

DRIFTSÄKERHET HOS MILITÄRA VAPENSYSTEM

*Metoder att förutberäkna funktionssäkerheten
samt tillämpning därav i samband med
utveckling av nya projekt*

STIG ÖGREN

Utgiven av
Kungl Flygförvaltningens Underhållsavdelning
1963

Innehåll

1. Mått på militära vapensystems effektivitet	5
2. Fel och felorsaker	11
3. Metoder för beräkning av funktionssäkerheten i elektriska enheter	25
Gruppmetoden	26
Faktormetoden	27
Stressmetoden	30
Exempel på beräkning av felintensiteter på komponenter med hänsyn till belastningen	36
Elektronrör	36
Halvledare	43
Motstånd	48
Kondensatorer	53
Övriga komponenter	59
Beräkningsmetodernas säkerhet.	59
4. Funktionssäkerhet och redundans	61
Aktiv redundans	62
Passiv redundans	66
5. Provning av funktionssäkerheten	72
Sekvensprovning	78
Hur många objekt skall provas?	83
6. Funktionssäkerhetskontroll vid projektering, konstruktion och tillverkning av elektronisk materiel	84
Driftsäkerhetsorganisationen	91
Kontraktsbestämmelser. Driftsäkerhetsspecifikationer	93
Konstruktion.	94
Tillverkning	99
Produktkontroll	100
Erforderlig dokumentation	102
6. Control of reliability of function when planning, designing and manufacturing electronic material	109
Organization for operational reliability	116
Contract regulations. Operational reliability specifications	118

Design	119
Manufacture	124
Product control.	125
Necessary documentation	127
Litteraturförteckning	132

Mått på militära vapensystems effektivitet

De militära vapensystemen har hittills utvecklats med den tekniska prestationen som främsta mål. Systemens driftsäkerhet har — om den överhuvud taget ägnats något större intresse — kommit i andra rummet. Man har skapat mätbara storheter för den tekniska prestationen — räckvidd, noggrannhet, känslighet o. s. v. — under det att begrepp sådana som funktions-säkerhet, underhållsriktighet, underhållssäkerhet m. m. endast varit diffusa faktorer om vilka man inte vetat stort mer än att de existerat. Man har fastställt vapensystemets operativa uppgift, konstruerat och tillverkat materielen med definierat krav på teknisk prestation för att — sedan materielen satts i tjänst — upptäcka att tillförlitligheten blivit låg och att den tekniska prestationen inte kunnat utnyttjas på grund härav.

Under de senaste åren har det emellertid allt mer klart framgått att i och med den starkt växande komplexiteten hos vapensystemen är den tekniska prestationen inte nog för att erhålla hög operativ slagkraft. Systemen måste också ha hög driftsäkerhet. Att åstadkomma vapensystem med hög operativ prestation är inte blott en teknisk fråga utan även en ekonomisk, där den operativa prestationen måste vägas mot kostnaden.

Fig. 1. Att definiera tillförlitligheten på militära vapensystem är lika viktigt som att definiera den tekniska prestationen.



I fig. 2 framställs systemeffektivitetens beroende av den militära slagkraften och den totala kostnaden för systemet.

Den tekniska prestationen innefattar systemets möjligheter att uppfylla de operativa krav, som ställs på det vad gäller t. ex. noggrannhet, känslighet, räckvidd. Driftsäkerheten innefattar bland annat funktionssäkerhet, underhållsriktighet och underhållssäkerhet varvid med underhållssäkerhet menas de för systemets underhåll erforderliga resurserna såsom personal, utrustning, utbytesenheter, reservdelar och dylikt. Den totala kostnaden kan uppdelas i anskaffningskostnad, innefattande kostnader för projektering, konstruktion, tillverkning m. m. samt driftkostnad. För att erhålla en optimal effektivitet



Fig. 2. En viktig avvägning mellan den militära slagkraften och kostnaden för systemet är förhållandet mellan slagkraft och kostnad för systemeffektivitet.

måste man väga alla dessa faktorer mot varandra. Några enkla exempel kan belysa detta:

Antag att ett vapensystem helt fyller de operativa kraven på teknisk prestation. Anskaffningskostnaden för systemet är 100 Mkr. Antag vidare att systemet är operationsklart i medeltal endast 50 % av tiden (klartillgängligheten är 0,5). »Försvarsvärdet» av detta system är då (under vissa förhållanden) blott 50 Mkr., men kostnaden för att erhålla detta försvarsvärde är 100 Mkr. Effektiviteten är i detta exempel knappast tillfredsställande.

Men driftsäkerheten kan naturligtvis höjas genom att underhållssäkerheten göres större, t. ex. genom att den personal som svarar för det preventiva underhållet eller reparation av uppkomna felaktigheter ökas eller genom att utbytesenheter anskaffas i större omfattning och till större antal. Enligt amerikanska uppgifter är det inte ovanligt att kostnaderna för underhåll av militära vapensystem nu uppgår till belopp som under brukningstiden är 10 till 100 gånger så stora som anskaffningskostnaden. Återigen framstår vägningen mellan effektivitetsfaktorerna som nödvändig: En måttlig ökning av kostnaderna för att erhålla högre funktionssäkerhet kan medföra betydande kostnadssänkningar för underhållsverksamheten och således bättre utnyttjning av de utlagda pengarna.

Elektronisk materiel tenderar i dag att bli alltmer komplicerad och detta gör det allt svårare att uppnå acceptabla funktionssäkerhetsvärden. En studie inom amerikanska flottan år 1950 gav till resultat att endast 33 % av den elektroniska utrustningen fungerade tillfredsställande. En annan studie visade att i 165 000 elektroniska apparater uppträdde årligen 1 000 000 komponentfel exklusive rörfel.

Erfarenheterna från det svenska flygvapnet slår fast att ungefär 50 % av alla fel i elektroniska apparater beror på andra komponenter än elektronrör. Om det således vore möjligt att använda fullständigt funktionssäkra rör i apparaturen, skulle ändå nuvarande felintensitet minska med endast hälften.

I och för sig vore detta ett icke föraktligt resultat men stilleståndstiden på grund av reparation skulle dock inte bli hälften av nuvarande. Det tar nämligen som regel många timmar (ibland dagar) att lokalisera och byta ut en felaktig komponent mot kanske 10 minuter att byta ett rör. Detta betyder att 80 å 90 % av den tid, som materielen är ur funktion för underhållsåtgärder, beror på fel i komponenter av annat slag än rör. Av detta framgår också att låg funktionssäkerhet på materielen inte alltid kan kompenseras med stor kapacitet på underhållsorganisationen.

Det är således nödvändigt att göra militär elektronisk materiel funktionssäkrare. Man kan formulera ett flertal skäl för detta, några av de viktigaste är:

1. Felintensiteten på elektronisk utrustning växer proportionellt med utrustningens komplexitet.
2. Det övervägande antalet fel i militära elektroniska utrustningar är plötsliga fel, som uppstår slumpvis i tiden och inte kan förutsägas.
3. Ett mycket stort antal av felen hänför sig till komponenter av annat slag än elektronrör. Underhållsresurserna för reparation av dylika fel måste vara betydligt större än för reparation av rörfel.
4. Materielen skall fungera i allt »sämre» miljöer, t. ex. stora höjder, låga temperaturer, snabba temperaturväxlingar etc. Felintensiteten stiger mycket snabbt vid försämring av miljön.

Låg funktionssäkerhet hos materielen kostar pengar. En enda dålig komponent kan äventyra en hel stations möjligheter att fullgöra den prestation, som man väntar av den. Stationen är mycket dyrbar i förhållande till komponenten men en utebliven funktion av stationen under en viss tid kan vålla ekono-

misk katastrof. Att försöka helt kompensera en låg funktions-säkerhet med hög insats av underhållskapacitet är åtminstone för närvarande i allmänhet en mycket dålig lösning. Den maximala effektiviteten nås inte med sådana medel.

För att man skall kunna väga mellan de faktorer, som påverkar ett vapensystems effektivitet, måste de ingående faktorerna kunna mätas och uttryckas i specificerade värden. Som redan framhållits, kan den tekniska prestationen relativt lätt och entydigt värderas, under det att driftsäkerheten åtminstone hittills inte har värdesatts på ett entydigt sätt. I det följande skall metoder för en sådan värdesättning diskuteras.

Fel och felorsaker

Fel definieras i den av Flygvapnet utgivna »Termer och definitioner inom tillförlitlighetstekniken» som

»avvikelse från en uppställd fordran med avseende på viss egenskap hos en enhet».

Varje produkt kommer förr eller senare att avvika från den från början uppställda fordran: det inträffar ett fel. Om produkten är uppbyggd av ett antal delar kan ett fel i en del uppstå helt oberoende av fel i produktens övriga delar, felet kallas då *primärfel* (= oberoende fel) till skillnad från *sekundärfel* (= beroende fel), som är av primärfel vållat ytterligare fel. I vissa fall behöver ett fel i en av produktens delar inte inverka på produktens funktionsförmåga, man kallar detta ett *funktions-tillåtande* fel till skillnad från ett *funktionshindrande* fel, (fel, som påverkar överordnad enhets förmåga att fungera på avsett sätt).

I driftsäkerhetsforskningen är det emellertid nödvändigt att bilda sig en uppfattning om *hur* och *när* ett fel uppstår. Ett bildäck t. ex. kan fungera oklanderligt under 40 000 km körning men är då så nedslitet att det byts av säkerhetsskäl, däcksmönstret är mindre än 1 mm tjockt. På grund härav fyller inte däcket »den uppställda fordran med avseende på viss egenskap», nämligen säkerheten. Ett fel har således inträffat och det har uppstått på grund av gradvis förändring av en egen-

skap. Man kallar detta *gradvist fel* (eller utslitningsfel, som i vissa fall kan vara en mer adekvat benämning).

Om emellertid däckat går sönder under de första timmarna av dess användning, t. ex. genom ett fabriktionsfel eller genom att det skurits sönder av ett främmande föremål på vägen, har det utsatts för ett *plötsligt fel*, d. v. s. ett fel som uppstår snabbt och utan förvarning.

Dessa två felslag — gradvisa fel och plötsliga fel — har var sin karaktäristiska frekvensfunktion i förhållande till tiden. De gradvisa felen kan ofta beskrivas med normalfördelningens frekvensfunktion, de plötsliga felen med exponentialfördelningens. Följande exempel kan tjäna som generell beskrivning över skillnaden mellan de två felslagen:

Ett prov med 1 500 glödlampor gav till resultat, att de första felen förekom efter 1 200 timmars lystid. Efter 3 200 h hade

Tabell 1. Fel per 200 h lystidsintervall för 1 500 glödlampor.

Lystidsintervall	Antal fel	Fel % av 1 500	Fel % av överlevande
1 200—1 400	20	1,34	1,35
1 400—1 600	53	3,53	3,70
1 600—1 800	112	7,45	8,52
1 800—2 000	238	15,90	22,10
2 000—2 200	299	20,00	38,40
2 200—2 400	305	20,30	64,70
2 400—2 600	249	16,60	111,0
2 600—2 800	152	10,15	211,0
2 800—3 000	49	3,26	213,0
3 000—3 200	23	1,47	
Summa	1 500	100,00	

samtliga glödlampor gått sönder. Tabell 1 visar det klassindelade materialet.

Ur detta materiel erhålles med kända metoder medellivslängden m och standardavvikelsen s :

$$m = 2216$$

$$s = 365$$

I figur 3 har ett stolpdiagram över antalet fel per lystidsintervall upprättats — felfrekvensen. Därjämte har en normal frekvenskurva inlagts.

