Reaktorinstrumentering
Sikkerhed og driftsikkerhed ved koincidenskoblinger

Rasmussen, Jens

Publication date:
1960

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

ATOMENERGIKOMMISSIONENS

FORSØGSANLÆG RISØ

ELEKTRONIKAFDELINGEN

17. november 196o.

6o eks.

Arbejdsrapport no. 38

Reaktorinstrumentering.
Sikkerhed og driftsikkerhed ved koincidenskoblinger.

Jens Rasmussen.

Reaktorinstrumentering: Sikkerhed og driftsikkerhed ved koincidenskoblinger.

af Jens Rasmussen.

Et af de væsentligste problemer, der skal løses ved planlægningen af sikkerhedssystemer i forbindelse med instrumentering til reaktorer og reaktorforsøg, er at finde det rigtige kompromis mellem høj sikkerhed, det vil sige lille sandsynlighed for at udstyret lader reaktoren uovervåget, og høj driftsikkerhed, hvilket er ringe sandsynlighed for uønsket indgreb i driften på grund af instrumentfejl.

Denne opgave løses i almindelighed ved at hver målestørrelse, der skal overvåges, måles af flere parallelle målekanaler, der hver for sig er forsynet med et trip-kredsløb, som giver melding, når en vis grænse for målestørrelsen overskrides. Disse trip-signaler kombineres, så man kun får indgreb i driften, når flere af kanalerne samtidigt giver tripsignal. Det oftest anvendte system er 2 ud af 3 systemet, hvor mindst 2 ud af 3 målekanaler skal melde trip før der sker indgreb i driften.

I det følgende forsøges en foreløbig vurdering af den sikkerhed og driftsikkerhed, der kan forventes med disse koincidenskoblinger, og af disse forholds afhængighed af kanalernes antal, vedligeholdelses politik osv. For at få overskuelige forhold må gøres en række simplificerende forudsætninger, hvis holdbarhed kan diskuteres og i visse tilfælde kræver nøjere undersøgelse. Disse forudsætninger er følgende:

Ens målekanaler:

Det forudsættes, at samme målestørrelse, f.eks. en temperatur, overvåges af en gruppe ens målekanaler, hvor betegnelsen målekanal dækker det udstyr: føler, måleinstrument, køling, trip-kredsløb osv., der er nødvendige for at udføre en enkelt måling.

De udtryk for sikkerhed og driftsikkerhed, der udledes, vedrører kun en sådan gruppe instrumenter og kun beskyttelsen mod unormalitet af denne ene målestørrelse. Normalt indeholder instrumenteringen flere sådanne uafhængige grupper, der overvåger forskellige størrelser som f. eks. temperatur,neutronflux, tryk osv. For instrumenteringen som helhed må man derfor vente større sikkerhed og mindre driftsikkerhed end de udtryk der findes for en enkelt gruppe.

Uafhængige målekanaler.

De enkelte målekanaler forudsættes at være indbyrdes uafhængige, så samme fejl ikke får følger i mere end een kanal. Denne forudsætning er ofte meget vanskelig at overholde, idet den forudsætter, at støjimpulser, forsynings-. spændingsforstyrrelser osv. kun vedrører een kanal af gangen. Er der kobling mellem kanalerne, eller kanalerne har fælles komponenter kan fordelen ved koincidenskoblinger være ganske illusorisk. Er der fælles komponenter forudsættes disse i regningerne at være absolut fejlfrie.

Konstant fejlhyppighed.

Det forudsættes at fejlhyppigheden er konstant og uafhængig af instrumentets alder.Dette vil sige, at der kun tages hensyn til de rent tilfældige fejl, som ikke kan ventes på forhånd.

Fejl, der kan tilskrives slid, og som ytrer sig ved en bestemt middellevetid for en given komponent, medregnes ikke.
Dette anses for en rimelig forudsætning, idet apparaterne består af mange forskellige komponenter med forskellig levetid, og man ved rutineeftersyn kan udskifte visse komponenter, f.eks. elektronrør, inden de forårsager en driftforstyrrelse. Endvidere vil slid ofte vise sig som en gradvis ændring, der kan opdages i tide af betjeningspersonalet.

Sikre og usikre fejl.

De mulige fejl deles i to væsensforskellige typer. Den ene type kaldes sikre fejl, og omfatter de fejl i målekanalen, der medfører trip-signal som om grænsen for måleværdien var overskredet. Denne type har principielt ingen indflydelse på anlæggets sikkerhed, men

nedsætter driftsikkerheden. Fejl, der blokerer kanalerne uden at give trip-signal, forhindrer at kanalen fungerer i en kritisk situation og kaldes derfor usikre fejl. Ved konstruktion af instrumenter til sikkerhedsudstyr er det normal praksis at benytte komponenterne således, at de mest sandsynlige komponentfejl giver en sikker instrumentfejl. Relæer anvendes normalt således, at relæfrafald giver trip-signal, idet svigtende relæspole eller spændingsforsyning anses for at være de mest sandsynlige fejl.
Det antages, at sandsynligheden for sikker og for usikker fejl er uafhængige af hinanden.

