källa: Referens 4)

Riggen hade sex detektorer benämnda N11 till N16. Dessa satt placerade enligt figuren på nästa sida. En sjunde detektorposition fanns också där en detektor för kalibrering kunde sättas in. I positionen markerad "M" var moniteringstrådar placerade. Med hjälp av dessa kunde fluensen bestämmas. Siffrorna till höger om detektorpositionerna anger neutronflödesfördelningen i riggen. Denna har bestämts genom experiment.



Riggen K162.

Vid känslighetsanalysen användes neutronflödesfördelningen för att bestämma det lokala momentana flödet för detektorerna N15 och N16. Med hjälp av strömmen från detektor N11 beräknades neutronflödet som denna detektor utsattes för enligt

$$\phi_{N11} = \frac{I_{N11}}{K_{van} \exp(-\sigma_{van} \cdot \xi_{van} \cdot \phi \cdot t)}$$

där

$$\sigma_{van} = 5.1 \cdot 10^{-28} \text{ m}^{-2}$$

$$\xi_{van} = 0.96$$

Sedan beräknades neutronflödet som coboltdetektor N15 utsätts för.

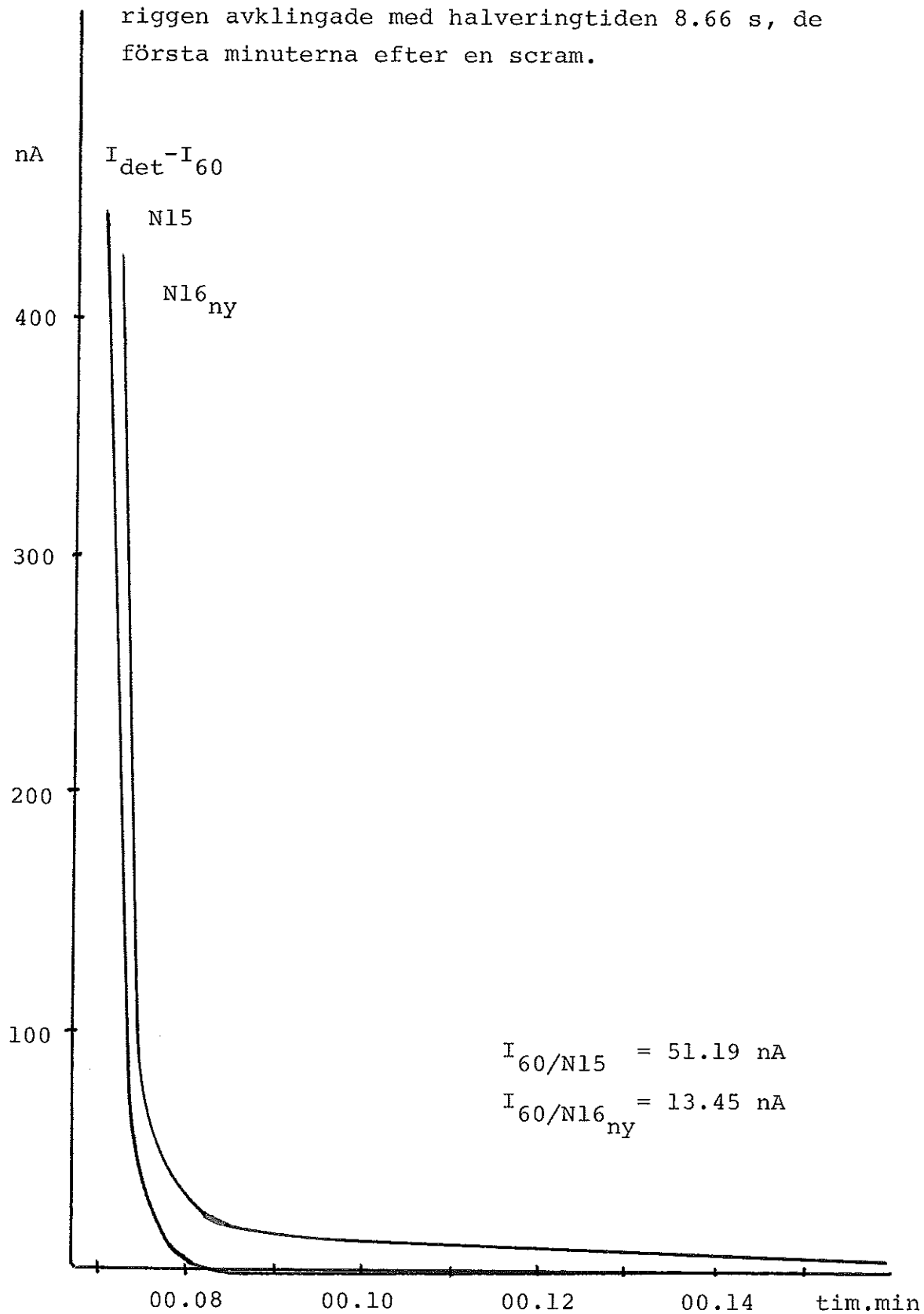
$$\phi_{N15} = \phi_{N11} \cdot \frac{1.67}{1.65}$$

På samma sätt användes strömmen från detektor N12 för att bestämma neutronflödet för detektor N16.

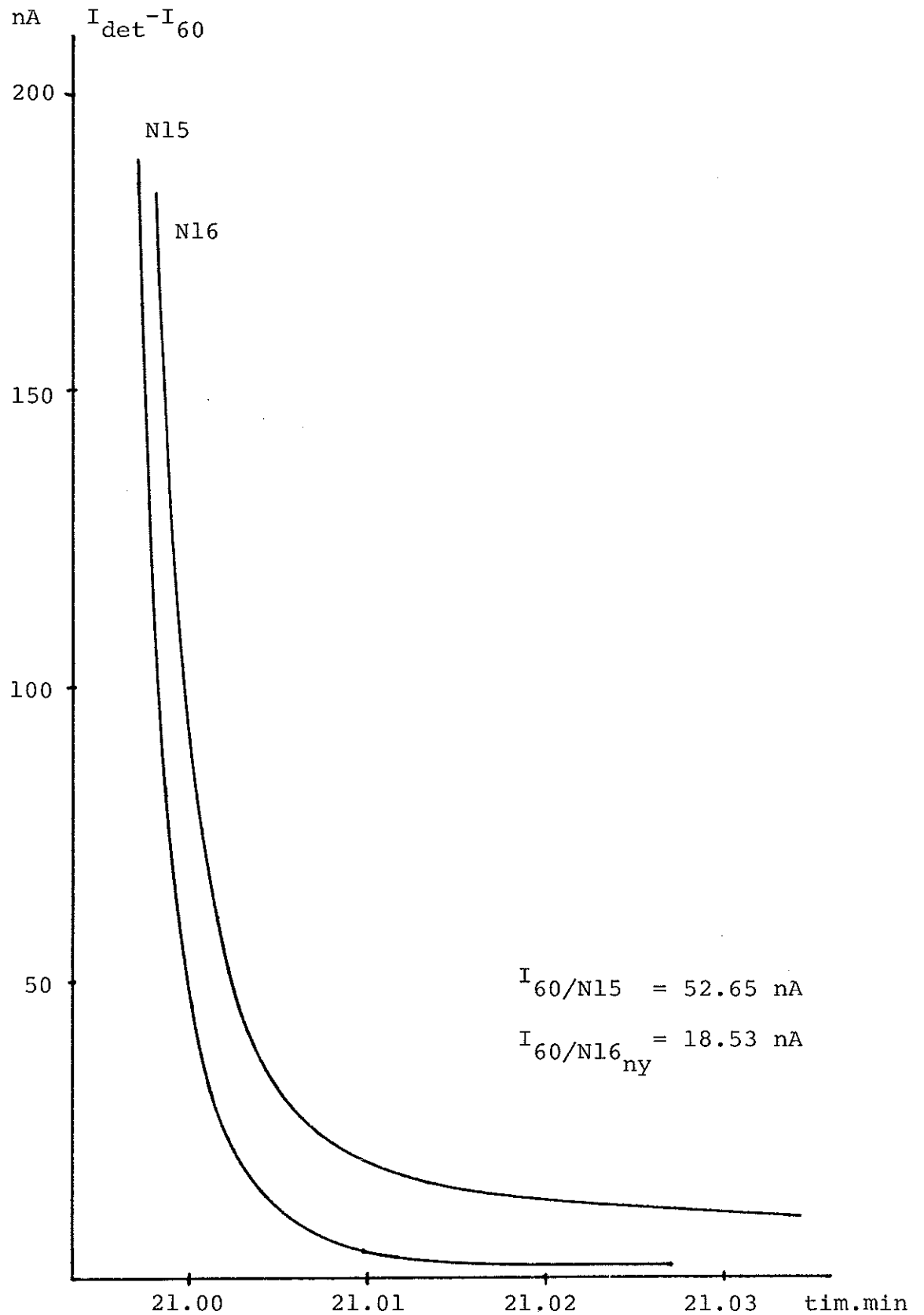
Då känsligheten hos vanadindetektorerna ej är känd med någon större noggrannhet kan detta ge systematiska fel i neutronflödet för coboltdetektorerna. Därför har endast en relativ utbränningsanalys gjorts.