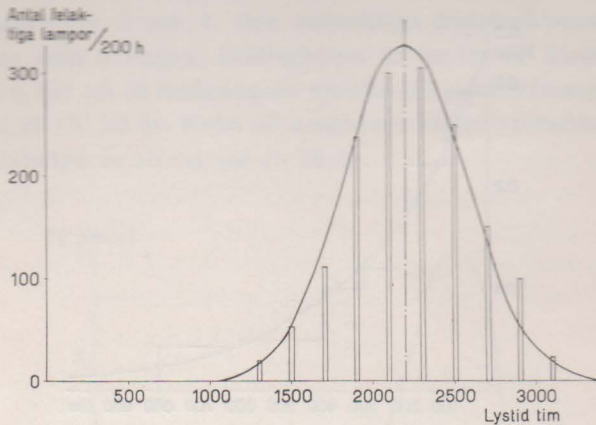


Fig. 3. Stolpdiagram över antal felaktiga glödlampor per 200 h lystidsintervall.

Ett prov med livslängder hos en viss typ av indikatorrör gav följande värden:

Tabell 2. Fel per 100 h drifttidsintervall för ett parti indikatorrör.

Drifttidsintervall	Fel % av hela partiet	Fel % överlevande	Fel % av överlevande pr h ¹
0—100	29	71	0,34
100—200	22	49	0,37
200—300	12	37	0,28
300—400	10	27	0,31
400—600	10	17	0,25
600—800	9	8	0,36
800—	8	—	

¹ Proportionerat mot klassmitten

Av tabellen framgår att felprocenten är störst vid drifttidens början för att så småningom minska alltmer. I fig. 4 har ett histogram över det procentuella antalet felaktiga rör per timme i förhållande till drifttiden uppritats. Därjämte har den anpassade exponentialfördelningens frekvensfunktion ritats in:

$$f(t) = 0,0033 \exp (-0,0033 t)$$

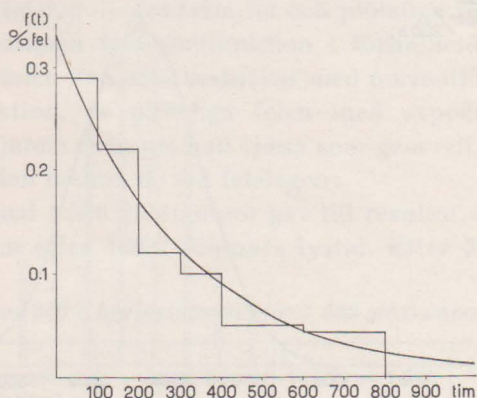


Fig. 4. Histogram över antal felaktiga indikatorrör per 100 h driftsintervall.

Av dessa två exempel framgår tydligt att de gradvisa felen gör sig gällande först efter en viss drifttid — som kan vara lång eller kort — under det att de plötsliga felen gör sig gällande redan vid drifttidens början. Man kan redan här dra slutsatsen att verkan av de gradvisa felen kan undvikas genom att underhållsåtgärder sätts in — exempelvis genom utbyte av komponent eller enhet — *innan funktionshindrande fel inträffar* under det att detta inte är möjligt ifråga om de plötsliga felen.

Även indikatorrören i exemplet utsätts givetvis för en gradvis förslitning i likhet med glödlamporna, men verkan av denna förslitning sätter in först efter en förhållandevis lång funktionsstid, som kan uppskattas till upp till 10 000 timmar. I föreliggande utredning antas, att all i detta sammanhang aktuell

der företas efter bestämda tidsintervaller. Det bör emellertid i detta sammanhang framhållas, att, om komponenterna i en enhet under en viss tidsperiod kan beräknas falla ur funktion enbart på grund av plötsliga fel, det därmed inte är givet att även enheten faller ur funktion enligt en exponentiell fördelning. Toleransavvikelserna kan nämligen ackumuleras så att enhetens funktion försämras eller upphör helt. I detta fall har alltså inga »fel» uppstått på komponenterna, men väl i enhetens funktion. Önskvärt är emellertid att hänsyn härtill tas vid konstruktionen, i många fall kan det dock vara svårt att förutse dylika händelser.

Om felfrekvenserna för olika slag av komponenter är kända — t. ex. genom långvariga försök i olika arbetsmiljöer och vid olika belastningar — kan felintensiteterna lätt beräknas.

Livslängdsfördelningen definieras som sannolikheten av att livslängden T är lika med eller mindre än tiden t , d. v. s.

$$F(t) = P(T \leq t)$$

Då blir sannolikheten att T är större än t , d. v. s. approximativt det relativa antalet överlevande

$$R(t) = 1 - F(t)$$

där $R(t)$ benämnes funktionssannolikheten. Frekvensfunktionen $f(t)$ är livslängdsfördelningens derivata

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

Enligt definitionen på felintensiteten kan denna uttryckas:

$$z(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Fig. 6 visar dessa funktioner grafiskt, den vänstra figuren representerar de gradvisa felen (normalfördelade) och den högra figuren representerar de plötsliga felen (exponentialfördelade).

materiel utsätts för gradvis förslitning samt att plötsliga fel inträffar under materielens livstid. Mängden av plötsliga fel varierar med olika materielslag.

Felfrekvenskurvan för en enhet, som är uppbyggd av ett antal komponenter, får, på grund av att enhetens funktion påverkas av komponenter, utsatta både för gradvisa fel och slumpfel, ett mer komplicerat utseende än de frekvenskurvor, som visats i fig. 3 och 4. Den mänskliga dödsfrekvensen kan här tjäna som exempel. Dödligheten är under de första åren hög, fig. 5, för att så småningom sjunka till ett minimum under åldrarna 20 till 50 år. Från 50-årsåldern sätter »förslitningen» in, dödligheten är störst vid ca 75 år.

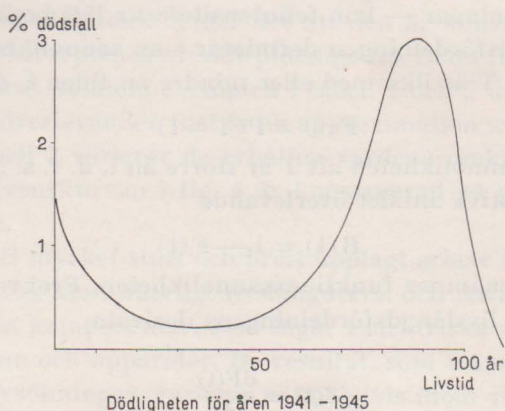


Fig. 5. Dödligheten i Sverige åren 1941—1945.

Man har en relativt enkel metod att beräkna funktionssäkerheten på en enhet, som är sammansatt av ett antal komponenter: Genom att beräkna komponenternas felintensiteter och addera dessa kan man erhålla ett uttryck för funktionssäkerheten vid olika tidsperioder. Det visar sig emellertid vara praktiskt att vid dylika beräkningar skilja mellan de gradvisa felen och de plötsliga felen, då — som förut framhållits — verkan av de gradvisa felen kan undvikas genom att underhållsåtgär-

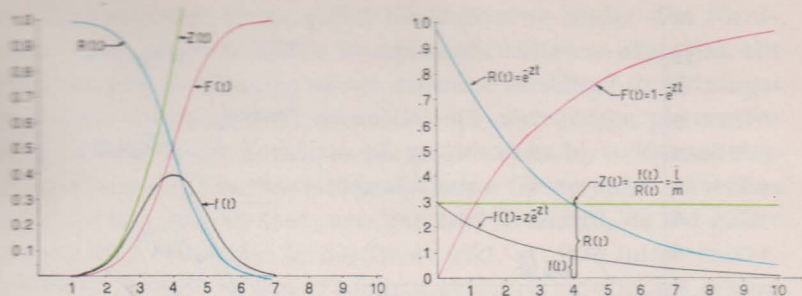


Fig. 6. Frekvensfunktion, livslängdsfördelning, funktionssannolikhetsfördelning och felintensitet för gradvisa fel (vänstra figuren) och plötsliga fel.

Felintensiteternas förlopp i tiden — $z(t)$ — är som synes av helt olika utseenden. På den vänstra figuren stiger felintensiteten mot oändligheten under det att den är *konstant* på den högra figuren, representerande plötsliga fel. Detta framgår också av de förut nämnda exemplen i tabell 1 och 2 där rubriken »fel, % av överlevande» just är en approximation av felintensiteten. I tabell 2 varierar de erhållna värdena omkring 0,33 % och felfrekvenskurvan i fig. 4 är konstruerad på grundval av detta värde.

Genom ett mycket stort och brett upplagt arbete i skilda länder undersöks kontinuerligt livslängderna och felfrekvenserna för de flesta komponenter, som ingår i elektriska och elektroniska system och apparater. De resultat, som framkommer ur dessa undersökningar, varierar naturligtvis inom vida gränser, beroende exempelvis på olika tillverkares förmåga och vilja att tillverka funktionssäkra komponenter. Man kan emellertid med i de flesta fall gott resultat använda de på detta sätt erhållna värdena för beräkning av funktionssäkerheten. Som framgått av det föregående kan man addera felintensiteterna för de plötsliga felen, som uppträder på komponenterna i en apparat eller enhet, varvid man erhåller enhetens totala felintensitet för plötsliga fel. Även felintensiteterna för de gradvisa felen kan adderas till en resulterande felintensitet, vilken kan omvandlas till en frekvensfunktion för dessa fel, fig. 7.

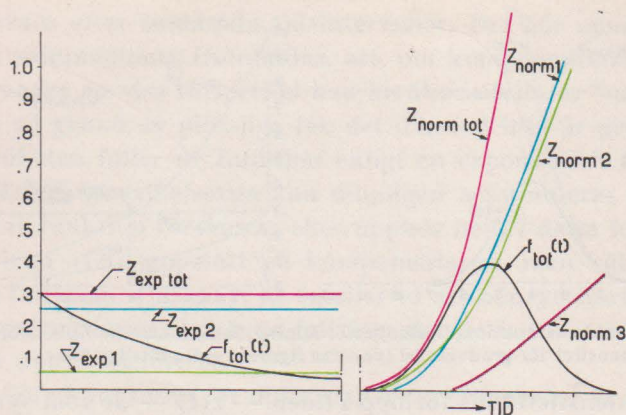


Fig. 7. Addition av felintensiteter för plötsliga och gradvisa fel.

I figuren antyds felintensiteterna för ett antal komponenter, z_{exp} för de plötsliga felen och z_{norm} för de gradvisa. Genom att addera felintensiteterna erhålls resp. summor som betecknas med $z_{\text{exp tot}}$ och $z_{\text{norm tot}}$. Frekvenskurvorna betecknas med $f_{\text{tot}}(t)$. Intensiteten för de plötsliga felen är konstant med tiden men växer med tiden för de gradvisa felen.

De i en enhet ingående komponenterna bör fungera under en mycket lång tid, d. v. s. slitningen bör vara så liten som möjligt. Den normala felfrekvenskurvan i fig. 7 bör ligga så långt åt höger som möjligt. Under de senaste 10 åren har komponentkvaliteten utvecklats på ett imponerande sätt, konstruktörerna av komplicerade enheter har nu för tiden möjligheter att bygga upp sina konstruktioner på tillförlitliga komponenter med lång livslängd. Den militära vapenmaterielens utveckling ur operativ synpunkt medför paradoxalt nog att fordran på lång livslängd inte är så accentuerad som inom många andra områden. Kravet på vapenmateriel med allt bättre tekniska prestanda såsom känslighet, noggrannhet, räckvidd m. m. stiger så snabbt, att det som regel inte är möjligt att möta denna utveckling genom modifieringar av äldre materiel. De plötsliga felens inverkan på en apparats funktion blir därför av domi-

nerande intresse. Detta gäller dock givetvis under den förut-
sättningen, att den bättre komponentkvaliteten utnyttjas till
fulla vid konstruktionen så att maximal livslängd ur slitnings-
synpunkt uppnås, samt dessutom att nödvändiga preventiva
underhållsperioder beräknas på grundval av bl. a. intensiteten
av gradvisa fel. Funktionssannolikheten för en enhet påverkas
mest av de komponenter, som har kort livslängd, då det gäller
de gradvisa felen. Det är därför av vikt, att inte minst tillver-
karna av enheter påverkar komponentfabrikanterna att genom
forsknings- och utvecklingsarbete förbättra livslängden på så-
dana komponenter.