Reparationspolitik.

Både udstyrets sikkerhed og driftsikkerhed er afhængig af, hvorledes indtrufne fejl afhjælpes, og hvor lang tid en reparation eller et eftersyn tager.

En mulig politik er at foretage rutine afprøvninger med faste tidsintervaller og kun foretage reparation af fejl, der findes ved disse eftersyn. Dette er muligt for alle usikre fejl og i nogen udstrækning for de sikre fejl. Når sikre fejl sker i et vist antal kanaler får man driftstop, for to ud af tre systemet sker dette ved sikker fejl i to af kanalerne.

Disse rutine eftersyn kan som før nævnt også foretages for at sikre sig mod fejl på grund af slid.

Sikker fejl i en målekanal giver sig udtryk i tripsignal fra kanalen, og det er derfor muligt med alarm at indikere denne fejl separat, selv om den på grund af koincidens-koblingen ikke giver anledning til indgreb i driften. Foretages reparationen af de sikre fejl umiddelbart efter en sådan alarm får man naturligt en væsentlig forøgelse af driftsikkerheden, og denne politik er den normalt anvendte.

En usikker fejl kan være vanskeligere at opdage uden for eftersynene, men kan målekanalerne konstrueres så også usikre fejl umiddelbart indikeres, kan systemets sikkerhed øges betydeligt, og egentlige rutine eftersyn er kun nødvendige, i det omfang de kan foregribe fejl, der skyldes slid, og derved mindske sandsynligheden for samtidig fejl i flere kanaler.

Kan en sådan indikation af usikre fejl gennemføres, kan driftsikkerheden yderligere forbedres ved,at man ikke er tvunget til at dimensionere,så hovedparten af fejlene bliver sikre fejl.

For en given instrumentering og vedligeholdelses-politik findes en optimal længde af tidsintervallerne mellem eftersynene. Er eftersynene for sjældne, er sandsynligheden for usikre fejl for stor, foretages de for hyppigt, vil sandsynligheden for fejl under eftersynene blive for stor..

Om sikkerheden eller driftsikkerheden nedsættes mest under eftersynene afhænger af, om afprøvningen sker medens kanalen er i drift, hvorved den videregiver et tripsignal, eller om der foretages en blokering af dette tripsignal under afprøvningen. Normalt vil man ikke tillade en sådan blokering, når man anvender koincidenskobling. Ved flere kanaler i simpel parallelkobling er det nødvendigt, såfremt man ønsker afprøvning under drift

Beregning af sikkerhed og driftsikkerhed.

Som et mål for systemets sikkerhed benyttes den brøkdel af tiden, man må forudse, at systemet er ude af stand til at yde beskyttelse.
Denne størrelse kaldes i det følgende den relative dødtid D. Som mål for driftsikkerheden tages hyppigheden af uønskede driftstop F. I følgende afsnit gives resultaterne for en enkelt kanal og for det mest anvendte koincidens-system, 2 ud af 3 systemet.Dette system består af tre målekanaler, og der kræves tripsignal på mindst to før indgreb i driften sker. Generelle udtryk for amdre systemer findes i senere afsnit.

Enkelt målekanal.

Antages hyppigheden af sikre og usikre fejl at være henholdsvis s og u finder man som vist i senere afsnit hyppigheden af driftstop,kaldet F og den relative dødtid D:

$F = s \qquad\qquad D = \frac{1}{2} uT$

hvor det er forudsat, at tidsintervallet T mellem to rutine-eftersyn er kort i forhold til middelafstanden mellem fejlene, $sT \ll 1$. Dette vil normalt være tilfældet og nøjagtigere regninger forudsætter bedre kendskab til s og u end man kan forvente at få.

Rutineeftersyn af udstyr med en enkelt målekanel kan kun foregå under drift, såfremt der foretages en blokering af dens tripsignal, og i så fald forøges dens dødtid D med $\frac{T_s}{T}$. hvor T_s er service-tiden. d.v.s. den tid, der medgår til eftersynet.

Både sikkerheden og driftsikkerheden er for et instrument af den gængse kvalitet så lav, at man må benytte mere indviklede systemer.
Simpel serie eller parallelkobling af tripsignalerne fra flere målekanaler vil forbedre den ene egenskab, men forværre den anden. Koincidenskredsløb giver derimod muligheden for at forbedre sikkerhed og driftsikkerhed samtidigt.