AVKLINGNING VID SCRAM

Eftersom riggen Kl62 var placerad långt ifrån styrstavarna kan det antas att neutronflödet i riggen avklingade med halveringstiden 8.66 s, de första minuterna efter en scram.



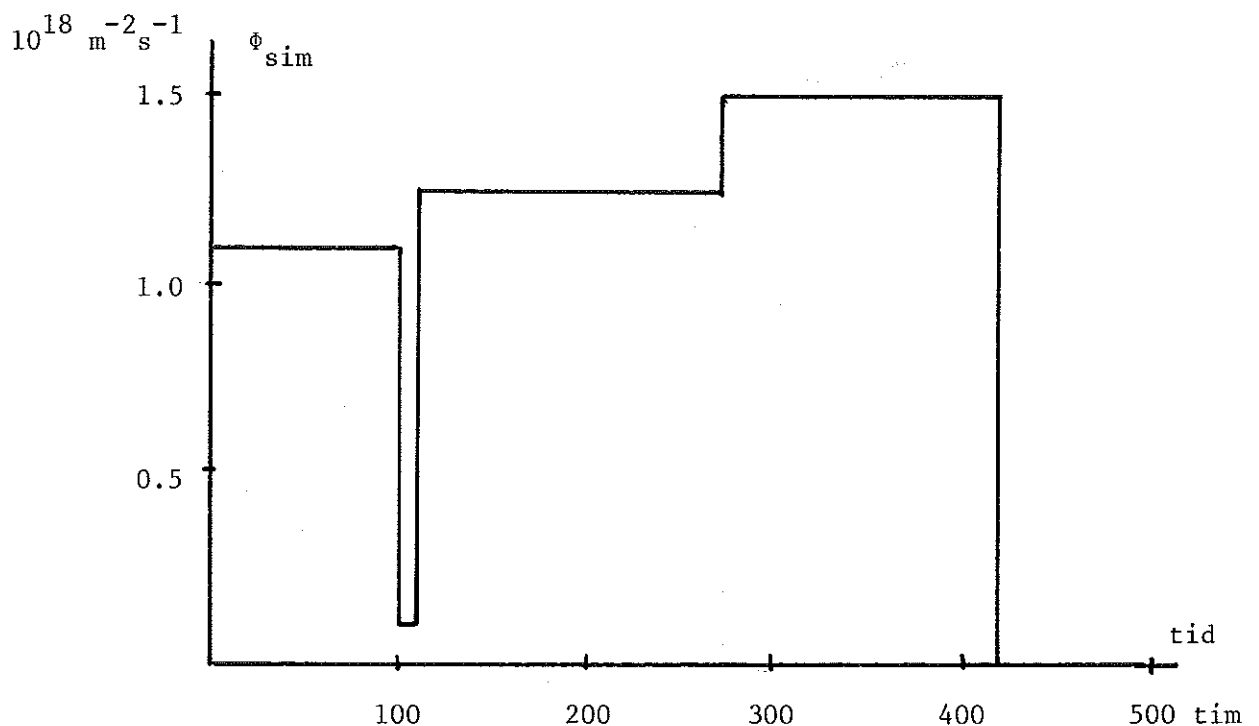
Den prompta detektorströmmens avklingning vid scram 76 03 02.



Den prompta detektorströmmens avklingning vid
scram 76 04 12.

SIMULERING

Vid simuleringen försökte flödesvariationen i riggen Kl62 i R2-reaktorn att efterliknas. En 500 timmar lång period återkom 40 gånger under en simulering. Under periodens första 420 timmar varierade neutronflödet mellan $0.1 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ och $1.5 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Detta utsätter detektorn för fluensen $1.93 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-2}$. Flödet var sedan noll under periodens resterande 80 timmar, vilket motsvarar ett normalt driftstopp i R2.

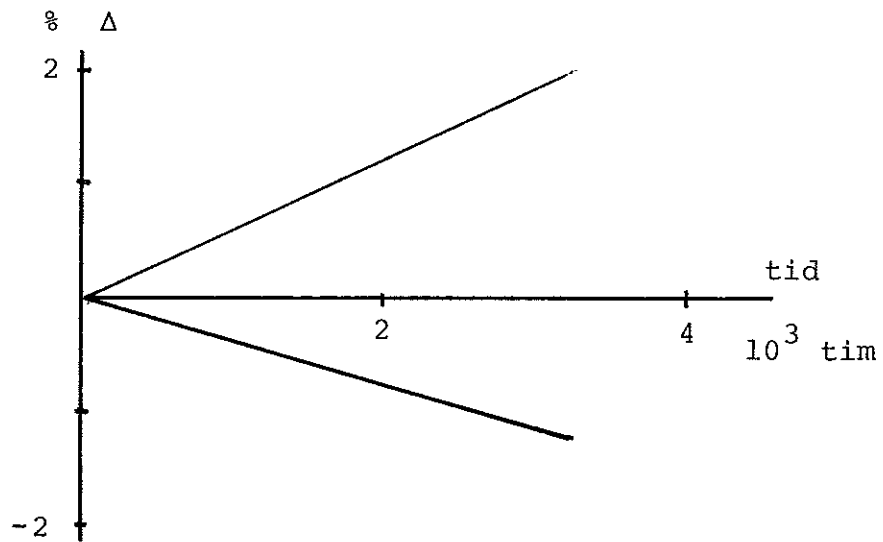


Flödesvariationen vid simuleringen.

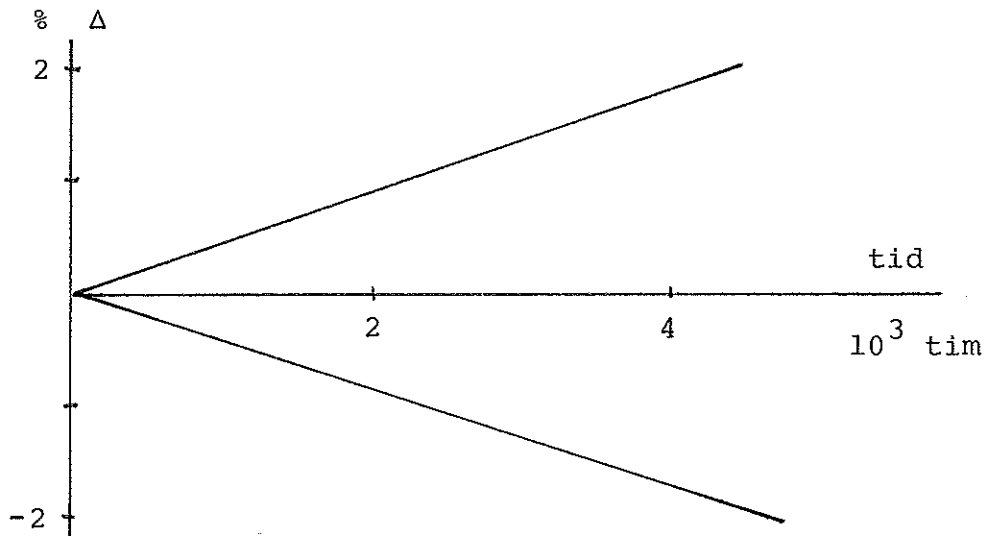
Kriteriet på detektorernas mätnoggrannhet vid simuleringen är att skillnaden mellan estimerat och simulerat neutronflöde skall vara lägre än 2 % av maximalt flöde. Detta skall gälla för flöden överstigande 7 % av maximalt neutronflöde, dvs för alla flöden under periodens första 420 timmar. Felet i neutronflöde relativt maxflöde kan tecknas