Genom att livslängden på komponenterna i en enhet är olika
kommer enheten att falla ur funktion med olika tidsmellanrum.
Följande exempel får illustrera principen av detta förhållande:
Antag att en luftkompressor har en medellivslängd av 1 000 h
till det första felet, som består i att ett lager slitits ut. Lagret
byts, varefter kompressorn går ytterligare 600 h, då pack-
ningarna har föråldrats och blivit otäta. Packningarna byts.
Efter ytterligare 300 h uppträder sprickor i kompressorhjulet,
som repareras eller byts ut. Om inte det först nämnda lagret
byts ut i samband härmed, har kompressorn endast 100 h funk-
tionstid till dess detta måste göras.* Genom undersökningar
inom detta område är man benägen att dra den slutsatsen, att
frekvensfunktionen för fel av detta slag förändras från den
normala till den exponentiella. Om glödlamporna i tabell 1 och
fig. 3 byts ut mot nya lampor omedelbart då fel inträffar (så
att 1 500 lampor ständigt hålls lysande), kommer de första
utbytena att ske efter omkring 1 000 h lystid. Eftersom utbytet
av lamporna inte sker samtidigt utan först när fel inträffar, blir
frekvenskurvan lägre och bredare. Standardavvikelsen för kur-
van i fig. 3 är 365. Man kan visa att standardavvikelsen för
felfrekvensen av de nya lamporna approximativt är 2s, i detta
exempel således $2 \cdot 365 = 730$. Medellivslängden är givetvis

* Observera att medellivslängden i verkligheten är en stokastisk variabel och
ej en konstant som förutsattes i exemplet.

$2m = 2 \cdot 2\,216 = 4\,432$. Felfrekvenskurvan för nästa utbyte av lampor kommer att ha medelvärdet lika med $3m$ och standardavvikelsen $3s$. Adderas nu kurvorna i fig. 8 inses lätt att antalet felaktiga lampor per tidsenhet blir konstant, felintensiteten har stabiliserats till ett konstant värde och frekvensfunktionen har förändrats från normal till exponentiell.

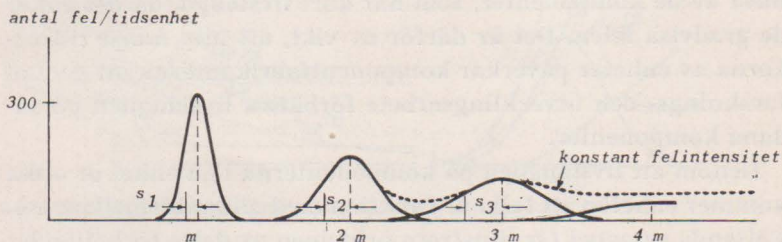


Fig. 8. Den normalfördelade felintensiteten övergår till exponentialfördelad vid omedelbart utbyte av felaktig glödlampa.

Det kan på grund härav vara riktigt att tala om en tredje felfrekvensfunktion »felfrekvens med reparation», vars felintensitet i början överensstämmer med den normala för att sedan övergå till ett konstant förlopp. Man kan beskriva förloppet enligt figur 9. Under den första driftperioden till tiden t_1 ansluter sig felintensiteten till den normala för att under tiden t_1 till t_2 utgöra en blandning av normal och exponentiell intensitet. Efter tiden t_2 blir felintensiteten konstant.

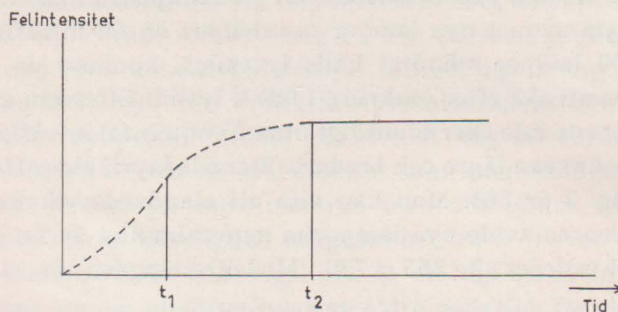


Fig. 9. Felintensitetens förlopp vid reparation av enheter med normalfördelad frekvens.

Det finns naturligtvis i och för sig ingen gräns för en enhets livslängd, det finns bilar från tidigt 1900-tal som fortfarande fungerar. I stället är frågan om lönsamheten att underhålla material under mycket långa tidsperioder avgörande. Inom den militära materielsektorn kommer även — som tidigare framhållits — kravet på utökad operativ användbarhet.

Felintensitetens förlopp under en enhets livstid kan framställas enligt fig. 10. Efter en första period med relativt hög felintensitet, inkörningstiden, stabiliseras den till ett värde, som förblir konstant under den nyttiga tiden, för att under utgångstiden öka i värde. De fel som inträffar under inkörningsperioden, uppkommer på grund av ofullkomlig tillverkning eller fel i tillverkningen, svagheter i råmaterialet m. m. Verkan av dessa

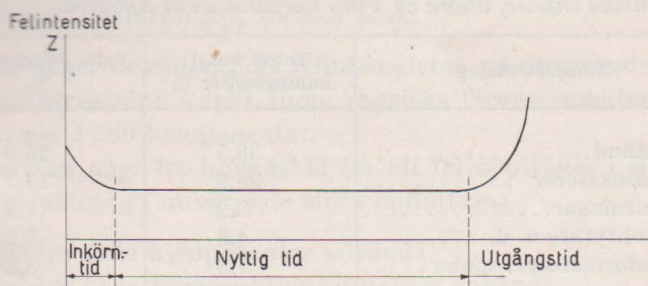


Fig. 10. Felintensitetens förlopp under en enhets livstid.

fel kan man övervinna genom att före leverans köra enheten ett antal timmar, varvid man byter ut felaktiga underenheter. Detsamma gäller för de underenheter (reservenheter), som byts under enhetens nyttiga tid. Före utbytet är det lämpligt att köra underenheterna i en provstation eller under förhållanden som är lika med driftförhållandena.

De fel som inträffar under utgångstiden, uppkommer på grund av »normala» åldringsprocesser och slitning.

Under den nyttiga tiden åter orsakas fel av så många skiftande påkänningar, att händelserna inträffar fullkomligt slumpartat. Både gradvisa fel och plötsliga fel inträffar.

Som redan nämnts i inledningen förorsakas fel i elektroniska apparater till ca 50 % av andra komponenter än elektronrör. Då dylika fel i allmänhet är betydligt svårare att reparera än rörfel, är det nödvändigt att höja funktionssäkerheten inte blott genom anskaffning av bättre och funktionssäkrare rör utan även genom att angripa felkällorna för övriga komponenter. Det kan vara av intresse att ta del av några amerikanska undersökningar av felintensiteten hos olika komponenter i elektroniska enheter. Tabell 3 visar de 7 komponenter (utöver elektronrören), som vållar de flesta felen. Över 60 % av alla fel i elektroniska apparater beror av fel i dessa komponenter.

Tabell 3. Undersökning av felintensiteten hos olika komponenter i elektroniska enheter, utförd av Vitro Corporation of America.

Komponentslag	Totalt antal komponenter %	Total felintensitet %
Motstånd.....	38,5	26,6
Kondensatorer	26,9	13,7
Anslutningar.....	3,2	11,0
Strömbrytare o. d.	4,8	5,2
Transformatorer, spolar.....	7,3	3,8
Reläer.....	0,7	0,8
Mätare o. d.	0,6	0,8
Summa	82,0	61,9
42 andra komponenter.....	18,0	38,1
Summa	100,0	100,0

Ungefär 20 % av alla fel utgjordes av mekaniska skador, resterande 80 % berodde på elektriska ofullkomligheter. Av tabellen framgår att motstånd och kondensatorer, som är de mest förekommande, svarar för 40 % av alla fel. En vidare bearbetning av materialet visade, att hälften av komponentfelen berodde på mindre god konstruktionspraxis och den andra hälften på verkliga fel i komponenterna.

Från felrapporter, insamlade från engelska marinen, armén och flygvapnet, har man upprättat en lista över felintensiteten i fallande storleksordning hos olika komponenter och anser att den kan hjälpa konstruktörerna att göra funktionssäkrare konstruktioner: (Listan tar inte hänsyn till det relativa antalet komponenter i elektroniska konstruktioner).

1. Elektronrör
2. Motstånd
3. Kondensatorer
4. Transformatorer
5. Strömbrytare
6. Reläer
7. Mätare
8. Kablar, anslutningar, socklar o. d.

Man anger dessutom, att felintensiteten på nuvarande elektronisk utrustning i drift, inom engelska försvarsmakten, är 5 per år per 1 000 komponenter.

Man kan ange tre huvudskäl för att fel uppträder i elektronisk utrustning i nuvarande stora omfattning:

- a) mindre goda komponenter används
- b) mindre goda konstruktionsprinciper används
- c) teoretiska grunder för konstruktionen finnas inte i tillräcklig omfattning. Forskning är erforderlig.

Det är naturligtvis teoretiskt möjligt att genom en mer påkostad tillverknings- och provningsprocedur av komponenter nedbringa felintensiteten till mycket låga värden. Ett sådant förfarande kostar emellertid mycket pengar, och det är förklarligt om inte komponenttillverkare velat investera de erforderliga medlen i sin fabrikation med åtföljande högre komponentpriser. Kravet på funktionssäkra komponenter har nog alltid funnits men sambandet mellan å ena sidan pris och kvalitet på komponenter och å andra sidan priset på och omfattningen av underhållsorganisationen med dess personal, utrust-

ning och reserver, som såvitt möjligt skall kompensera bristen i funktionssäkerhet — det sambandet har sällan tagits med i kostnadskalkylen. Det är emellertid en absolut nödvändighet att hänsyn tas till detta samband, i annat fall kan största möjliga effektivitet inte uppnås.

Det andra skälet, mindre goda konstruktionsprinciper, beror på att de högkvalificerade konstruktörer, som får i uppdrag att utveckla allt mer avancerad militär vapenmateriel, hittills strävat i första hand efter den rent tekniska prestationen och först i andra hand efter funktionssäkerheten. Om dessa båda krav kommit i konflikt med varandra har nog mestadels kravet på funktionssäkerhet fått vika. Detta har otvivelaktigt medfört en mer storartad teknisk utveckling än vad som annars varit möjligt, men utvecklingen har nu kommit till en punkt där man inte vidare kan negligera funktionssäkerheten. Att disponera över produkter, som kan utveckla en hög prestation men som har en låg funktionssannolikhet är troligen i de allra flesta fall ofördelaktigare än att disponera över materiel med något mindre prestationsförmåga men som kan fås att fungera säkert.

Det tredje och sista skälet är mer svårangripbart. Forskning måste till för utveckling av nya komponenter och enheter och forskningens resultat måste även provas praktiskt. Därför måste vissa »risker» ur funktionssäkerhetssynpunkt tas vid konstruktion av materiel enligt delvis nya principer. Dessa »risker» kan mycket väl tas, om större hänsyn till de två första skälen kan vinna insteg hos tillverkare av komponenter och enheter.