Det simpleste koincidenskredsløb er to ud af tre systemet, der i de senere år har fået stor udbredelse.

<u>"To ud af tre" systemet.</u>

For dette system finder man, såfremt det <u>afprøves med tidsintervallerne T, og fejlene kun afhjælpes ved rutineafprøvningerne</u>:

Hyppighed af driftstop $F = 3s^2T$ og
Relative dødtid $D = u^2T^2$

Medens eftersynet står på, har man et langt mere sårbart system, og det må undersøges, om fejlene i afprøvningsperioden T_s er af betydning. Resultatet er i høj grad afhængig af, om tripsignalet, der fremkommer ved afprøvningen af en kanal blokeres eller ikke.
Blokeres signalet, er sikker fejl i begge de resterende kanaler nødvendig for at fremkalde driftstop, undlades blokering, er fejl i een af de resterende kanaler tilstrækkelig.

Man får:
afprøvning med blokering:

$$F = 3s^2T + s^2T_s \cdot \frac{T_s}{T} \qquad D = u^2T^2 + uT_s \cdot \frac{T_s}{T}$$

Afprøvning uden blokering:

$$F = 3s^2T + 2s\frac{T_s}{T} \qquad D = u^2T^2 + \frac{1}{3}u^2T_s^{\ 2}\ \frac{T_s}{T}.$$

Det blev her forudsat, at fejlene først afhjælpes ved de normale eftersyn. I almindelighed vil en sikker fejl i en enkelt kanal give alarm, og man har mulighed for at forbedre driftsikkerheden væsentlig ved at skifte instrumentet ud hurtigt efter en sådan alarm. Sker udskiftningen omgående efter en alarm, vil simpelthen første led i udtrykket for F forsvinde. I almindelighed vil udskiftning først ske efter en tid T_u, og man får da for udskiftning uden blokering, der er det normale:

$$F = 6s^2T_u + 2s\frac{T_s}{T} \qquad D = u^2T^2 + \frac{1}{3}\,u^2T_s^{\ 2} \cdot \frac{T_s}{T}\ .$$

Resonnementer af analog art gælder for den relative dødtid, såfremt usikre fejl giver alarm. Dette er imidlertid ikke normalt tilfældet. Eftersynene er i sig selv skadelige, og er det muligt at undlade rutineeftersyn under drift og kun udskifte og efterse i tilfælde af fejl, får man det mest sikre system, idet ovenstående går over følgende, da man sætter $T = {}^1/3(s+u)$:

$$F = 6s(s+u)T_s \qquad D = u^2(s+u)T_s^{\ 3}\ .$$

Det er her forudsat, at udskiftning sker omgående ved alarm for både sikre og usikre fejl.

For at få et indtryk af størrelsesordenen af ovenstående udtryk er indsat nogle anslåede talværdier.

Taleksempler.

Det forudsættes, at en målekanal har 5 sikre og o,5 usikre fejl om året: s=5, u=0,5.

Et eftersyn antages at tage 5 min.$=10^{-5}$ år$= T_s$ for hele systemet. I de tilfælde, hvor udskiftning sker efter en alarm, antages det at ske efter en halv times forløb, $T_u = 0{,}5$ time $= 6\cdot 10^{-5}$ år.

<u>2 ud af 3 system.</u>

		Eftersyn hver uge $T=2\cdot 10^{-2}$ år	Eftersyn hver vagt (8timer) $T=10^{-3}$ år	Efters. v.fejlm. $T= 1/3(s+u) \sim 6\times 10^{-2}$ år
Bidrag fra perioden mellem rutineeftersynene. Fejl afhjælpes ved disse	F^{stop}/år	1,5	8×10^{-2}	
	D	10^{-4}	3×10^{-7}	
Bidrag fra perioderne mellem rutineeftersynene. Sikre fejl afhjælpes ½ time efter alarm	F^{stop}/år	10^{-2}	10^{-2}	
	D	10^{-4}	3×10^{-7}	
Bidrag fra eftersynsperioderne på 5 min., når eftersyn foretages <u>med</u> blokering.	F^{stop}/år	10^{-7}	$2{,}5\times 10^{-6}$	
	D	$2{,}5\times 10^{-9}$	5×10^{-8}	
Bidrag fra eftersynsperioderne på 5 min., når eftersyn foretages <u>uden</u> blokering	F^{stop}/år	5×10^{-3}	10^{-1}	
	D	4×10^{-15}	8×10^{-14}	
Instrumentering, der melder både sikre og usikre fejl, der afhjælpes på 5 min., <u>uden</u> blokering	F^{stop}/år			$1{,}5\times 10^{-3}$
	D			$1{,}5\times 10^{-15}$
Enkelt målekanal	F^{stop}/år	5	5	
D bidrag fra normal drift		5×10^{-3}	$2{,}5\times 10^{-4}$	
D bidrag fra eftersyn med blok		5×10^{-4}	10^{-2}	