$$\Delta = \frac{\phi_e - \phi_{\text{sim}}}{\phi_{\text{max}}}$$

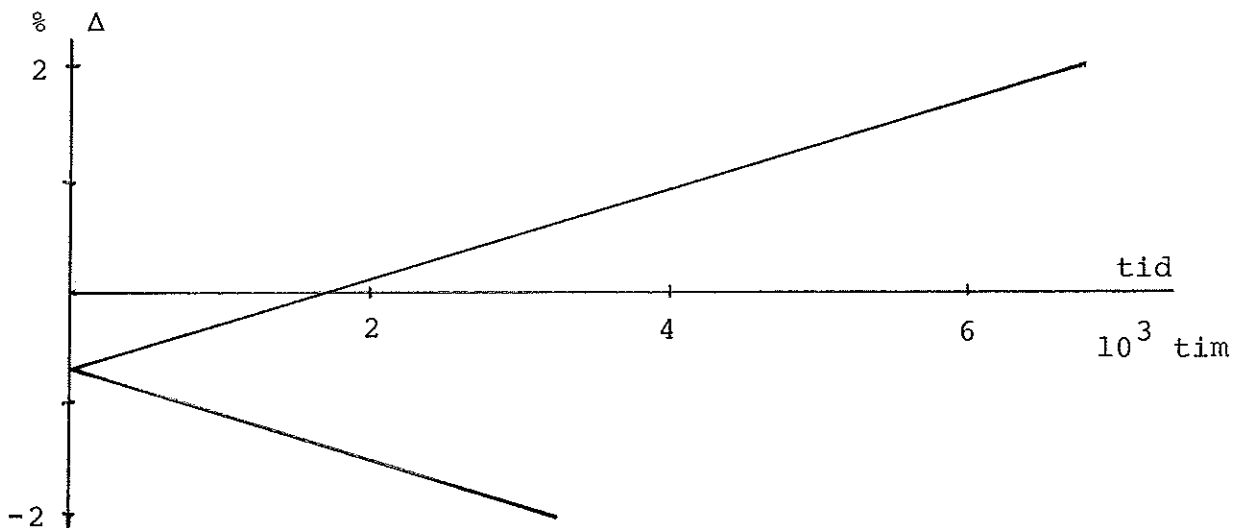
Området i varje figur som begränsas av de båda kurvorna visar de värden som storheten Δ antar för olika flöden inom kriterieintervallet och för olika typer av skillnader mellan modell och detektor. Detta som funktion av bestrålningstiden. När Δ översteg 0.02 avbröts simuleringen.



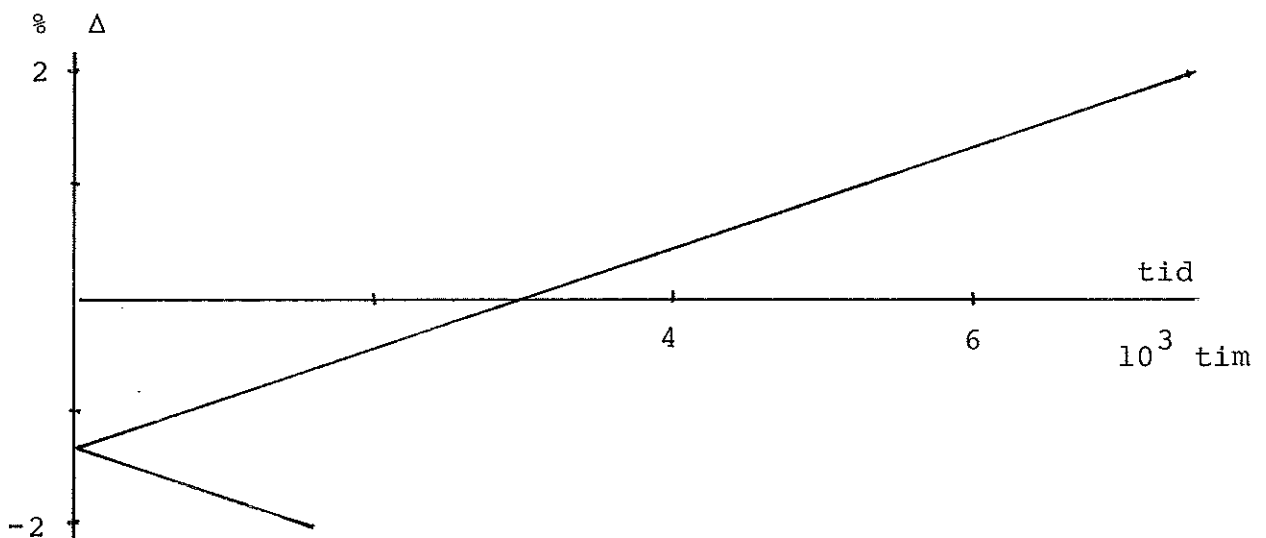
En helt ideal detektor som ej kompenseras.



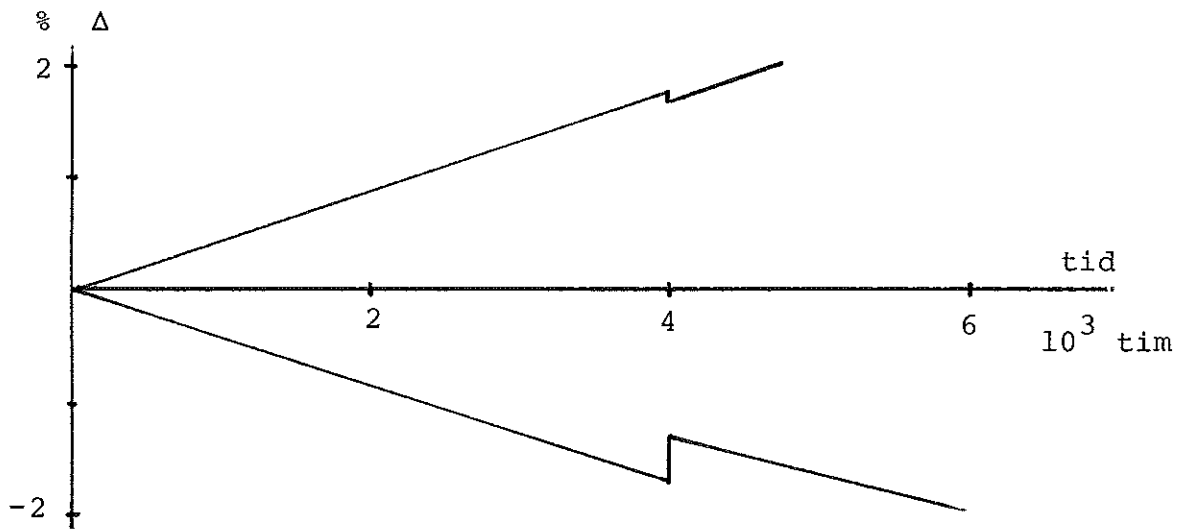
En detektor som skiljer sig från kompenseringsmodellen.
Inget bidrag från fördröjd γ -strålning.



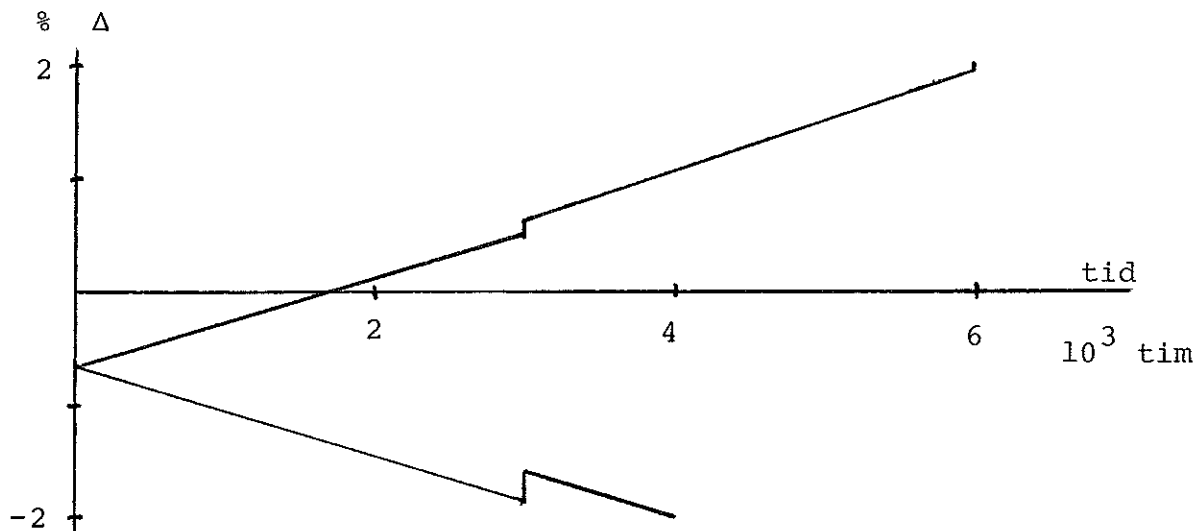
En detektor som skiljer sig från kompenseringsmodellen.
Strömbidraget från fördröjd γ -strålning är -5 nA.