3

Metoder för beräkning av funktionssäkerheten i elektriska enheter

I föregående kapitel har framhållits, att all materiel slits gradvis samt att plötsliga fel inträffar härunder. Genom preventivt underhåll kan i viss utsträckning verkan av de gradvisa felen övervinnas, varför huvudintresset i fortsättningen kommer att ägnas åt de plötsliga felen. Dessa är också, som tidigare visats, förhärskande i elektriska enheter.

På sid. 16 angavs de generella uttrycken för livslängdsfördelning, funktionssannolikhet m. m. För plötsliga fel med exponentiell livslängdsfördelning gäller:

$$F(t) = 1 - e^{-zt}$$

$$R(t) = e^{-zt}$$

$$f(t) = z e^{-zt}$$

$$z(t) = \frac{1}{m}$$

Om funktionssannolikheten för komponenterna i en enhet betecknas med p_1, p_2, p_3 o. s. v. är den totala funktionssäkerheten

$$R = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \dots = \prod_{i=1}^n p_i$$

som kan skrivas

$$R(t) = e^{-z_1 t} \cdot e^{-z_2 t} \cdot e^{-z_3 t} \dots = e^{-t \sum z_i}$$

där $z_1, z_2, z_3 \dots$ betecknar komponenternas felintensiteter. Om således komponenternas felintensiteter är kända kan man genom att addera dem få ett uttryck för enhetens funktionssäkerhet, förutsatt att komponenterna »är i serie».

Man använder i huvudsak tre metoder för dessa beräkningar, nämligen *komponentgruppmetoden (gruppmetoden)*, *applikationsfaktormetoden (faktormetoden)* och *komponentstressmetoden (stressmetoden)*.

Gruppmetoden

Denna metod kan användas på ett tidigt utvecklingsstadium och innebär att man uppskattar det antal grupper av samhörande komponenter, som en konstruktionsenhet beräknas komma att bestå av. Dessa komponentgrupper kan utgöras av antalet elektronrör, antalet halvledare o. s. v. Varje grupp tilldelas en felintensitet och räknas samman för hela enheten. Amerikanska flygvapnet använder följande formel (se MIL — R — 26474 USAF § 3.2):

$$z = 10^{-6} (30 N_t + 15 N_m + 2 N_x + 0,5 N_c)$$

där

N_t = antalet elektronrör

N_m = antalet motorer och reläer

N_x = antalet halvledare

N_c = antalet övriga komponenter

Rome Air Development Center har utarbetat följande metod:

Tabell 4 upptar den uppmätta felintensiteten för ett antal representativa komponenter, ingående i aktuell elektronisk materiel inom US Air Force samt medelantalet komponenter per elektronrör i dessa utrustningar. Genom att multiplicera

antalet komponenter per rör med respektive felintensiteter samt därefter addera dessa enligt tabellens sista kolumn erhåller man en total felintensitet av 5,65 N % per kh, där N är antalet elektronrör i en enhet. Medellivslängden blir då:

$$m = \frac{10^5}{5,65 N} = \frac{1,8 \cdot 10^4}{N}$$

Tabell 4. Data för viss elektronisk materiel inom US Air Force.

Komponentslag	Uppmätt felintensitet % per kh	Antal komponenter per elektronrör	Sammanlagd felintensitet vid N elektronrör i enheten, % per kh
Elektronrör	4,20	1,00	1,00 N 4,200 = 4,200 N
Motstånd	0,036	5,00	5,00 N 0,036 = 0,180 N
Kondensatorer	0,015	2,80	2,80 N 0,015 = 0,042 N
Reläer	0,433	0,26	0,26 N 0,433 = 0,113 N
Kristalldioder	4,897	0,09	0,09 N 4,897 = 0,441 N
Transformatorer och spolar	0,075	0,93	0,03 N 0,075 = 0,070 N
Anslutningar	0,074	1,20	1,20 N 0,074 = 0,089 N
Omkopplare	0,094	0,49	0,49 N 0,094 = 0,046 N
Fläktar, motorer	0,547	0,10	0,10 N 0,547 = 0,055 N
Övrigt	0,796	0,52	0,52 N 0,796 = 0,414 N
			Summa 5,650 N

Faktormetoden

Faktormetoden kan användas först när projektarbetet framskridit så långt att man vet vilka komponenter som skall ingå i konstruktionen. Varje komponent tilldelas en felintensitet som hänför sig till normalmiljö. Felintensiteterna adderas varpå man kan bilda sig en uppfattning om funktionssäkerheten »i normalmiljö».

I fig. 11 visas ett schema över en enkel multivibrator bestående av 2 transistorer, 4 dioder, 6 motstånd och 28 lödpunkter.

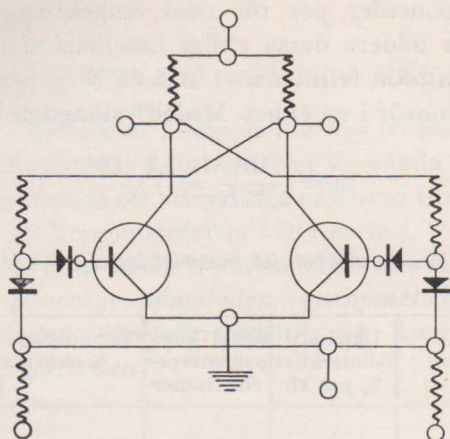


Fig. 11. Multivibrator bestående av 2 transistorer, 4 dioder, 6 motstånd och 28 lödpunkter. Om man känner felintensiteterna kan apparatens funktionssäkerhet beräknas.

Om man förutsätter att multivibratorn mister sin funktion vid varje inträffat komponentfel samt att fel på en komponent inte påverkar andra komponenter, kan den totala felintensiteten lätt beräknas enligt följande:

Komponent	Antal	Felintensitet % per kh	Summa % per kh
Transistor	2	0,120	0,240
Diod	4	0,065	0,260
Motstånd	6	0,052	0,312
Lödpunkt	28	0,003	0,084
			Summa 0,896

Sammanlagda felintensiteten är 0,896 % per kh och medeltiden mellan fel blir:

$$m = \frac{10^5}{0,896} = 111\ 600\ \text{h}$$

Apparatens funktionssäkerhet under drifttiden t blir då:

$$R = e^{-0,896 t \cdot 10^5}$$

Felintensiteten brukar uttryckas i % per kh, vilket är liktydligt med antal fel per 100 000 h. Andra uttryckssätt är antal fel per 10^6 h och den i USA ibland använda enheten »bits» = antal fel per 10^8 h.

Man har sökt att bilda sig en uppfattning om funktionssäkerheten i andra miljöer än »normalmiljö» genom att multiplicera felintensiteten med olika applikationsfaktorer gällande för den miljö eller applikation som komponenten avses för. Svårigheten är att finna riktiga faktorer. Undersökningar har gjorts i USA vid i synnerhet Martin Denver, men det synes som om man är i färd med att modifiera sina publicerade resultat. G. W. A. Dummer och N. Griffin vid Royal Radar Establishment, Ministry of Aviation, England, har gjort undersökningar på elektronisk utrustning och hävdar att felintensiteten på komponenter som arbetar i goda miljöer, t. ex. markstationer (utan stötar och vibrationer) är 10 till 20 gånger mindre än för komponenter i flygburna stationer.

Försök pågår inom det svenska flygvapnet att undersöka miljöns påverkan på felintensiteten men det bör framhållas att en enhet skall konstrueras för den miljö som den skall arbeta i och inte för någon slags »normalmiljö». Om man exempelvis vet att enheten kommer att utsättas för stötar eller vibrationer skall komponenterna i möjligaste mån skyddas för detta genom lämpliga mekaniska konstruktioner. Om man vet att temperaturväxlingarna kommer att bli stora skall man se efter om det finns möjligheter att genom uppvärmning eller avkylning av komponenterna kompensera dessa växlingar.

Gruppmetoden och faktormetoden är exempel på överslagsberäkningar, som kan användas vid skilda tillfällen, då man önskar en grov uppskattning av funktionssäkerheten, t. ex. vid arbete med olika projekt. De kan vara nyttiga, då man önskar veta om det överhuvud taget är realistiskt att bearbeta ett projekt vidare med hänsyn till funktionssäkerheten. En fullständig genomräkning av funktionssäkerheten hos en enhet är nämligen i allmänhet ett stort och tidsödande arbete, varför

överslagsmetoder med fördel kan användas för besparing av tid och arbete.

Stressmetoden

Stressmetoden kan tillämpas då man har kännedom om komponenttyp, arbetskvt och omgivningstemperatur. Felorsaker-na är i huvudsak av tre slag: temperaturpåkänningar, elektriska påkänningar och mekaniska påkänningar. Givetvis kan fel orsakas av många andra faktorer, men de nämnda får anses som de väsentligaste. Vid beräkningar enligt stressmetoden gäller det alltså att undersöka vilken inverkan dessa felorsaker har på den aktuella materielen och att på grundval härav beräkna felintensiteterna. Om en enhet består av N komponenter, skall enhetens totala felintensitet beräknas enligt uttrycket:

$$z = \sum_{i=1}^N (z_t + z_e + z_m)_i$$

där z_t , z_e och z_m betecknar den i :te komponentens felintensitet med avseende på temperaturpåkänning samt elektrisk och mekanisk påkänning.

Vid en beräkning av funktionssannolikheten enligt stressmetoden måste man fullständigt känna varje komponent, dess typ, fabrikat, elektriska och mekaniska belastningar, miljö (i vilken komponenten skall arbeta), tillämpningar m. m. Således måste föreligga en fullt utarbetad konstruktion, om en säker efterkalkyl skall kunna utföras. Å andra sidan kan konstruktören, jämsides med den rent tekniska konstruktionen, beräkna funktionssäkerheten för att på så sätt erhålla balans mellan teknisk prestation och funktionssäkerhet. *Det är här funktionssäkerhetskalkylen har sitt berättigande.* Att utföra en efterhandskalkyl kan ju vara till glädje i många sammanhang, men funktionssäkerhetsberäkningar *måste* och *skall* utföras i samband med konstruktionen för att systemet skall bli effek-

test. Det räcker inte med att man använder »de till buds stående bästa komponenterna». Genom en ur funktionssäkerhets synpunkt mindre god konstruktionspraxis kan ju de låga felintensiteterna på goda komponenter bringas till mycket höga värden, och därigenom spolieras vad man velat åstadkomma, nämligen funktionssäkra enheter.

Som förut framhållits, är en komponents felintensitet beroende av den belastning, den utsätts för. Men också andra faktorer påverkar felintensiteten: den temperatur, i vilken komponenten arbetar, det lufttryck som är rådande, luftfuktigheten, magnetiska fält, vibrationer, accelerationer m. m. Uppgifterna om komponenternas miljöberoende är nu relativt knapphändiga med undantag för temperaturberoendet, för vilket mycket djupgående forskningsmateriel framlagts.