Man ser af tabellen, at systemets egenskaber er bestemt af den måde, det anvendes på. Driftsikkerheden kan for de brugte talværdier variere fra 1-2 stop om året, hvilket er en forbedring på en faktor 3 i forhold til en enkelt kanal, til flere hundrede år mellem uønskede stop.
Tallene viser, at for hyppige eftersyn uden blokering kan medføre ringe driftsikkerhed, selv om systemet iøvrigt er tilfredsstillende. Sikkerheden varierer tilsvarende fra en ubeskyttet tid for reaktoren på o,1^{o}/oo til det helt urealistiske tal $1,5 \times 10^{-15}$. Man må her huske, at de trufne forudsætninger ikke alle er realistiske og de ekstremt gode tal skal tages med megen skepsis. Det nytter intet, at systemet principielt giver en drifttid på 1ooo år mellem hvert stop, når selv en ringe sandsynlighed for kobling mellem de enkelte kanaler, f.eks. i form af støj, kan blive eneafgørende for dets praktiske egenskaber.

Regningerne viser imidlertid, at 2 ud af 3 systemet ved rigtigt brug principielt kan få så gode egenskaber, at man næppe kan forudse nogen praktisk fordel af at anvende mere komplicerede systemer (f.eks. 2 ud af 4) før man ved en grundig undersøgelse har godtgjort, at systemets egenskaber ikke bestemmes af sekundære forhold, f.eks. kobling mellem kanalerne.

Andre systemer.

2 ud af 3 systemet er det enkleste koincidens-system, men i visse tilfælde kan man af rent kredsløbstekniske grunde ønske andre.

Har man 4 målekanaler, der kobles i to grupper med to instrumenter, således at man får indgreb i driften, når eet af instrumenterne i hver gruppe giver trip-signal, får man et system, hvis sikkerhed og driftsikkerhed i alle de ovennævnte tilfælde ligger meget nær 2 ud af 3 systemet. Systemet er ikke et ægte 2 ud af 4 system, hvis sikkerhed er bedre, men hvis driftsikkerhed er ringere end 2 ud af 3 systemet.

Tillæg.

I følgende afsnit gives en gennemgang af beregningerne for tre typer koincidenssystemer i ret detaljeret form for at klargøre de begåede tilnærmelser.

Enkelt målekanal:

Sikre fejl.

Sandsynligheden for at der indtræder en sikker fejl i kanalen i tidsrummet Δt uden hensyn til, om der tidligere er indtrådt fejl i kanalen, antages at være $s\Delta t$, hvor s er konstant og uafhængig af instrumentets alder.

Ved man, at instrumentet er i orden ved $t=0$, vil man uden hensyn til forhistorien have en sandsynlighed for, at instrumentet er i orden endnu ved $t=T=n\cdot\Delta t$, der er lig sandsynligheden for, at der ikke er indtrådt fejl i nogen af intervallerne Δt:

Sandsynligheden for at instrumentet virker til tiden T er:

$$(1-s\Delta t)^n \rightarrow e^{-sT} \quad \text{for} \quad n \rightarrow \infty \;, \; n\cdot\Delta t=T$$

Afprøves instrumenterne med tidsmellemrummene T, og instrumentet ved disse tidspunkter er i orden, eventuelt repareret, får man:

Sandsynlighed for fejl i perioden $T = 1-e^{-sT}$
eller

$$F = \text{hyppigheden af driftforstyrrelser} = \frac{1}{T}(1-e^{-sT}).$$

Almindeligvis er T kortere end middelafstanden mellem fejlene $^1/_s$, således at $Ts \ll 1$ og nedenstående tilnærmelse er derfor tilladelig, især i betragtning af de indgående størrelsers usikkerhed:

$$F \sim s \qquad \text{idet} \quad e^{-sT} \sim 1 - sT.$$

Usikre fejl.

Selve hyppigheden af de usikre fejl har ingen betydning, kun den tid, den usikre fejl får lov at eksistere, er afgørende, og det tidspunkt, hvor den vil indtræde, må derfor beregnes:

Sandsynligheden for, at den ikke er indtrådt

til tiden t er e^{-ut}, at den indtræder i tidsintervallet t til t+dt er derfor $e^{-ut}udt$.
Denne fejl lader, når $t \leq T$, kanalen blokeret i tidsrummet T-t. Middelværdien af den ubeskyttede tid pr. periode T er derfor

$$T_M = \frac{\int_0^T e^{-ut} u(T-t)dt}{\int_0^\infty ue^{-ut}dt} = T - \frac{1}{u}(1-e^{-uT})$$

Nævneren angiver sandsynligheden for, at kanalen fejler i tidsrummet 0 til ∞ og er følgelig 1.