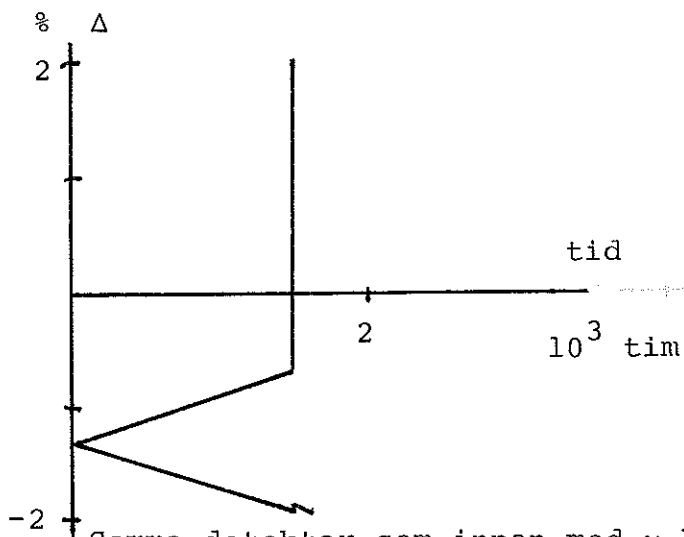
En detektor som skiljer sig från kompenseringsmodellen.
Strömbidraget från fördröjd γ -strålning är -10 nA.



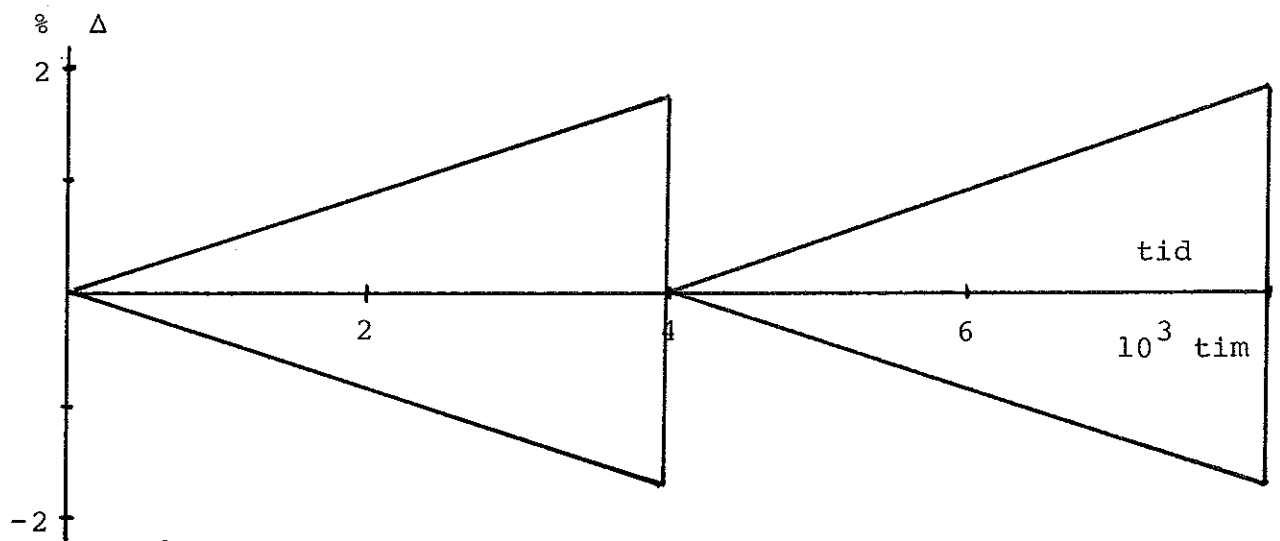
Samma detektor som innan utan γ -bidrag. Kalibrering av känsligheten efter 4000 timmar.



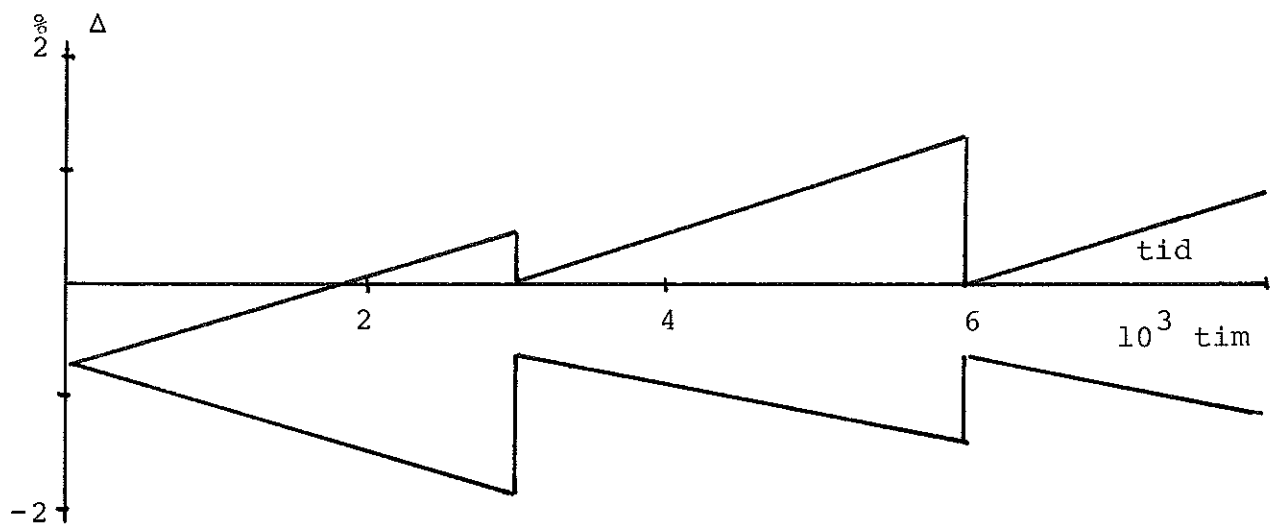
Samma detektor som innan med γ -bidraget -5 nA. Kalibrering av känsligheten efter 3000 timmar.



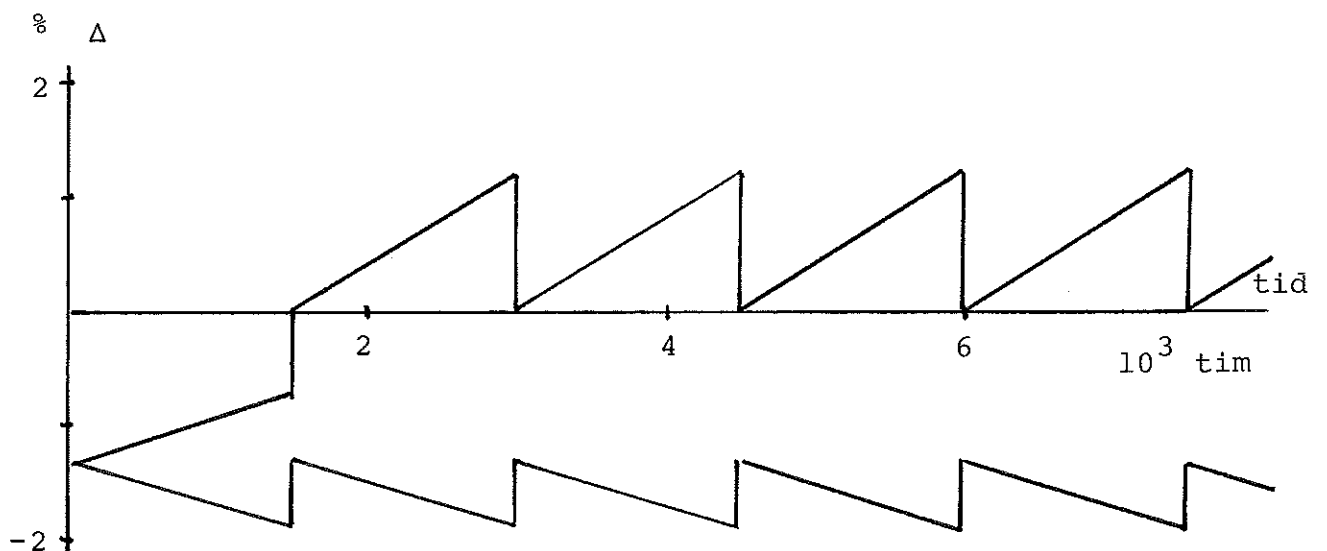
Samma detektor som innan med γ -bidraget -10 nA. Kalibrering av känsligheten efter 1500 timmar.