Man vill, genom att belasta komponenterna på ett för funktionssäkerheten framgångsrikt sätt, söka erhålla minsta möj-

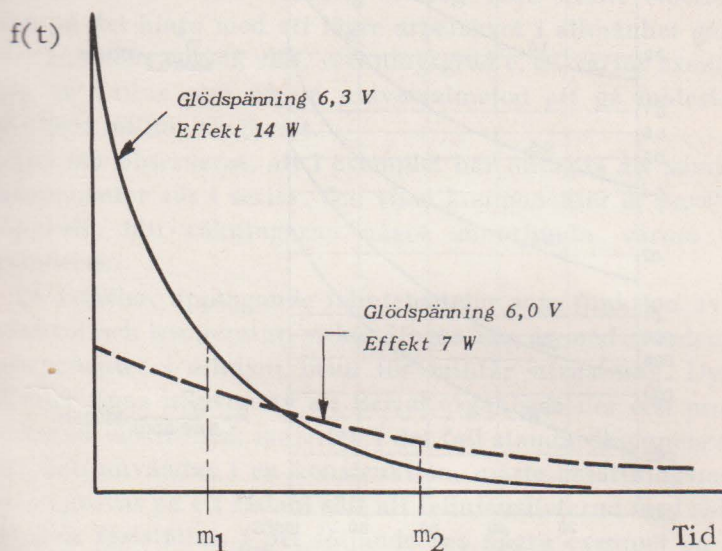


Fig. 12. Medeltiden mellan fel ökar väsentligt med minskad belastning på komponenten.

liga initialvärde på det antal fel, som måste inträffa under komponenternas nyttiga tid. Detta kan åskådliggöras med fig. 12. Rörret 6V6G/GT är avsett för 6,3 V glödspänning och 14 W effektförlust i galler och anod. Om rörret arbetar med dessa data i en krets, får den heldragna kurvan representera felfrekvensfunktionen för detta fall.

Om det emellertid ur konstruktionsteknisk synpunkt är möjligt att låta rörret arbeta med 6,0 V glödspänning och 7 W effektförlust, kan den streckade kurvan representera felfrekvensen. Medellivslängden i det lägre belastningsalternativet är nästan dubbelt så lång som för det högre. Den minskade arbetskvoten har således medfört, att ordinatans initialvärde har reducerats och medellivslängden ökat. Detta kan sägas vara en av grunderna för funktionssäkerhetsvänliga konstruktionsprinciper för elektronisk materiel.

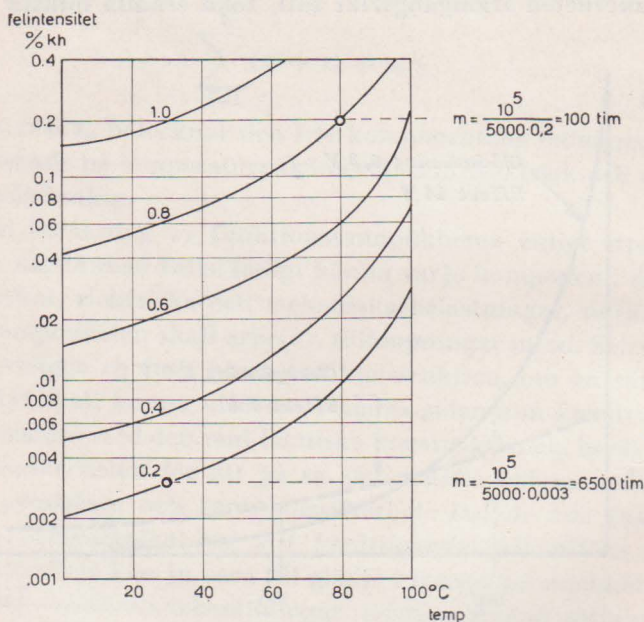


Fig. 13. Felintensitetens beroende av temperatur och arbetskvot. Arbetskvoten definieras som pålagd/nominell effekt, spänning etc.

I detta exempel räknades med lika temperaturer i båda belastningsfallen. Om man kan låta komponenterna arbeta i en relativt låg temperatur, inverkar detta förmånligt på felintensiteten. Fig. 13 visar typiska förhållanden mellan intensitet och temperatur. På ordinatan har felintensiteten avsatts, på abscissan temperaturen. Parameter är arbetskvoten, d. v. s.

$$\text{arbetskvot} = \frac{\text{pålagd}}{\text{nominell}} \text{ effekt, spänning etc.}$$

Figuren ger även följande exempel: Om i en enhet, som består av 5 000 komponenter, alla med lika basfelsintensitet och alla med samma beroende av arbetskvot och temperatur, samtliga komponenter belastas med arbetskvoten 0,8, blir medellivslängden 100 h om arbetstemperaturen är 80° C. Under förutsättning att arbetskvoten kan sättas till 0,2 och temperaturen till 30° C, kan man i detta fall kalkylera med en medellivslängd av 6 500 h, en icke föraktlig ökning. Man måste emellertid vara på det klara med att lägre arbetskvot i allmänhet går ut över enhetens volym, vikt, verkningsgrad e. d., varför exemplet inte får fattas som någon universalmetod att ge materielen maximal militär slagkraft.

Det bör observeras, att i exemplet har antagits att samtliga komponenter »är i serie». Om vissa komponenter är parallellkopplade, blir räkningarna något annorlunda, varom mer framdeles.

De tabeller, upptagande felintensiteter som funktion av arbetskvot och temperatur, vilka bifogas här, är medelvärden för komponenter i allmänt bruk för militär utrustning. Dylika tabeller finns utgivna av ett flertal organisationer och producenter av elektronisk materiel. I det fall standardkomponenter inte kan användas i en konstruktion, måste ersättningsmaterielen provas på ett sådant sätt att felintensiteterna med säkerhet kan fastställas. I det följande ges några exempel på hur felintensiteten beräknas för olika elektriska belastningar och temperaturpåkänningar.

Den praktiska arbetsgången vid beräkning av felintensiteten hos en elektronisk enhet är följande:

1. De i enheten ingående komponenterna delas upp i huvudgrupper, elektronrör, transistorer, motstånd, kondensatorer etc.
2. Huvudgrupperna delas vid behov upp i undergrupper, för elektronrör i dioder, trioder, pentoder etc., för motstånd i kolmotstånd, trådmotstånd o. s. v.
3. Basfelintensiteten fastställs för varje komponent.
4. Elektriska påkänningar fastställs.
5. Arbetstemperaturen för komponenterna beräknas och fastställs.
6. Basfelintensiteten justeras för varje komponent (eller grupp av komponenter) med hänsyn till påkänningarna.
7. Komponenternas placering i konstruktionen fastställs (serie- eller parallellkoppling).
8. Felintensiteterna adderas (gäller seriekoppling, vid parallellkoppling måste den parallella *kretsens* felintensitet först beräknas).

Beräkningarna bör utföras på en för ändamålet lämplig blankett. Fig. 14 visar den av flygförvaltningen använda driftanalysblanketten med några exempel.

I stationens PS-xxx mottagare ingår en prestandamätare. Elektronröret (V) med nummer 01 på schemaritningen har flygförvaltningens förrådsbeteckning M 2462-475. Röret finns upptaget i FTT-listan, »Försvarets Typprovade Telekomponenter», utgiven av FTL, Försvarets Teletekniska Laboratorium. Basfelintensiteten för detta rör är 0,5 % per kh. Arbetstemperaturen är 35° C och den elektriska arbetskvoten är 0,5. Enligt beräkningar, som senare skall redogöras för, blir felintensiteten under dessa förhållanden 0,22 % per kh.

I prestandamätaren ingår även 8 motstånd (R) med förrådsbeteckningen FF-MO 6768. På schemaritningen har de numren 03—10. De arbetar alla i en temperatur av 35° C med arbets-

DRIFTANALYS

Station *PS-XXX* Enhet *Antennare* Drifttid

Opererat av *J.A.H.*
 Datum *1970-08-28*

underenhet		komponent					påkänning			total funktionssäkerhet		uppsätt till värdet		
namn	sida i K-kat	typ	schemanummer	rimningabeteckning	FTL	funktionssäkerhet %/kb	antal komponenter	temp °C	elektr	total felfrekvens	total funktionssäkerhet %/kb	total funktionssäkerhet	total funktionssäkerhet	total funktionssäkerhet
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>Protektionsmätare</i>		V	01	M 8162-42-	X	0,5	1	35	0,5		0,33			
		V	02	M 8163-01	X	2,0	1	35	0,5		1,04			
		R	03-10	FF-110-6768	X	0,1	8	35	0,5	0,05	0,76			
		R	11-14	FF-110-2803	X	0,05	4	60	0,2	0,03	0,12			
		C	15	FF-C0-224	X	0,5	1	35	0,5		0,11			
		T	82	EGC-36821		0,18	1	85	0,8		0,28			
									<i>Summa</i>		<i>16,57</i>			

Fig. 14. Exempel på blankett för beräkning av funktionssäkerhet. De tre högra kolumnerna används för uppföljning av beräkningarna.

kvoten 0,5, varför den beräknade felintensiteten, 0,05 % per kh, här kan multipliceras med 8, varvid produkten blir 0,40 % per kh. Motstånden med schemanummer 11—14 däremot arbetar med temperaturen 60° C och arbetskvoten 0,2. På grund härav är det nödvändigt att i kalkylationen skilja dessa komponenter åt.

Sedan samtliga komponenter behandlats på liknande sätt, summeras kolumnen »total felintensitet», vilket således är underenhetens — prestandamätarens — felintensitet. Addition av felintensiteterna för resp. underenheter, vilka ingår i mottagaren, ger mottagarens felintensitet o. s. v. Om emellertid någon underenhet är dubblerad, måste hänsyn tas härtill vid den slutliga beräkningen (se under Funktionssäkerhet och redundans).

Exempel på beräkning av felintensiteter på komponenter med hänsyn till belastningen

Elektronrör

Felintensiteten för elektronrör beror på den temperatur, i vilken röret arbetar, på glödspänningens arbetskvot och effekt-förlustens arbetskvot. Härtill kommer övriga miljöfaktorer såsom vibration, stöt etc. men den inverkan, dessa faktorer har på felintensiteten, utelämnas här. Den skall senare bli föremål för en speciell framställning.

Fel uppstår på elektronrör genom att förändringar uppträder gradvis med tiden i rörets konstruktionselement, i vakuum eller gassammansättning. Genom felaktigheter hos utgångsmaterialet i tillverkningen uppträder under rörets livstid plötsliga fel som beror på den belastning som pålagts röret och den miljö i vilken det arbetar. Det är dessa fel som följande beräkning gäller.

De flesta elektronrör (med undantag av långlivsrör) arbetar med hög katodtemperatur — omkring 1 000° C — och ofta med

stora förlusteffekter som måste bortföras. Huvuddelen av förlusterna passerar genom kolven som härigenom upphetas så, att temperaturen inte sällan ligger över 150° C.

Om man kan få röret att arbeta med låg temperatur, ökas funktionssäkerheten. Man söker därför att avleda värmen genom att placera olika slag av skärmar på rören. Temperaturvärdena i tabell 8 hänför sig till rör utan särskilda kylningsanordningar. Då skärm av någon typ används skall den aktuella omgivningens temperatur korrigeras enligt ekvationen

$$T_{\text{kor}} = k (T_{\text{omgivning}} - 25) + 25$$

där k är skärmens kylningskonstant. Värdet på k framgår av tabell 5 där k beräknats vid 25° C.

Tabell 5. Kylningskonstant k för olika slag av rörskärmar. Värdet för k vid 25° C.

Skärmtyp	k	Anteckningar
Blank rör utan skärm.....	1,0	
Blank Jan-skärm.....	1,6	
Svart Jan-skärm.....	1,4	
Svart Jan-skärm med ventilationshåll.....	1,2	
IERC typ TR.....	0,85	
» » NW.....	0,70	
» » T 5 och T 6.....	0,65	Militär typ B
» » TP.....	0,30	
» » T 3.....	0,30	

Följande exempel klargör arbetsgången:

Ett rör har försetts med en skärm IERC typ B. Temperaturen omkring röret har uppmätts till 80° C. Tabellen anger värdet för k till 0,65 för denna skärmtyp. Insätts dessa värden i ekvationen erhålles

$$T_{\text{kor}} = 0,65 (80 - 25) + 25$$

$$T_{\text{kor}} = 61$$

Vid beräkning av korrektionsfaktor för ifrågavarande rör enligt tabell 8 skall värdet för den omgivande lufttemperaturen vara 61° C.