Den relative dødtid er da

$$D = \frac{T_M}{T} = 1 - \frac{1}{uT}\cdot(1-e^{-uT}) \sim \tfrac{1}{2}uT \quad , \quad e^{-uT} = 1 - uT + \tfrac{1}{2}u^2T^2$$

Denne tilnærmede dødtid kan indses umiddelbart af

$$D = \frac{1}{T}\int_0^T u(T-t)dt = \tfrac{1}{2}\, uT,$$

hvor der direkte er set bort fra muligheden af, at der kan indtræde mere end een fejl i intervallet T.

n ud af m koincidenssystem.

Ved dette benyttes m kanaler, der kobles, så der kræves trip-signal fra mindst n af dem, før der foretages indgreb i driften.

Hyppighed af driftstop.

Sandsynligheden for at få indgreb i driften i perioden T, er sandsynligheden for at mindst n kanalen får sikker fejl i denne periode

$$P = \sum_{x=n}^{m} \binom{m}{x} (1-e^{-sT})^x (e^{-sT})^{m-x}$$

Antages kun sandsynligheden for fejl i n kanalen at være afgørende og sættes

$sT \ll 1$ fås, idet $F = \frac{1}{T} \cdot P$:

$$F = \binom{m}{n} s^n T^{n-1} \quad \text{stop}/\text{tidsenhed.}$$

Det er her forudsat, at den først ankomne sikre fejl får lov at blive stående, idet al reparation foretages ved rutineeftersyn.

Meldes de sikre fejl ved alarm, kan udskiftning ske mellem eftersynene og forudsættes, at en sikker fejl får lov at stå i tiden T_u inden den er afhjulpet, kan hyppigheden af driftstop beregnes. Rutineeftersynene får da ingen indflydelse på de sikre fejl, bortset fra den øgede sandsynlighed for stop i eftersynsperioderne, der er omtalt nedenfor.

Sandsynligheden for driftstop i perioden T_u er $T_u \cdot F(s, T_u)$, hvor $F(s, T_u)$ er hyppigheden efter ovenstående udtryk for et "n-1 ud af m-1" system. Middelafstanden mellem perioderne T_u er, da der ialt er m instrumenter $^1/m \cdot s$, og den ønskede hyppighed fås da direkte til

$$F = m \cdot s \cdot T_u \cdot \binom{m-1}{n-1} s^{n-1} \cdot T_u^{\,n-2} = m \binom{m-1}{n-1} s^n \cdot T_u^{\,n-1}$$

Det er forudsat, at systemet afprøves og eventuelt repareres efter hver periode T, i det sidst nævnte tilfælde især af hensyn til de usikre fejl. Dette medfører, at i eftersynsperioderne fjerner man enkeltvis kanalerne fra systemet, der derfor er simplere og mere sårbart i denne periode.
Hvorledes dette ytrer sig afhænger af om det tripsignal, der normalt kommer, når en kanal fjernes, optræder, eller det blokeres.

Udføres eftersynet uden blokering har man i denne periode T_s et system, hvor "n-1 ud af m-1" kanaler skal give trip for at få driftstop. Blokerer man derimod signalet, er det resterende system et "n ud af m-1" system. Hvilken mulighed man anvender afhænger af det pågældende system. Det forudsættes, at eftersynene lægges så tæt, at der er forsvindende sandsynlighed for at finde mere end een defekt kanal ved et eftersyn. Er dette ikke tilfældet, må man medregne muligheden for fejl i et "n-2 ud af m-2" eller et "n ud af m-2"-system; der kan være høj.

Antages eftersyn og reparation i middel pr. periode T at vare i tiden T_s, kan bidragene til hyppigheden af uønskede driftstop direkte findes på samme måde som for perioden T_u: Sandsynligheden for stop i perioden T_s er $T_s F(T_s, s)$, hvor $F(T_s, s)$ er hyppigheden for det system, der er effektivt i serviceperioden. Middelafstanden mellem perioderne T_s er $T + T_s$, og den ønskede hyppighed er da

$$T_s/_{T+T_s} \cdot F(T_s, s) \approx T_s/_T \cdot F(T_s, s).$$

<u>Relativ dødtid</u>.

Systemet er ude af stand til at yde beskyttelse, såfremt der er usikre fejl i for mange af målekanalerne.