Detektorn utan γ -bidrag. Mätning av bakgrundsström och kalibrering av känsligheten efter 4000 timmar.



Detektor med γ -bidraget -5 nA. Mätning av bakgrundsström och kalibrering av känsligheten efter 3000 timmar.



Detektor med γ -bidraget -10 nA. Mätning av bakgrundsström och kalibrering av känsligheten efter 1500 timmar.

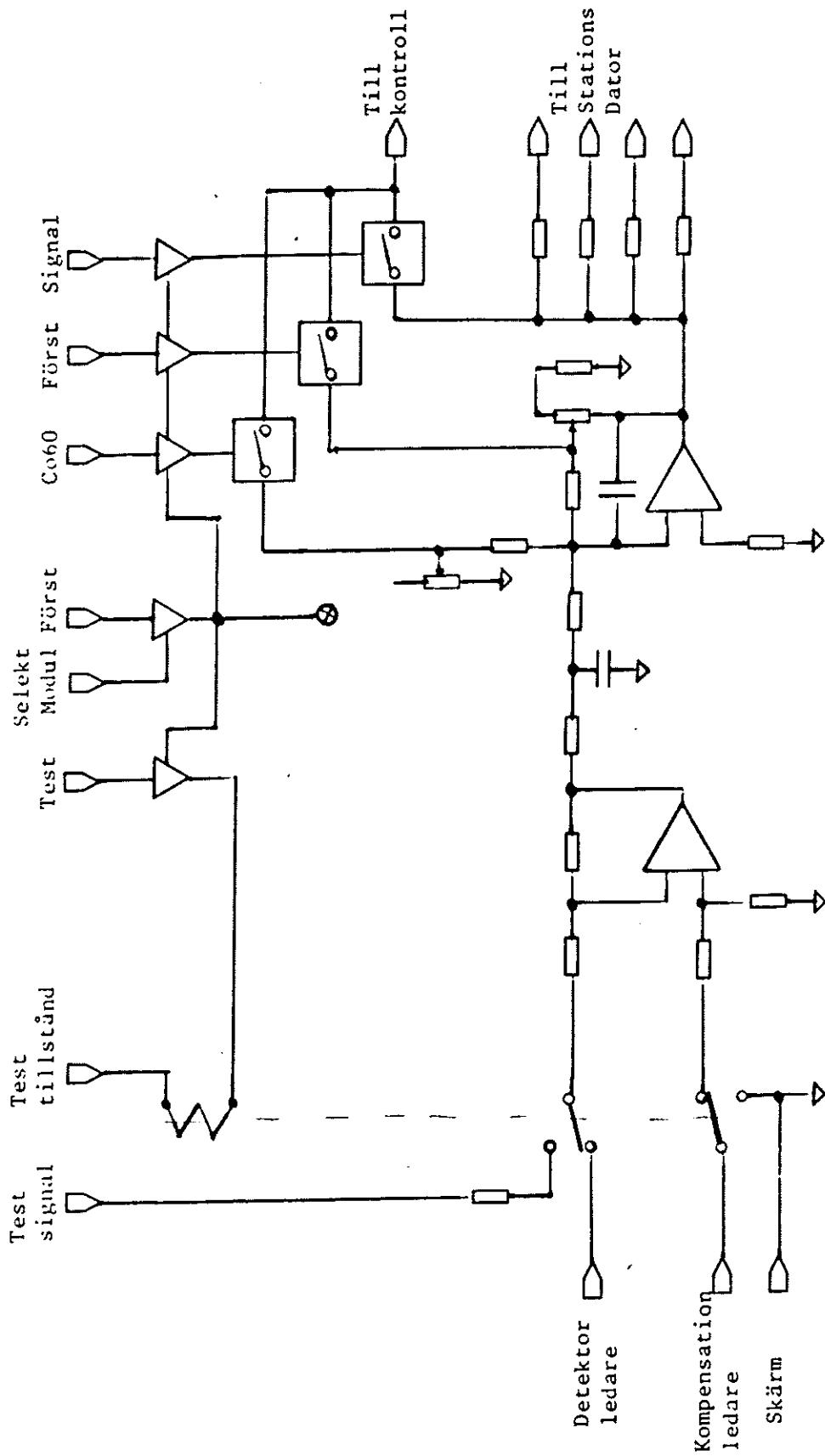
BESKRIVNING AV FÖRSTÄRKARENS FUNKTIONER

Utsignalen från förstärkaren kan väljas på ett antal olika sätt genom att en signal från kontroll-datorn läggs på någon av ingångarna Co60, Först eller Signal. Med en signal på ingången "Co60" blir utsignalen den ström, som motsvarar bidraget från ^{60}Co och som avbackas från detektorströmmen. Inställd förstärkning kan bestämmas från utsignalen genom att en signal läggs på ingången "Först". Utsignalen som används för beräkningen av emitterns isotopsammansättning, fås då en signal läggs på ingången "Signal". Utsignalen blir då detektorström minskad med bidraget från ^{60}Co och sedan förstärkt med inställd förstärkning för att kompensera utbränningen.

Testfunktionen inkopplas med en signal till ingången "Test", samt med en 12 V signal på ingången "Testtillstånd". Härvid påverkas ett relä som kopplar bort detektorn. Insignalen till förstärkaren väljs nu med en potentiometer som är kopplad till ingången "Testsignal". Utsignalen väljs som tidigare.

Innan någon utsignal överhuvudtaget kan erhållas måste förstärkaren adresseras. Detta görs genom att signaler från kontroll datorn läggs på selekt-ingångarna "Modul" och "Först".

Avbackningsström och förstärkning ställs in av kontroll datorn via digital-analogomvandlare.



Förstärkarenheten med dess ingångar
 (Källa: Funktionsbeskrivning SPND-system)

REALTIDSPROGRAM

```

program spnkompensering;

{Program som med jamna mellanrum beraknar aktuell
 isotopsammansattning och samtidigt skoter operators-
 kommunikationen.}

{globala variabler}

const s59=37.0E-28;
      s60=2.0E-28;
      l60=4.17E-9;
      ksi=0.74;

type spndata=record
      start:array [1..3] of integer;
      tottime,totfite,m59,m60,oldcurrent,currentsum:real;
      sens,bak,uvar,gnoll,gain,ibak:real;
      antal:integer;
      chuvar:array [1..3] of integer;
      chbak:array [1..3] of integer;
      end;

      sonddata=record
      detantal:integer;
      detector:array [1..4] of spndata;
      end;

      daytype=array [1..3] of integer;

var matsond,backsond:array [1..10] of sonddata;
    tsamp,period:integer;
    updant,count:integer;
    sondantal:integer;
    day:daytype;
    changetsamp:boolean;
    newpar:array [1..10,1..4] of boolean;
    teston:boolean;

{-----separatkompiletrade maskinbundna rutiner}

{Analoga och digitala in- och utgangar}

function adin(chan:integer):real;external;
function bitin(chan,bitnr:integer):boolean;external;
procedure daout(chan:integer,value:real);external;
procedure bitout(chan,bitnr:integer,value:boolean);external;

{Rutin som med jamna mellanrum exekverar "procedure fore".
 Samplingstid: period*0.02 sekunder}

procedure schedule(procedure fore;var period:integer);external;