Som jämförelse kan nämnas att om man i detta exempel räknar med en blank Janskärm får man en temperatur av 113° C. Det är med andra ord ur funktionssäkerhetssynpunkt mycket viktigt vilken typ av skärm som används. Vissa typer av skärmar är med andra ord direkt olämpliga.

Vid beräkning av felintensiteter för elektronrör kan följande arbetsgång vara lämplig:

1. Bestäm rörets klass i enlighet med tabell 6 och avläs basfelintensiteten.
2. Bestäm medeltalet av den glödspänning, som avses läggas på röret, och beräkna arbetskvoten genom att dividera med den nominella. Avläs korrektionsfaktorn i tabell 7. Multiplicera den med basfelintensiteten.
3. Bestäm den beräknade maximala effektförlusten på röret, d. v. s. summan av anodens, gallrens och katodens effekt. Bestäm den nominella effektförlusten enligt samma metod ur katalogen för det aktuella röret. Beräkna arbetskvoten.
4. Bestäm den omgivande temperatur, i vilken röret avses arbeta. Om röret icke förses med värmeavledande skärm eller andra kyldon är den i tabell 8 angivna »omgivande lufttemperaturen» lika med den temperatur, som är rådande intill komponenten i dess placering i en enhet. Om däremot röret förses med värmeavledande anordningar, skall »omgivande lufttemperaturen» beräknas enligt det tidigare nämnda exemplet.
5. Avläs korrektionsfaktorn i tabell 8. Multiplicera den med basfelintensiteten.

Tabell 4. Basfelintensiteter för elektronrör.

Rörtyp	Basfelintensitet % per kh	Anteckningar
Elektronrör, mottagartyp		
Diod, enkel, signaldetektor	0,5	
» » likriktare	1,0	
» dubbel, signaldetektor	0,5	varje halva
» » likriktare	1,0	varje halva
Triod, enkel	2,0	
» dubbel	1,5	varje halva
Tetrod eller pentod	2,0	
Mikrovågrör		
Klystron	4,0	(lågeffektrör)
Magnetron	40,0	
Switch	10,0	
Oscilloskop	1,50 + 1,50 gångar antalet strålar	
Bildrör	2,0	
Tyratroner	5,0	

6. Addera basfelintensiteten enligt pkt 1 med de så erhållna korrektionsvärdena enligt pkt 2 och 5 som tillsammans ger den slutliga felintensiteten.

Följande exempel visar arbetsgången. Rörret 6V6G/GT är enligt specifikationen avsett för 6,3 V glödspänning. Anodförlusten är 12 W, gallerförlusten 2,0 W och glödeffekten 1,2 W. Rörret avses drivas utan skärm med 6,5 V glödspänning, med effektförlusterna 6 W på anod och 1 W på galler. Den omgivande lufttemperaturen beräknas till 70° C. Basfelintensiteten för ifrågavarande rör är 2,0 % per kh (pkt 1).

Glödspänningen är således 103 % av den nominella. Enligt tabell 7 är korrektionen för denna arbetskvot + 0,25 varför basfelintensiteten skall ökas med $0,25 \cdot 2,0 = 0,50$ % per kh (pkt 2).

De verkliga effektförlusterna på katod, anod och galler adderas, likaså de nominella, varefter arbetskvoten beräknas; den blir i detta fall 0,5 (pkt 3). Enligt tabell 8 är korrektionsfaktorn för arbetskvoten 0,5 och temperaturen 70° C lika med — 0,13. Basfelintensiteten skall således minskas med $0,13 \cdot 2,0 = 0,26$ % per kh (pkt 5).

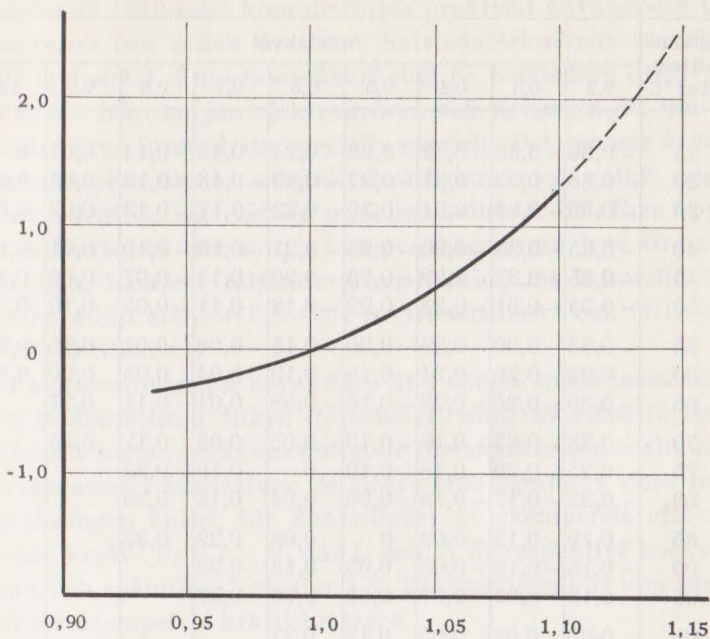
	Nominell	Pålagd	Arbetskvot	Korrektionsfaktor	Felintensitet % per kh
Basfelintensitet					2,00
Glödspänning	6,3	6,5	1,03	+0,25	+0,50
Effektförlust					
Glöd	1,2	1,2			
Galler	2,0	1,0			
Anod	12,0	6,0	0,5	— 0,13	— 0,26
				Felintensitet	2,24

Av exemplet och av fig. 15 framgår att glödspänningen har stor inverkan på felintensiteten — intensiteten stiger hastigt med stigande glödspänning. Av fig. 15 framgår även att en lägre spänning än den nominella inverkar fördelaktigt på felintensiteten.

Tyratroner kan inte beräknas med den här relaterade metoden; för dem bör endast glödspänningens arbetskvot få inverka på basfelintensiteten. Detta gäller även klystroner, magnetroner och katodstrålerör. Spänningsregulatorer och gasfyllda rör med kall katod samt mikrovågsrör för switchändamål påverkas mycket litet av temperatur och elektrisk belastning, varför basfelintensiteten gäller för dessa rör.

Genom att gradvisa fel uppträder på elektronrör efter en relativt lång drifttid bör rören bytas med jämna tidsmellanrum. Som en mycket generell regel kan anges, att vanliga mottagarrör bör bytas efter en drifttid av 6 000—10 000 h, tyratroner efter 1 500 h och magnetroner efter 500 h.

Korrektions-
värde



Arbetskvot

Fig. 15. Elektronrör. Korrektionsvärden för glödspänningens felintensitet vid olika arbetskvoter.

Tabell 7. Elektronrör. Korrektionsvärden för glödspänningens felintensitet vid olika arbetskvoter.

Arbetskvot	Korrektionsvärde	Arbetskvot	Korrektionsvärde
0,95	— 0,30	1,06	0,60
0,96	— 0,24	1,07	0,75
0,97	— 0,18	1,08	0,90
0,98	— 0,12	1,09	1,10
0,99	— 0,06	1,10	1,30
1,00	0	1,11	1,50
1,01	0,08	1,12	1,75
1,02	0,16	1,13	2,00
1,03	0,25	1,14	2,30
1,04	0,36	1,15	2,60
1,05	0,47		

Tabell 8. Elektronrör. Korrektionsfaktorer för effektförlusten vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskvot								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	-0,36	-0,35	-0,32	-0,28	-0,24	-0,19	-0,14	-0,07	0
30	-0,36	-0,35	-0,31	-0,27	-0,23	-0,18	-0,13	-0,05	0,04
35	-0,36	-0,34	-0,31	-0,26	-0,22	-0,17	-0,12	-0,02	0,08
40	-0,35	-0,33	-0,30	-0,25	-0,21	-0,15	-0,10	-0,01	0,12
45	-0,35	-0,32	-0,29	-0,23	-0,20	-0,13	-0,07	0,06	0,17
50	-0,34	-0,31	-0,28	-0,22	-0,18	-0,11	-0,03	0,10	0,23
55	-0,33	-0,30	-0,26	-0,20	-0,15	-0,08	0,01	0,16	0,30
60	-0,32	-0,29	-0,24	-0,18	-0,12	-0,04	0,05	0,20	0,37
65	-0,30	-0,26	-0,22	-0,16	-0,09	0,01	0,11	0,27	
70	-0,28	-0,23	-0,19	-0,13	-0,05	0,06	0,17	0,35	
75	-0,25	-0,20	-0,16	-0,10	0	0,10	0,23		
80	-0,22	-0,17	-0,13	-0,06	0,04	0,15	0,29		
85	-0,19	-0,13	-0,09	0	0,08	0,22	0,38		
90	-0,16	-0,10	-0,03	0,05	0,13	0,30			
95	-0,12	-0,06	0,01	0,09	0,20	0,37			
100	-0,09	-0,02	0,05	0,13	0,27				
105	-0,05	0,02	0,09	0,20	0,35				
110	-0,01	0,06	0,14	0,28					
115	0,03	0,10	0,20	0,35					
120	0,07	0,15	0,27						
125	0,11	0,22	0,35						

Halvledare

I slutet av 1940-talet kom de första praktiskt användbara transistorerna och sedan dess har halvledarteknikens utveckling gått lavinartat. Funktionssäkerheten på halvledare överträffade redan från början elektronrören och utvecklingen har gått hastigt även inom detta speciella område. Det senaste året har amerikanska firmor utbjudit halvledare med enligt uppgift utomordentligt låga värden på felintensiteten. Då säkra uppgifter beträffande dessa nya komponenter ännu inte finns tillgängliga, kommer följande framställning att behandla halvledare enligt MIL—STD—701 A (transistorer) och MIL—STD—200 E (dioder).

Felintensiteten på halvledare är i första hand beroende på den temperatur, i vilken de arbetar, samt av effektförlusten. Effektförlusten beräknas enligt de föreskrifter som i allmänhet förekommer i åtminstone de större katalogerna. I vissa fall är beräkningen enkel, för Zenerdioder är exempelvis effektförlusten i mW: $P_f = I_b \cdot V_b$ där I_b och V_b är respektive backström i mA och spänningsförlusten i V. Beräkningen blir mer invecklad för exempelvis kraftlikriktare.

Den praktiska gången vid en förenklad beräkning av felintensiteten är följande:

1. Bestäm komponentens typ, kisel eller germanium.
2. Bestäm den omgivande lufttemperaturen.
3. Bestäm effektförlusten.
4. Avläs den nominella effektförlusten vid 25° C.
5. Beräkna arbetskvoten för effektförlusten.
6. Avläs felintensiteten med hänsyn till temperatur och arbetskvot på tabell 9 för kiseldioder och tabell 10 för germaniumdioder. För transistorer avläs tabellerna 11 och 12.