Er der indtrådt usikker fejl i m-n kanalen, vil systemet blive blokeret, når der indtræder usikker fejl i endnu en kanal. Sandsynligheden for at dette sker i tidsrummet t til $t+dt$ er

$$\binom{m}{m-n} (1-e^{-ut})^{m-n} (e^{-ut})^{n} \; n \; u \; dt$$

Den ubeskyttede middeltid i en afprøvningsperiode T bliver da

$$T_m = \int_0^T \binom{m}{m-n} (1-e^{-ut})^{m-n} (e^{-ut})^{n} \; n \cdot u \cdot (T-t)dt$$

Dette integral kan umiddelbart løses, idet

$$\int_0^T (T-t)ke^{-kt}dt = T-\frac{1}{k}(1-e^{-kT}) \; , \text{ men tilnærmel-}$$

sen $uT \ll 1$ er normalt tilstrækkelig:

$$T_m = \binom{m}{m-n} n \cdot u \int_0^T (u \cdot t)^{m-n} (T-t)dt.$$

Heraf fås, idet $D = 1/T \cdot T_m$ den relative dødtid

$$D = \frac{m!}{(m-n+2)! \cdot (n-1)!} (u \cdot T)^{m-n+1} .$$

Som omtalt under systemets hyppighed F, giver serviceperioderne et simplere system, der kan give væsentlig bidrag til driftforstyrrelserne.
Serviceperiodens bidrag til den relative dødtid kan umiddelbart findes af ovenstående udtryk, idet man for formlen for det system, der er effektivt i serviceperioden indsætter $T = T_s$ og omregner D fra at være beregnet relativt til T_s til at være relativt til T ved multiplikation med T_s/T.

<u>Andre koincidenssystemer:</u>

Ud over de rene "n ud af m" systemer anvendes i nogen udstrækning koincidenssystemer, hvor man foruden kravet om, at n instrumenter skal give tripsignal samtidigt, har et bånd på, hvilke af kanalerne, der sammen kan give trip. Almindeligst er simple serie- og parallelkoblinger. Da betegnelsen serie og parellel ikke er entydige, men afhængige af kredsløbets udformning for samme principielle virkning af kredsløbet, undgås de i det følgende.

M instrumenter deles i n grupper. Mindst eet instrument i hver gruppe skal give tripsignal før nedlukning sker.

Dette system er ved relækredsløb normalt udformet som $k=m/n$ relækontakter i serie i hver af n parallelkoblede grene.

Hyppighed af driftstop.

Driftstandsning indtræder, når mindst n instrumenter giver tripsignal, når disse n instrumenter er fordelt med et instrument i hver gruppe.

Sandsynligheden for ingen fejl i k instrumenter i perioden T er $(e^{-sT})^k$. Sandsynligheden for mindst een fejl er da $1-e^{-sTk}$. Sandsynligheden for at dette sker i alle n grupper er: $(1-e^{-sTk})^n$, eller

$$F = \frac{1}{T}(1-e^{-sTk})^n$$

$$\underline{F \sim k^n s^n T^{n-1}}$$

Alle reparationer og udskiftninger foregår efter dette udtryk i eftersynsperioderne T_s.
Da sikre fejl imidlertid giver alarm, kan udskiftningerne foretages mellem eftersynene, og som for "n ud af m" systemet kan hyppigheden i det tilfælde findes som $F = m\, s \cdot T_u \cdot F(s\, T_u)$, hvor $F(s \cdot T_u)$ er den hyppighed, der findes af ovenstående udtryk for $T = T_u$ med et system bestående af $n-1$ grupper.

I lighed med tidligere regnes med, at een kanal er fjernet fra systemet i tiden T_s. Bidraget til hyppigheden af stop herfra afhænger af, om kanalen, der efterses, giver tripsignal, eller om dette blokeres.

Uden blokering, hvilket vil være det normale, har man i eftersynsperioden et system med $n-1$ gruppen på k kanaler. Resultatet kan, som tidligere omtalt, fås af de almindelige formler ved at indsætte T_s og $n-1$ for T og n og multiplicere med T_s/T. Det tilnærmede udtryk kan også indses direkte:

$$\Delta F \approx \frac{1}{T}\,(ksT_s)^{n-1}$$

Anvendes blokering har man 1 gruppe med k-1 kanaler og n-1 grupper med k kanaler. Den almindelige formel kan ikke benyttes direkte, idet begge systemdele skal give trip før stop indtræder.
Man kan derimod umiddelbart få det tilnærmede udtryk:

$$\Delta F \approx \frac{1}{T}\,(k \cdot s \cdot T_s)^{n-1} \cdot ((k-1)sT_s) = (k-1)k^{n-1} s^{n} \cdot T_s^{n}/T.$$