```

```

procedure clksavfexternal; {Andrar adressen for klockavbrottet}
procedure getday(day:daytype);external; {Hamtar aktuellt datum}

{-----amplout}
{Staller ut forstarkning (fkn=1) eller avbackningsstrom
 (fkn=2) pa forstarkaren sond,det}

procedure amplout(sond,det,fkn:integer;value:real);
var ch:integer;
begin

  {algoritmen for kanalvalet maste andras i den
   slutgiltiga utformningen}

  ch:=fkn-1;
  daout(ch,value);
end; {amplout}

{-----current}
{Laser strom fran forstarkare sond,det
 fkn=1 ==> i som ger neutronflode
 fkn=2 ==> ibak
 fkn=3 ==> forstarkning}

function current(sond,det,fkn:integer):real;
var ch,bitnr:integer;
begin

  {algoritmerna for val av bit och kanal maste
   andras i den slutgiltiga utformningen}

  ch:=4*(sond-1)+det;
  for bitnr:= 1 to 3 do
    bitout(0,bitnr,false);
    bitout(0,fkn,true);
    current:=adin(ch);
end; {current}

{-----update}
{Rutin som exekveras var 20:e timme. Beraknar nya varden
 pa detektorns isotopsammansattning.}

procedure update(sond,det:integer);
var h1,h2,fi,fite,time:real;

begin
  with matsond[sond].detector[det] do
    begin
      fi:=currentsum/(antal*sens*gnoll);

```

```

time:=antal*tsamp*60.0;
tottime:=tottime+time;
totfite:=totfite+fi*time;
fi:=fi*ksi*uvar;
fite:=fi*time;
h1:=exp(-s59*fite);
h2:=exp(-160*time-s60*fite);
m60:=m60*h2+m59*s59*fi*(h2-h1)/(s59*fi-160-s60*fi);
m59:=m59*h1;
gain:=gnoll/m59;
ibak:=bak*m60;
antal:=0;
amplout(sond,det,1,gain);
amplout(sond,det,2,ibak);
end;
end; {update}

{-----measure}
{Rutin som exekveras en till sex ganger per timme enligt
operatoren onskamal. Variabeln count ar medtagen for att
variabeln period (som styr schedule) ej skall bli storre
an maxinteger.}

procedure measure;
var sond,det,i:integer;
    curr:real;

begin
    count:=count+1;
    if count=10 then

        begin
            count:=0;
            for sond:= 1 to sondantal do
                begin
                    with matsond[sond] do
                        begin
                            for det:= 1 to detantal do
                                begin
                                    with detector[det] do
                                        begin

                                            if newpar[sond,det] then
                                                begin
                                                    m59:=backsond[sond].detector[det].m59;
                                                    m60:=backsond[sond].detector[det].m60;
                                                    bak:=backsond[sond].detector[det].bak;
                                                    uvar:=backsond[sond].detector[det].uvar;
                                                    gain:=backsond[sond].detector[det].gain;
                                                    ibak:=backsond[sond].detector[det].ibak;
                                                    sens:=backsond[sond].detector[det].sens;
                                                    gnoll:=backsond[sond].detector[det].gnoll;
                                                    tottime:=backsond[sond].detector[det].tottime;

```

```

totfite:=backsond[sond].detector[det].totfite;
for i:=1 to 3 do
begin
  start[i]:=backsond[sond].detector[det].start[i];
  chuvar[i]:=backsond[sond].detector[det].chuvar[i];
  chbak[i]:=backsond[sond].detector[det].chbak[i];
end;
amplout(sond, det, 1, gain);
amplout(sond, det, 2, ibak);
newpar[sond, det]:=false;
end;

if teston then
  curr:=oldcurrent
else
begin
  curr:=current(sond, det, 1);
  oldcurrent:=curr;
end;
currentsum:=currentsum+curr;
antal:=antal+1;
if (antal=updant) or changetsamp then
  update(sond, det);
if changetsamp and (sond=sondantal) and (det=detantal) then
begin
  changetsamp:=false;
  period:=tsamp*300;
  updant:=1200 div tsamp;
end;

  end;
end;
end;
end;
end;

end; {measure}

{-----}
{-----init}
{Rutin dar antalet detektorer och deras parametrar inlases.
  Enda rutin dar tangentbordet anvands.}

procedure initi;
var sond, det, help: integer;
    rr: char;

begin
  writeln(' HUR MANGA OLIKA SONDER ? ');
  writeln;
  read(sondantal);
  for sond:=1 to sondantal do
  begin

```



```

with matsond[sond] do
begin
  writeln(' HUR MANGA DETEKTORER HAR SOND ',sond:2,' ? ');
  writeln;
  read(detantal);
  for det:=1 to detantal do
  begin
    with detector[det] do
    begin
      writeln(' MATSOND ',sond:2,' DETEKTOR ',det:1);
      writeln;
      writeln(' KANSLIGHETEN: DETEKTORSTROM/NEUTRONFLODE ? ');
      writeln;
      read(sens);
      writeln;
      writeln(' FORSTARKNING: FORSTARKARSTROM/DETEKTORSTROM ? ');
      writeln;
      read(gnoll);
      writeln;
      writeln;
      tottime:=0.0;
      totfite:=0.0;
      currentsum:=0.0;
      antal:=0;
      m59:=1.0;
      m60:=0.0;
      bak:=4.9E-9;
      uvar:=1.0;
      gain:=gnoll;
      ibak:=0.0;
      amplout(sond,det,1,gain);
      amplout(sond,det,2,ibak);
    end;
    newpar[sond,det]:=false;
  end;
end;
end;

count:=0;
period:=0;
changetsamp:=false;
teston:=false;
writeln;
writeln(' NU KAN TANGENTBORDET TAS BORT ');
writeln;
writeln(' EXEKVERINGEN STARTAS GENOM ATT SATTA EN');
writeln(' SAMPLINGSTID - GORS I RUTIN AUTOMATKALIBRERING');
writeln;
writeln(' TRYCK PA RETURN ');
readln(rr);
end; {init}

```

{-----}

```

-----potvalue}
{Rutin som returnerar ett heltal mellan 1 och 12
beroende pa frontrattens installning.}

function potvalue:integer;
const n1=0.10; n2=0.18; n3=0.26; n4=0.34; n5=0.42; n6=0.50;
      n7=0.58; n8=0.66; n9=0.74; n10=0.82; n11=0.90;

var value:real;

begin
  value:=adin(0);

  if value<n1 then
    potvalue:=1
  else if (value>=n1) and (value<n2) then
    potvalue:=2
  else if (value>=n2) and (value<n3) then
    potvalue:=3
  else if (value>=n3) and (value<n4) then
    potvalue:=4
  else if (value>=n4) and (value<n5) then
    potvalue:=5
  else if (value>=n5) and (value<n6) then
    potvalue:=6
  else if (value>=n6) and (value<n7) then
    potvalue:=7
  else if (value>=n7) and (value<n8) then
    potvalue:=8
  else if (value>=n8) and (value<n9) then
    potvalue:=9
  else if (value>=n9) and (value<n10) then
    potvalue:=10
  else if (value>=n10) and (value<n11) then
    potvalue:=11
  else
    potvalue:=12;
end; {potvalue}

-----writesond}
{Utskriftsrutin for select.}

procedure writesond(pot:integer);
const blank='      ';
      elect='====>';

type pil=packed array [1..7] of char;

var val:array [1..11] of pil;
    i:integer;

begin
  writeln(' VAL AV SOND ');

```

```

writeln(' ***** ');
writeln;
for i:=1 to 11 do
  val[i]:=blank;
val[pot]:=elect;

for i:=1 to 10 do
begin
  if i>sondantal then
    writeln(val[i])
  else
    writeln(val[i], ' SOND NUMMER ',i:2);
end;

writeln;
writeln(val[11], ' ATERHOPP TILL MENY ');
for i:=1 to 5 do
  writeln;
writeln(' VALJ MED FRONTRATT ');
writeln(' -TRYCK SEDAN PA SWITCHEN');
writeln;
end; {writesond}

-----writedet}
(Utskriftsrutin for select.)

procedure writedet(sond,pot:integer);
const blank='      ';
      elect=' =====>';

type pil=packed array [1..7] of char;

var val:array [1..4] of pil;
    i:integer;

begin
  with matsond[sond] do
  begin
    writeln(' VAL AV DETEKTOR I SOND ',SOND:2);
    writeln(' ***** ');
    writeln;
    for i:=1 to 4 do
      val[i]:=blank;
    val[pot]:=elect;

    for i:=1 to 4 do
    begin
      writeln;
      if i>detantal then
        writeln(val[i])
      else
        writeln(val[i], ' DETEKTOR NUMMER ',i:2);
      writeln;
    end;
  end;
end;