Den beskrivna metoden är mycket enkel och måste kompletteras, om den enhet som skall beräknas innehåller ett relativt stort antal halvledare i förhållande till övriga komponenter. Man bör då även skilja mellan olika typer efter tillverknings-

Tabell 9. Dioder, kisel. Felintensitet vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskvot									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
5	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
10	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
15	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
20	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
25	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
30	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,061	0,065	0,071	0,075
35	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,061	0,066	0,073	
40	0,020	0,030	0,040	0,046	0,050	0,062	0,067	0,067	0,075	
45	0,020	0,030	0,040	0,046	0,050	0,056	0,062	0,069		
50	0,020	0,031	0,040	0,046	0,050	0,056	0,063	0,071		
55	0,020	0,031	0,040	0,047	0,051	0,057	0,065	0,075		
60	0,020	0,032	0,041	0,047	0,052	0,060	0,067			
65	0,020	0,032	0,041	0,048	0,053	0,061	0,070			
70	0,021	0,033	0,042	0,049	0,055	0,063	0,075			
75	0,021	0,033	0,043	0,050	0,056	0,066				
80	0,021	0,034	0,044	0,052	0,058	0,070				
85	0,022	0,035	0,045	0,054	0,061	0,075				
90	0,022	0,036	0,046	0,056	0,065					
95	0,023	0,038	0,047	0,058	0,069					
100	0,024	0,039	0,049	0,061	0,075					
105	0,025	0,040	0,051	0,065						
110	0,026	0,043	0,054	0,069						
115	0,028	0,045	0,058	0,075						
120	0,030	0,048	0,062							
125	0,033	0,053	0,068							
130	0,037	0,058	0,075							
135	0,041	0,066								
140	0,049	0,075								
145	0,059									
150	0,075									

Tabell 10. Dioder, germanium. Felintensitet vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

*Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskvot									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
5	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
10	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
15	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
20	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
25	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075
30	0,020	0,030	0,040	0,045	0,050	0,056	0,062	0,068	0,074	
35	0,020	0,030	0,040	0,046	0,052	0,059	0,066	0,072		
40	0,020	0,031	0,041	0,048	0,054	0,062	0,070			
45	0,021	0,032	0,043	0,050	0,058	0,068				
50	0,022	0,034	0,046	0,054	0,064					
55	0,023	0,036	0,050	0,061	0,075					
60	0,025	0,040	0,056	0,072						
65	0,029	0,048	0,068							
70	0,036	0,062								

Tabell 11. Transistorer, kisel. Felintensitet vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskvot									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,086	0,090	0,095	0,100
5	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,086	0,090	0,095	0,100
10	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,086	0,090	0,095	0,100
15	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,086	0,090	0,095	0,100
20	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,086	0,090	0,095	0,100
25	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,086	0,090	0,095	0,100
30	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,086	0,090	0,095	
35	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,086	0,090	0,097	
40	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,086	0,090	0,100	
45	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,081	0,087	0,092		
50	0,031	0,040	0,050	0,060	0,070	0,082	0,088	0,096		
55	0,031	0,040	0,050	0,061	0,071	0,083	0,090	0,100		
60	0,031	0,041	0,051	0,062	0,072	0,084	0,092			
65	0,032	0,041	0,052	0,063	0,073	0,086	0,096			
70	0,032	0,042	0,053	0,064	0,076	0,088	0,100			
75	0,033	0,043	0,054	0,066	0,077	0,091				
80	0,034	0,044	0,056	0,068	0,080	0,095				
85	0,035	0,046	0,058	0,071	0,084	0,100				
90	0,036	0,047	0,060	0,074	0,088					
95	0,038	0,049	0,064	0,078	0,093					
100	0,040	0,052	0,067	0,084	0,100					
105	0,042	0,056	0,073	0,090						
110	0,045	0,060	0,079	0,100						
115	0,048	0,066	0,089							
120	0,053	0,075	0,100							
125	0,060	0,086								
130	0,069	0,100								
140	0,100									

Tabell 12. Transistorer, germanium. Felintensitet vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskquot									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
5	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
10	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
15	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
20	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
25	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
30	0,030	0,040	0,050	0,062	0,070	0,082	0,086	0,092	0,099	
35	0,030	0,040	0,050	0,063	0,072	0,084	0,089	0,097		
40	0,030	0,041	0,052	0,065	0,076	0,088	0,095			
45	0,031	0,043	0,054	0,069	0,081	0,094				
50	0,032	0,046	0,058	0,074	0,088					
55	0,034	0,049	0,062	0,082	0,100					
60	0,038	0,054	0,074	0,096						
65	0,044	0,065	0,090							
70	0,052	0,083								

sättet, exempelvis punkt- och skikttransistorer då det ofta i praktiken visar sig att felen uppkommer på grund av helt olika felmekanismer, varför det kan vara vanskligt att sammanföra olika transistor typer till samma klass vid dylika beräkningar.

Motstånd

Felintensiteten hos motstånd beror på en mängd förhållanden såsom den temperatur i vilken de arbetar, den elektriska påkänning som påläggs dem, vibration, stöt, fuktighet m. m. Då man genom den mekaniska konstruktionen kan påverka storleken av de vibrationer och stötar som motstånden utsätts för, framställs här felintensiteten som en funktion av den elektriska påkänningen och temperaturen.

Tabell 13. Korrektionsvärden för felintensiteten vid en omgivande lufttemperatur av 80°—120° C. Gäller massamotstånd enligt MIL—R—11C och MIL—R—94B.

Motståndsvärden	Omgivande lufttemp. °C	Arbetskvot								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1,2 Kohm till 4,7 Kohm	120	0,9	0,9							
56 Kohm till 100 Kohm	80	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3
100 Kohm	100	1,0	1,0	1,1	1,4	1,4				
120 Kohm till 470 Kohm	120	1,4	1,5							
120 Kohm till 470 Kohm	80	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3
470 Kohm	100	1,0	1,0	1,4	1,8	1,8				
470 Kohm	120	1,8	1,8							
560 Kohm till 1 Megohm	100	1,0	1,1	1,8	1,9	2,0				
1 Megohm	120	2,1	2,1							
Över 1 Megohm	100	1,5	2,0	2,5						
1 Megohm	120	3,0	4,0							

Man kan i stort indela motstånden i tre klasser, massamotstånd, skiktmotstånd och trådmotstånd. För beräkning av felintensiteten bestäms den pålagda effekten och den nominella effekten avläses ur tillgängliga data varefter arbetsknoten beräknas. Den temperatur, i vilken motståndet arbetar bestäms. Felintensiteten kan därefter avläsas ur tabeller för olika arbetsknoter och temperaturer på den omgivande luften. Här medtagna tabeller för skiktmotstånd hänför sig till motstånd enligt MIL—R—10509C.

Storleken av den effektförlust, som uppkommer i själva motståndet, är beroende på i vilken omfattning den kan ledas bort. Den är således beroende av omgivningens temperatur. Om motstånden placeras intill värmeavgivande komponenter eller förbinds med andra motstånd, får man givetvis räkna med en högre temperatur än eljest. Likaså höjes temperaturen om längden på anslutningarna gjorts mycket korta.

För motstånd enligt de amerikanska normerna MIL—R—11C och MIL—R—94B skall felintensiteten multipliceras med korrektionsvärden enligt tabell 13 då den omgivande lufttemperaturen beräknas ligga mellan 80° och 120° C och motståndens värden ligger mellan 1,2—4,7 Kohm, 56—100 Kohm, 120—470 Kohm, 560 Kohm—1 Megohm samt över 1 Megohm.

För skiktmotstånd måste felintensiteten enligt tabell 15 korrigeras med under tabellen angivna värden f_1 och f_2 , där f_1 kompenserar de olika temperaturstegringarna som uppstår när man använder motstånd av olika nominelleffekt med samma procentuella utnyttjning. Den andra faktorn, f_2 , används som korrektionsvärde för den ökning av felintensiteten som uppstår, då man minskar skiktets tjocklek i motståndet för att erhålla högre motståndsvärde.

Den praktiska arbetsgången vid beräkning av felintensiteten är följande:

1. Bestäm motståndets typ.
2. Bestäm den omgivande lufttemperaturen.
3. Beräkna motståndets pålagda effekt och avläs den nomi-

Tabell 14. Massamotstånd. Felintensitet vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskvot									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0,014	0,015	0,015	0,016	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020	0,022
5	0,014	0,015	0,015	0,016	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020	0,022
10	0,014	0,015	0,016	0,017	0,017	0,018	0,019	0,020	0,021	0,023
15	0,014	0,015	0,016	0,017	0,017	0,018	0,019	0,021	0,022	0,024
20	0,015	0,016	0,017	0,017	0,018	0,019	0,020	0,022	0,023	0,025
25	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020	0,021	0,023	0,024	0,026
30	0,016	0,017	0,017	0,018	0,020	0,022	0,023	0,024	0,025	0,027
35	0,016	0,017	0,018	0,019	0,021	0,023	0,024	0,025	0,026	0,028
40	0,017	0,018	0,019	0,021	0,022	0,024	0,025	0,026	0,028	0,030
45	0,017	0,018	0,020	0,022	0,023	0,025	0,026	0,027	0,029	0,032
50	0,018	0,019	0,021	0,023	0,024	0,026	0,027	0,029	0,032	0,035
55	0,019	0,021	0,022	0,024	0,025	0,027	0,029	0,031	0,034	0,037
60	0,020	0,022	0,023	0,025	0,027	0,029	0,031	0,033	0,036	0,039
65	0,021	0,023	0,025	0,027	0,029	0,031	0,033	0,036	0,039	0,042
70	0,023	0,024	0,026	0,028	0,030	0,033	0,035	0,037	0,041	0,045
75	0,024	0,026	0,027	0,029	0,032	0,035	0,037	0,040	0,044	
80	0,025	0,027	0,029	0,032	0,034	0,037	0,040	0,043	0,047	
85	0,026	0,028	0,031	0,034	0,036	0,039	0,042	0,045		
90	0,028	0,031	0,033	0,036	0,038	0,041	0,044			
95	0,031	0,033	0,035	0,037	0,040	0,044				
100	0,033	0,035	0,037	0,040	0,042					
105	0,035	0,037	0,040	0,043						
110	0,037	0,039	0,042	0,045						
115	0,040	0,043	0,044							

Tabell 15. Skiktmotstånd. Felintensitet vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskvot									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0,024	0,026	0,028	0,031	0,034	0,038	0,042	0,046	0,051	0,057
5	0,024	0,027	0,029	0,032	0,036	0,040	0,044	0,049	0,054	0,060
10	0,026	0,028	0,030	0,033	0,037	0,042	0,047	0,052	0,058	0,064
15	0,026	0,029	0,032	0,035	0,039	0,044	0,049	0,055	0,061	0,068
20	0,026	0,030	0,033	0,037	0,041	0,046	0,052	0,058	0,065	0,073
25	0,027	0,032	0,035	0,039	0,044	0,049	0,055	0,062	0,070	0,078
30	0,029	0,033	0,037	0,041	0,046	0,052	0,059	0,066	0,075	0,084
35	0,030	0,035	0,039	0,043	0,049	0,056	0,063	0,071	0,081	0,090
40	0,032	0,037	0,041	0,046	0,052	0,059	0,067	0,076	0,087	0,097
45	0,033	0,039	0,043	0,048	0,055	0,063	0,073	0,082	0,091	0,100
50	0,036	0,041	0,046	0,052	0,060	0,068	0,078	0,088	0,100	0,113
55	0,038	0,044	0,049	0,055	0,064	0,073	0,084	0,095	0,108	0,121
60	0,041	0,047	0,053	0,059	0,069	0,079	0,090	0,100	0,115	0,131
65	0,045	0,050	0,056	0,063	0,074	0,085	0,098	0,111	0,127	0,142
70	0,048	0,053	0,060	0,068	0,080	0,092	0,106	0,120	0,137	0,155
75	0,053	0,058	0,065	0,073	0,086	0,099	0,114	0,130	0,148	
80	0,056	0,061	0,069	0,078	0,093	0,107	0,124	0,142		
85	0,060	0,065	0,075	0,085	0,100	0,116	0,134	0,153		
90	0,065	0,070	0,081	0,091	0,108	0,125	0,145			