<u>Relativ dødtid.</u>

Sandsynligheden for at systemet blokeres på grund af usikre fejl i målekanalerne er sandsynligheden for, at k-1 kanaler i een gruppe har usikker fejl, at den sidste kanal i gruppen får en usikker fejl, samt at mindst een kanal er i drift i de andre grupper:

$$P_u = \left[n \cdot k \cdot (1-e^{-ut})^{k-1} e^{-ut}\right] \times \left[udt\right] \times \left[\sum_{1}^{k} \binom{k}{x} e^{-xut} (1-e^{-ut})^{k-x}\right]^{n-1}$$

eller med de sædvanlige tilnærmelser.

$$P_u \approx n \cdot k \cdot (ut)^{k-1} \cdot udt.$$

Heraf fås den relative dødtid:

$$D = \frac{1}{T}\int_0^T P_u(T-t)\,dt \quad \frac{n}{k+1}\, u^k T^k.$$

Foretages eftersyn uden blokering, har man i hele perioden T_s et system bestående af n-1 grupper, og bidraget til dødtiden kan beregnes af ovenstående formel, idet n-1 og T_s indsættes for n og T, og der omregnes ved multiplikation med T_s/T.

Det samme er tilfældet ved eftersyn med blokering. Her er systemet 1 gruppe med k-1 kanaler og n-1 grupper med k kanaler, og bidragene fra begge systemdele må beregnes, og adderes, idet fejl i hver del af systemet for sig kan give dødtid.

<u>M instrumenter deles i g grupper. Alle n instrumenter i mindst een gruppe skal give tripsignal før stop indtræder.</u>

Dette system realiseres ofte som et hvilestrømskredsløb med n relækontakter i parallel i hver af de g serieforbundne grupper.

<u>Hyppighed af driftstop.</u>

Sandsynligheden for at en gruppe fejler er

$(1-e^{-sT})^n$, at den ikke gør det er $1-(1-e^{-sT})^n$

at ingen grupper gør det er $(1-(1-e^{-sT})^n)^g$,

at mindst een gør det har sandsynligheden $1-(1-(1-e^{-sT})^n)^g$
og heraf

$$F = {}^1/_T(1-(1-(1-e^{-sT})^n)^g) \approx g \cdot s^n \cdot T^{n-1}.$$

I dette udtryk er forudsat, at al reparation sker ved eftersynene.

Som tidligere kan alarm ved sikker fejl og hurtig udskiftning forbedre systemet, og ovenstående udtryk kan benyttes på samme måde som ved de ovenfor omtalte systemer, idet der dog i tiden T_u må regnes med driftstop fra een gruppe med n-1 kanaler og fra g-1 grupper med n kanaler.

For bidragene under eftersynene benyttes ovenstående udtryk for F, idet man med blokering under eftersynene har g-1 grupper med n kanaler. Som tidligere indsættes T_s for T.

Ved eftersyn uden blokering har man foruden det netop omtalte system een gruppe med n-1 instrumenter. I dette tilfælde kan bidragene til F beregnes for hver del af systemet for sig og simpelt adderes, idet det er tilstrækkeligt for at få stop, at mindst een af de to systemdele giver tripsignal.

Relativ dødtid.

Muligheden for, at der til tiden t indtræder en fejl, som blokerer anlægget er, at der er indtrådt mindst een usikker fejl i hver af $g-1$ grupper og at der i intervallet t til $t+dt$ indtræder en usikker fejl i den sidste gruppe.

$$P_u = g \left[\sum_{1}^{n} \binom{n}{x} (1-e^{-ut})^x (e^{-ut})^{n-x} \right]^{g-1} (e^{-ut})^n \, n \cdot u dt.$$

Eller tilnærmet

$$P_u = g \cdot n^g \cdot u^g \cdot t^{g-1} dt$$

Heraf fås den relative dødtid

$$D = \frac{1}{T} \int_{o}^{T} P_u (T-t) = \frac{1}{g+1} (n \; u \; T)^g$$

Udføres eftersynene med blokering, har man i serviceperioden $g-1$ grupper med n instrumenter og tilvæksten i dødtid kan findes ved omregning af ovenstående udtryk som tidligere omtalt.

Udføres eftersynene uden blokering, hvilket vil være det normale, kan ovenstående ikke umiddelbart anvendes, idet systemet kan deles i $g-1$ grupper med n kanaler og een med $n-1$, og disse to grupper kan ikke uafhængigt af hinanden give dødtid.