```

```

    endi
    for i:=1 to 5 do
        writeln;
        writeln(' VALJ MED FRONTRATT ');
        writeln(' -TRYCK SEDAN PA SWITCHEN');
        writeln;
    endi
endi {writesond}

{-----select}
{Rutin som valjer ut en detektor.}

procedure select(var sond,det:integer);
var pot,potold:integer;

begin
    potold:=0;
    while (potold=0) or (not bitin(0,0)) do
        begin
            pot:=potvalue;
            if pot>sondantal then pot:=11;
            if pot<>potold then
                begin
                    writesond(pot);
                    potold:=pot;
                endi
            endi
        while bitin(0,0) do
            begin
                endi

            sond:=pot;
            if sond<=sondantal then

                begin
                    potold:=0;
                    while (potold=0) or (not bitin(0,0)) do
                        begin
                            pot:=(2+potvalue) div 3;
                            if pot<>potold then
                                begin
                                    writedet(sond,pot);
                                    potold:=pot;
                                endi
                            endi
                        while bitin(0,0) do
                            begin
                                endi

                                det:=pot;
                            endi
                        endi {select}

```

```

-----tillback}
{Rutin som overfor matrutinens variabler till
 operatorsrutinens.}

procedure tillback(sond,det:integer);
var i:integer;

begin
  with backsond[sond].detector[det] do
    begin
      tottime:=matsond[sond].detector[det].tottime;
      totfite:=matsond[sond].detector[det].totfite;
      m59:=matsond[sond].detector[det].m59;
      m60:=matsond[sond].detector[det].m60;
      sens:=matsond[sond].detector[det].sens;
      bak:=matsond[sond].detector[det].bak;
      uvar:=matsond[sond].detector[det].uvar;
      gain:=matsond[sond].detector[det].gain;
      ibak:=matsond[sond].detector[det].ibak;
      gnoll:=matsond[sond].detector[det].gnoll;
      for i:=1 to 3 do
        begin
          start[i]:=matsond[sond].detector[det].start[i];
          chuvar[i]:=matsond[sond].detector[det].chuvar[i];
          chbak[i]:=matsond[sond].detector[det].chbak[i];
        end;
      end;
    end;
end; {tillback}

-----protect}
{Rutin som lagrar detektor parametrar i sekundarminne
 for framtida forbattring av detektormodellen.}

procedure protect;
begin
  getday(day);

  {skriv i sekundarminne}

end; {protect}

-----writesamp}
{Utskriftsrutin for samplingsint.}

procedure writesamp(pot:integer);
const blank='      ';
      elect='====>';

type pil=packed array [1..7] of char;

```

```

var val:array [1..6] of pil;
    i:integer;

begin
  for i:=1 to 6 do
    val[i]:=blank;
  val[pot]:=elect;
  writeln;
  writeln(' VAL AV SAMPLINGSINTERVALL - NU AR DET ',tsamp:2,' MINUTER');
  writeln;
  writeln;
  for i:=1 to 6 do
    begin
      writeln(val[i],' SAMPLINGSTID ',i*10:2,' MINUTER');
      writeln;
      writeln;
    end;
  writeln;
end; {writesamp}

{-----samlingsint}
{Operatorsrutin dar samlingsintervallet valjs.}

procedure samlingsint;
var i,potold,pot,sond,det:integer;

begin
  potold:=0;
  while (potold=0) or (not bitin(0;0)) do
    begin
      pot:=(1+potvalue) div 2;
      if pot<>potold then
        begin
          writesamp(pot);
          potold:=pot;
        end;
    end;
  while bitin(0;0) do
    begin
      end;
  tsamp:=pot*10;

  if period=0 then
    begin
      getday(day);
      for sond:=1 to sondantal do
        begin
          with matsond[sond] do
            begin
              for det:=1 to detantal do
                begin
                  with detector[det] do
                    begin

```

```

        for i:= 1 to 3 do
        begin
            start[i]:=day[i];
            chubar[i]:=day[i];
            chbak[i]:=day[i];
        end;
    end;
end;
end;
end;
period:=tsamp*300;
end

else
    changetsamp:=true;
end; {kalibrering}

{-----writenydet}
{Utskriftsrutin for nydetektor.}

procedure writenydet(sond,det,fkn:integer);
var i:integer;

begin
    writeln(' INSATTNING AV NY DETEKTOR');
    writeln(' *****');
    writeln;
    writeln(' DETEKTOR ',det:1,' I SOND ',sond:2);
    writeln;
    case fkn of
        1:writeln(' KANSLIGHETEN: DETEKTORSTROM/NEUTRONFLODE ?');
        2:writeln(' FORSTARKNING: FORSTARKARSTROM/DETEKTORSTROM ?');
    end;
    writeln;
    writeln(' ANDRAS MED FRONTRATT - TRYCK SEN PA SWITCHEN');
    for i:=1 to 15 do writeln;
end; {writenydet}

{-----nydetektor}
{Operatorsrutin som initierer en ny detektor som
ersatter en som tagits ut.}

procedure nydetektor;
var i,sond,det:integer;
    sensold,gainold:real;

begin
    select(sond,det);
    while sond<=sondantal do
    begin
        newpar[sond,det]:=false;
        with backsond[sond].detector[det] do

```

```

begin
  writenydet(sond,det,1);
  sensold:=0.0;

  while not bitin(0,0) do
  begin
    sens:=1.0E-24*adin(0);
    if abs(sens-sensold)>0.5E-27 then
    begin
      sensold:=sens;
      write(' KANSLIGHET ',sens*1.0E+25:5:2,'E-25',chr(13));
    end;
  end;
  while bitin(0,0) do begin end;

  gainold:=0.0;
  writenydet(sond,det,2);
  while not bitin(0,0) do
  begin
    gain:=4.0E+7*adin(0);
    if abs(gain-gainold)>0.005 then
    begin
      gainold:=gain;
      write(' FORSTARKNING ',gain*1.0E-7:6:3,'E+7',chr(13));
    end;
  end;
  while bitin(0,0) do begin end;

  tottime:=0.0;
  totfite:=0.0;
  currentsum:=0.0;
  antal:=0;
  m59:=1.0;
  m60:=0.0;
  bak:=4.9E-9;
  uvar:=1.0;
  gain:=gnoll;
  ibak:=0.0;
  getday(day);
  for i:=1 to 3 do
  begin
    start[i]:=day[i];
    chuvar[i]:=day[i];
    chbak[i]:=day[i];
  end;
  amplout(sond,det,1,gain);
  amplout(sond,det,2,ibak);
end;
newpar[sond,det]:=true;
select(sond,det);
end;
end; (nydetektor)

```



```

-----matbakgrund}
{Operatorsrutin som pa kommando mater bakgrunds-
strommen och beraknar nya varden pa proportiona-
litetskonstanten for denna.}

procedure matbakgrund;
var j,pot,potold,sond,det:integer;
    curr:real;

begin
  getday(day);
  potold:=0;
  writeln;
  writeln(' MATNING AV BAKGRUNDSSTROM !!');
  writeln;
  writeln(' SAKERT ?? --ANDRAS MED FRONTRATT ');
  writeln(' TRYCK SEDAN PA SWITCHEN');
  for j:=1 to 17 do writeln;

  while (not bitin(0,0)) do
  begin
    pot:=(potvalue+5) div 6;
    if pot<>potold then
    begin
      potold:=pot;
      if pot=1 then
        write('          JA          ',chr(13))
      else
        write('          NEJ',chr(13));
    end;
  end;
  while bitin(0,0) do
  begin
  end;

  if pot=1 then
  begin
    for sond:= 1 to sondantal do
    begin
      with backsond[sond] do
      begin
        for det:= 1 to detantal do
        begin
          if (not newpar[sond,det]) then
            tillback(sond,det);
          with detector[det] do
          begin
            curr:=current(sond,det,1)+current(sond,det,3);
            if m60 > 0.0 then
              bak:=curr/m60;
            for j:= 1 to 3 do
              chbak[j]:=day[j];
          end;
          newpar[sond,det]:=true;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

        endi
      endi
    endi
  endi
  protecti
endi {matbakgrund}

```

```

{-----writechan1}
{Utskriftsrutin for changepar.}

```

```

procedure writechan1(sond,det,fkn:integer;value:real);
var i:integer;

```

```

begin
  writeln(' SOND ',sond:2,' DETEKTOR ',det:1);
  writeln(' *****');
  writeln;
  writeln;
  case fkn of
    1:begin
      write(' KANSLIGHETEN AR ',value*1.0E+25:5:2,'E-25');
      writeln(' SKALL DEN ANDRAS ?');
    end;
    2:writeln(' BAKGRUNDSSTROM ',value:6:1,' SKALL DEN ANDRAS ?');
  end;
  for i:=1 to 20 do writeln;
end; {writechan1}

```

```

{-----writechan2}
{Utskriftsrutin for changepar.}

```

```

procedure writechan2(sond,det,fkn:integer;old:real);
var i:integer;

```

```

begin
  writeln;
  writeln(' SOND ',sond:2,' DETEKTOR ',det:1);
  writeln(' *****');
  writeln;
  writeln;
  case fkn of
    1:begin
      writeln(' GAMMAL KANSLIGHET ',old*1.0E+25:5:2,'E-25');
      writeln;
    end;
    2:begin
      writeln(' GAMMAL BAKGRUNDSSTROM ',old:6:1);
      writeln;
    end;
  end;
  writeln;
  writeln;
end;

```

```

writeln(' NAR ONSKAT VARDE INSTALLT MED FRONTRATT');
writeln(' TRYCK NER SWITCHEN');
for i:=1 to 12 do writeln;
end; {writechan2}

```

```

{-----changepar}
{Operatorsrutin dar detektorernas parametrar kan andras.}

```

```

procedure changepar;
var sond,det,pot,potold,i:integer;
    fi,fite,new,old:real;

begin
  getday(day);
  select(sond,det);
  while sond <= sondantal do
  begin
    if (not newpar[sond,det]) then
      tillback(sond,det);
    with backsond[sond].detector[det] do
    begin
      writechan1(sond,det,1,sens*m59);
      potold:=0;

      while not bitin(0,0) do
      begin
        pot:=(potvalue+5) div 6;
        if pot <> potold then
          begin
            case pot of
              1:write('          JA          ',chr(13));
              2:write('          NEJ          ',chr(13));
            end;
            potold:=pot;
          end;
        end;
      while bitin(0,0) do
      begin
        end;

      if pot=1 then
      begin
        writechan2(sond,det,1,m59*sens);
        old:=0.0;

        while not bitin(0,0) do
        begin
          new:=adin(0);
          if abs(new-old) > 0.0005 then
            begin
              old:=new;
              write('          NY KANSLIGHET ',new*sens*1.0E+25:5:2,'E-25');
              write(chr(13));
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

    endi
  endi
  while bitin(0,0) do
  begin
  endi

  m59:=newi
  if (totfite>1.0E+23) and (m59<1.0) then
  begin
    uvar:=ln(m59)/(-s59*ksi*totfite);
    fite:=totfite*ksi*uvar;
    fi:=fite/tottime;
    m60:=(s59*fi)*(exp(-160*tottime-s60*fite)-exp(-s59*fite))/
      (s59*fi-160-s60*fi);
    if (m60>0.0001) and (ibak>0.0) then
      bak:=ibak/m60;
    end
  else
  begin
    uvar:=1.0;
    m60:=0.0;
  endi
  gain:=gnoll/m59;
  for i:= 1 to 3 do
    chuvar[i]:=day[i];
  endi

  potold:=0;
  writechan1(sond,det,2,ibak*1.0E+9);
  while not bitin(0,0) do
  begin
    pot:=(potvalue+5) div 6;
    if pot <> potold then
    begin
      potold:=pot;
      case pot of
        1:write('          JA          ',chr(13));
        2:write('          NEJ',chr(13));
      endi
    endi
  endi
  while bitin(0,0) do
  begin
  endi

  if pot=1 then
  begin
    writechan2(sond,det,2,ibak*1.0E+9);
    old:=0.0;
    while not bitin(0,0) do
    begin
      new:=100.0*adin(0);
      if abs(new-old) > 0.05 then
      begin

```

```

        old:=new;
        write('      NY BAKGRUNDSSTROM ',new:6:1,chr(13));
    end;
end;
while bitin(0,0) do
begin
end;

    ibak:=new*1.OE-9;
    if (m60>0.0001) and (ibak>0.0) then
        bak:=ibak/m60;
    for i:=1 to 3 do
        chbak[i]:=day[i];
    end;
end;
newpar(sond,det):=true;
select(sond,det);
end;
protect;
end; (changepar)

```

```

{-----showpar}
{Operatorsrutin som visar en detektors parameteruppsattning.}

```

```

procedure showpar;
var sond,det:integer;

begin
    select(sond,det);
    while sond <= sondantal do
    begin
        with matsond[sond].detector[det] do
        begin
            writeln(' DATA FOR DETEKTOR ',det:1,' I SOND ',sond:2);
            writeln;
            writeln(' STARTDATUM ',start[1]:2,start[2]:2,start[3]:2);
            writeln;
            writeln(' TOTALT MOTTAGEN STRALDOS: ',totfite);
            writeln(' TOTAL DRIFTSTID:          ',tottime,' SEKUNDER');
            writeln;
            writeln(' RELATIV MANGD COBOLT-59: ',m59:8:5);
            writeln(' RELATIV MANGD COBOLT-60: ',m60:8:5);
            writeln;
            writeln(' BAKGRUNDSSTROM : ',ibak*1.OE+9:6:1,' nA');
            writeln(' FORSTARKNING   : ',gain*1.OE-7:6:3,' E+7');
            writeln;
            writeln(' NEUTRONKANSLIGHET : ',m59*sens*1.OE+25:5:2,' E-25');
            writeln;
            writeln(' DATUM DA PARAMETRAR ANDRADES');
            writeln(' FORSTARKNING     ',chuvar[1]:2,chuvar[2]:2,chuvar[3]:2);
            writeln(' BAKGRUNDSSTROM  ',chbak[1]:2,chbak[2]:2,chbak[3]:2);
            writeln;
            writeln;
        end;
    end;
end;

```

```

        writeln;
        writeln;
        writeln;
    end;
    while not bitin(0,0) do begin end;
    while bitin(0,0) do begin end;
    select(sond,det);
end;
end; {showpar}

```

```

{-----test}
{Operatorsrutin dar forstarkaren satts i test tillstand.}

```

```

procedure testi;
begin
    teston:=true;

    {stall ut 12 V pa forstarkarens ingang "testtillstand"
    och en logisk signal pa ingangen "test"}

    while not bitin(0,0) do
    begin

        {testalgoritmer}

    end;

    {tag bort de ovan utstallda signalerna}

    teston:=false;
end;

```

```

{-----writemeny}
{Utskriftsrutin for meny.}

```

```

procedure writemeny(pot:integer);
const blank='      ' ;
      elect=' ==>' ;

type pil=packed array [1..7] of char;

var val:array [1..6] of pil;
    i:integer;

begin
    for i:=1 to 6 do
        val[i]:=blank;
        val[pot]:=elect;

        writeln(' F U N C T I O N S - M E N Y ');
        writeln(' ***** ');
        writeln;

```

```

writeln(val[1], ' VAL AV SAMPLINGSINTERVALL')§
writeln§
writeln(val[2], ' INITIERING AV EN NYINSATT DETEKTOR')§
writeln§
writeln(val[3], ' MATNING AV BAKGRUNDSSTROM OCH')§
writeln('      ANDRING AV PROPOTIONALITETS KON-')§
writeln('      STANT FOR BAKGRUNDSSTROM')§
writeln§
writeln(val[4], ' MANUELL ANDRING AV FORSTARKNING')§
writeln('      OCH BAKGRUNDSSTROM')§
writeln§
writeln(val[5], ' VISA AKTUELLA PARAMETRAR')§
writeln§
writeln(val[6], ' TESTFUNKTION NAR REAKTORN AR')§
writeln('      AVSTALLD')§
writeln§
writeln§
writeln('      VALJ FUNKTION MED FRONTRATT OCH TRYCK NER')§
writeln('      SWITCHEN DA ONSKAD FUNKTION AR INSTALLD')§
writeln§
end§ {writemeny}

```

```

{-----meny}
{Operatorsrutin fran vilken onskad funktion valjes.}

```

```

procedure meny§
var pot,potold:integer§

begin
  while true do
    begin
      potold:=0§
      while (not bitin(0,0)) or (potold=0) do
        begin
          pot:=(potvalue+1) div 2§
          if pot<>potold then
            begin
              writemeny(pot)§
              potold:=pot§
            end
          end
        while bitin(0,0) do
          begin
            end
          case pot of
            1:samplingsinti
            2:nydetektori
            3:matbakgrund§
            4:changepar§
            5:showpar§
          end
        end
      end
    end
  end
end

```

```
        endi          6: testf
    endi
endi {meny}
```

```
{-----}
{-----MAINPROGRAM}
```

```
begin
    clksavf
    initf
    schedule(measure,period);
    menyf
end. {MAIN}
```