Sandsynligheden for, at der indtræder dødtid, P_u er summen af sandsynligheden for at den ene del er blokeret af usikker fejl, medens den anden bliver det i tiden t til $t+dt$ og det omvendte.

Det tilnærmede udtryk bliver

$$P_u(t) = \left[(n\cdot u\ t)^{g-1}\right]\left[(n-1)\cdot udt\right] + \left[(n-1)u\cdot t\right]\left[(g-1)n^{g-1}u^{g-1}t^{g-2}dt\right]$$

$$P_u(t) = (n-1)g \cdot n^{g-1}u^g t^{g-1}dt.$$

Og heraf:

$$D = {}^1/T \int_o^{T_s} P_u(T_s - t) = \frac{n-1}{g+1}\, n^{g-1}u^g \cdot T_s^{\,g} \cdot \frac{T_s}{T}$$

De fundne udtryk er for de almindeligste systemer opført i følgende skema.

Litteratur.

Der findes en del artikler om sikkerhed af reaktorinstrumentering, men hovedparten tager ikke hensyn til reparations periodernes indflydelse eller til varigheden af usikre fejl.

Varigheden af usikre fejl er omtalt i nedenstående to artikler, hvoraf især den sidste giver diskussion af reparationstidens indflydelse.

I. M. Jacobs: Safety Systems for Nuclear Power Reactors. Pape r 57-9o6, AIEE Pacific General Meeting, august 1957.

E. Siddall: A Study of Serviceability and Safety in the Control System of the NRU Reactor AECL no 399.

O V E R S I G T.

System.		n ud af m system.					Mindst et af 2 i hver af 2 grupper.	Begge instrument. i mindst een af 2 grupper.
		n = 1 m = 1	n = 1 m = 2	n = 2 m = 2	n = 2 m = 3	n = 2 m = 4	n = 2 k = 2	n = 2 e = 2
Normale kredsløb med relæer		1	1 2	1 2	1 2 3 2 3 1	1 2 3 4 2 3 4 1	1 3 2 4	1 3 2 4
Bidrag fra normale driftperiode. Reparation ved eftersynene.	F D	s $\frac{1}{2}uT$	$2s$ $\frac{1}{3}u^2T^2$	s^2T uT	$3s^2T$ u^2T^2	$6s^2T$ u^3T^3	$4s^2T$ $\frac{2}{3}u^2T^2$	$2s^2T$ $\frac{4}{3}u^2T^2$
Bidrag fra normale driftperiode. Reparation af sikre fejl ved alarm i løbet af T_u	F	sikre fejl giver stop.		$2s^2T_u$	$6s^2T_u$	$12s^2T_u$	$8s^2T_u$	$4s^2T_u + 4s^3T_u^2$
Kredsløb under service ved eftersyn med blokering.			2	2	2 3 2 3	2 3 4 2 3 4	3 2 4	3 2 4
Bidrag fra service periode. Eftersyn foretages <u>med</u> blokering af tripsignal.	ΔF ΔD	0 $\frac{T_s}{T}$	$s\frac{T_s}{T}$ $\frac{1}{2}uT_s\frac{T_s}{T}$	0 $\frac{T_s}{T}$	$s^2T_s\cdot\frac{T_s}{T}$ $uT_s\cdot\frac{T_s}{T}$	$3s^2T_s\cdot\frac{T_s}{T}$ $u^2T_s^2\cdot\frac{T_s}{T}$	$2s^2T_s\cdot\frac{T_s}{T}$ $\frac{1}{2}uT_s\cdot\frac{T_s}{T}+\frac{1}{3}u^2T_s^2\cdot\frac{T_s}{T}$	$s^2\cdot T_s\cdot\frac{T_s}{T}$ $u\cdot T_s\cdot\frac{T_s}{T}$
Kredsløb under service ved eftersyn uden blokering			2	2	2 3 2 3	2 3 4 2 3 4	3 2 4	3 2 4
Bidrag fra service periode. Eftersyn foretages <u>uden</u> blokering af tripsignal.	ΔF ΔD	kan ikke ske under drift.		$s\frac{T_s}{T}$ $\frac{1}{2}uT_s\cdot\frac{T_s}{T}$	$2s\frac{T_s}{T}$ $\frac{1}{3}u^2T_s^2\cdot\frac{T_s}{T}$	$3s\cdot\frac{T_s}{T}$ $\frac{1}{4}u^3T_s^3\cdot\frac{T_s}{T}$	$2s\cdot\frac{T_s}{T}$ $\frac{1}{3}u^2T_s^2\cdot\frac{T_s}{T}$	$s^2T_s\cdot\frac{T_s}{T}+s\frac{T_s}{T}$ $\frac{2}{3}u^2T_s^2\cdot\frac{T_s}{T}$