Motståndets effekt 1 watt	f_1
1/8	0,8
1/4	0,9
1/2	1,0
1	1,2
2	1,5

Motståndsvärde	f_2
Intill 100 Kohm . . .	1,0
100 Kohm-1 Megohm	1,2
1 Megohm-10 Megohm	1,5
10 Megohm-30 Megohm	2,0

Tabell 16. Tråd motstånd. Felintensitet vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskvot									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0,115	0,117	0,119	0,121	0,123	0,125	0,128	0,130	0,134	0,137
5	0,117	0,119	0,122	0,124	0,126	0,127	0,130	0,132	0,136	0,139
10	0,119	0,121	0,123	0,125	0,127	0,129	0,132	0,135	0,139	0,142
15	0,123	0,124	0,126	0,127	0,130	0,133	0,136	0,138	0,142	0,145
20	0,125	0,126	0,128	0,130	0,133	0,135	0,139	0,142	0,146	0,149
25	0,126	0,127	0,131	0,134	0,137	0,140	0,143	0,146	0,150	0,154
30	0,130	0,133	0,135	0,138	0,141	0,144	0,147	0,150	0,155	0,159
35	0,135	0,137	0,140	0,143	0,146	0,148	0,153	0,157	0,161	0,165
40	0,140	0,142	0,145	0,148	0,152	0,155	0,160	0,164	0,168	0,172
45	0,146	0,148	0,152	0,155	0,159	0,162	0,167	0,172	0,176	0,180
50	0,153	0,156	0,160	0,163	0,167	0,171	0,176	0,181	0,186	0,191
55	0,161	0,164	0,167	0,170	0,175	0,180	0,186	0,192	0,198	0,203
60	0,170	0,174	0,178	0,181	0,187	0,192	0,197	0,202	0,209	0,216
65	0,179	0,185	0,189	0,193	0,199	0,205	0,212	0,218	0,225	0,232
70	0,191	0,200	0,204	0,207	0,214	0,220	0,228	0,235	0,243	0,251
75	0,207	0,213	0,218	0,223	0,230	0,236	0,246	0,255	0,265	0,275
80	0,223	0,230	0,236	0,241	0,250	0,259	0,268	0,277	0,289	0,300
85	0,242	0,250	0,258	0,265	0,274	0,282	0,294	0,305	0,319	0,333
90	0,265	0,275	0,283	0,290	0,300	0,310	0,320	0,330		
95	0,288	0,300	0,310	0,320	0,332	0,343				
100	0,318	0,331								

nella. Beräkna arbetskvoten. För variabla motstånd beräknas arbetskvoten genom uttrycket

$$\frac{I^2}{I_r^2}$$

där I är den högsta strömstyrkan i motståndet och I_r är den strömstyrka, som motsvarar den nominella effekten och det totala motståndet.

5. Avläs felintensiteten på den tabell, som svarar mot motståndets typ.

Följande exempel visar arbetsgången:

EXEMPEL 1

En 1 W massamotstånd har värdet 8,0 Kohm. Den elektriska påkänningen är 75 V likspänning. Det beräknas att den omgivande lufttemperaturen kommer att vara 75° C.

$$\text{Pålagd effekt} = \frac{E^2}{R} = \frac{5625}{8000} = 0,7 \text{ watt}$$

$$\text{Arbetskvot} = \frac{0,7}{1,0} = 0,7$$

Tabell 14 ger värdet på felintensiteten = 0,037 % per kh

Om den elektriska påkänningen i detta exempel i stället för 75 V likspänning skulle vara 140 V toppspänning, 400 perioder växelspänning skall E beräknas enligt:

$$E = \text{toppspänning} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{140}{\sqrt{2}} = 99 \text{ Volt}$$

EXEMPEL 2

Skiktmotstånd $\frac{1}{4}$ W, 100 Kohm. Den elektriska påkänningen är 100 V likspänning. Omgivande lufttemperaturen är 80° C. Den pålagda effekten är $10\,000/100\,000 = 0,1$ watt och arbetskvoten således $0,1/0,25 = 0,4$.

I tabell 15 avläses felintensiteten till 0,078 % per kh. Intensiteten skall nu multipliceras med $f_1 = 0,9$ (för $\frac{1}{4}$ W) och $f_2 = 1,2$ (för 100 Kohm). Det slutliga värdet blir således 0,084 % per kh.

Kondensatorer

Fel på kondensatorer uppstår vanligtvis på grund av kortslutning genom att det dielektriska materialet av skilda anledningar går sönder. I allmänhet åldras det dielektriska materia-

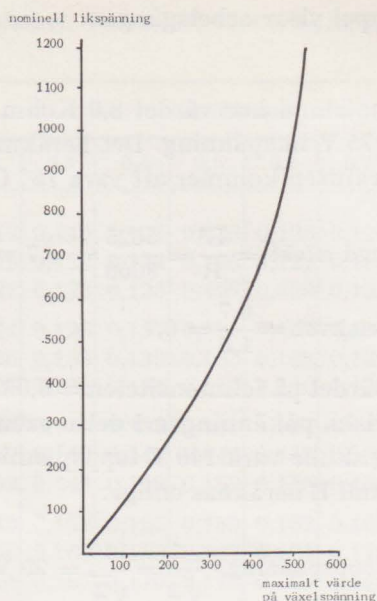


Fig. 16. Maximalt värde på den växelspänning som får belasta papperskondensatorer, avsedda för likspänning.

let snabbare med stigande temperatur, varför det gäller att hålla temperaturen låg vid funktionssäkra konstruktioner. Andra faktorer som inverkar på felintensiteten är elektrisk påkänning, stöt, vibration m. m.

I det följande skall ges några exempel på beräkningsmetoderna för felintensiteten. Som exempel tas papperskondensatorer enligt MIL—C—26244, keramiska kondensatorer enligt MIL—C—20C och elektrolyter enligt MIL—C—62A.

Vid papperskondensatorer som används i kretsar med växelspanning är det nödvändigt att se till att förhållandet mellan angiven likspänning och växelspanning är rätt. Fig. 16 visar den gräns för växelspanningen, som ej bör överskridas när man använder papperskondensatorer avsedda för viss likspänning.

Om en papperskondensator belastas med både likspänning och växelspanning blir felintensiteten beroende dels av sum-

Kvadratiska medelvärdet för
växelspänningen i % av den
nominella likspänningen.

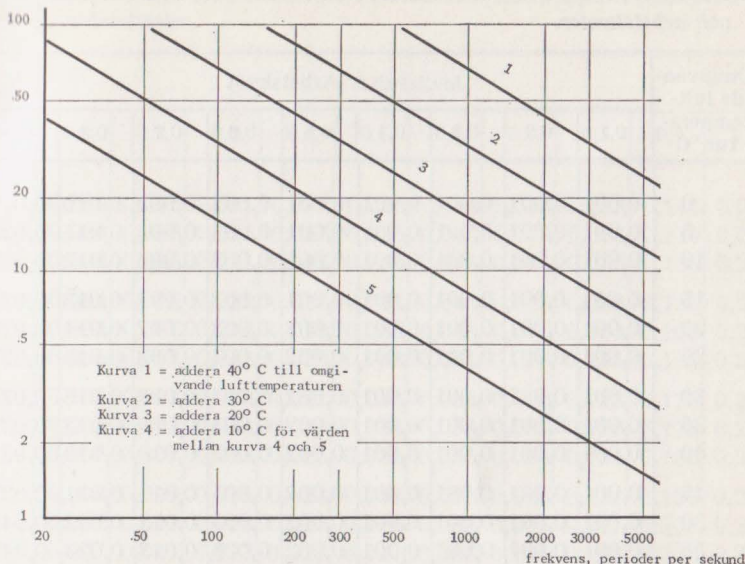


Fig. 17. Ett tillägg till den omgivande lufttemperaturen måste göras när papperskondensatorer används i växelströmskretsar (gäller papperskondensatorer enligt MIL—C—25C).

man av lik- och växelspänningen, dels av den »effektiva» omgivningstemperaturen, som beräknas enligt fig. 17.

Den praktiska arbetsgången för beräkning av felintensiteten är följande:

1. Bestäm kondensatorns typ: papper, keramisk etc.
2. Bestäm den omgivande lufttemperaturen.
3. Beräkna arbetskvoten med hänsyn till den pålagda och den nominella spänningen.
4. Avläs felintensiteten på tabellerna för papperskondensatorer, keramiska kondensatorer och elektrolyter.

EXEMPEL 1

Kondensator, keramisk. Nominell spänning: 600 V likspänning. Den pålagda spänningen beräknas till 35 V likspänning

Tabell 19. Elektrolytkondensatorer. Felintensitet vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskvot
	0,8—1,0
0	0,116
5	0,120
10	0,128
15	0,139
20	0,153
25	0,174
30	0,200
35	0,240
40	0,292
45	0,380
50	0,490
55	0,670
60	0,930
65	1,35
70	2,05
75	3,30
80	5,40
85	9,00

perioder växelspanning 50 V. Omgivande lufttemperatur beräknas till 70° C.

Den totala spänningen blir:

$$80 + 50\sqrt{2} = 151 \text{ V}$$

Arbetskvoten blir $151/250 = 0,6$

Växelspanningen — 400 periodig, 50 V — utgör 20 % av den nominella likspänningen — 250 V. Enligt fig. 17 skall 15° C adderas till den beräknade omgivningstemperaturen, varför denna blir 85° C.

Felintensiteten avläses nu ur tabell 17. För en arbetskvot av 0,6 och en temperatur av 85° C blir den 0,009 % per kh.

Tabell 18. Keramiska kondensatorer. Felintensitet vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskvot									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0,004	0,006	0,011	0,017	0,029	0,042	0,067	0,092	0,146	0,200
5	0,004	0,006	0,011	0,017	0,030	0,043	0,069	0,094	0,149	0,205
10	0,004	0,006	0,011	0,017	0,031	0,045	0,071	0,096	0,153	0,210
15	0,004	0,006	0,012	0,018	0,031	0,047	0,073	0,099	0,159	0,220
20	0,004	0,007	0,013	0,019	0,032	0,049	0,076	0,104	0,163	0,225
25	0,005	0,007	0,013	0,020	0,032	0,051	0,078	0,115	0,165	0,230
30	0,005	0,007	0,013	0,021	0,033	0,052	0,080	0,118	0,170	0,235
35	0,005	0,008	0,014	0,022	0,034	0,054	0,082	0,120	0,175	0,240
40	0,006	0,008	0,014	0,023	0,035	0,056	0,084	0,125	0,180	0,250
45	0,006	0,009	0,015	0,024	0,037	0,058	0,088	0,131	0,190	0,260
50	0,007	0,010	0,016	0,026	0,040	0,062	0,096	0,141	0,203	0,270
55	0,007	0,011	0,017	0,028	0,044	0,068	0,105	0,158	0,225	0,310
60	0,008	0,012	0,020	0,032	0,050	0,078	0,120	0,170	0,250	0,350
65	0,010	0,014	0,023	0,036	0,058	0,090	0,140	0,205	0,290	0,410
70	0,011	0,018	0,027	0,043	0,070	0,105	0,165	0,245	0,360	0,490
75	0,013	0,020	0,033	0,053	0,084	0,130	0,200	0,300	0,430	0,600
80	0,016	0,026	0,041	0,066	0,105	0,160	0,255	0,380	0,550	0,760
85	0,021	0,034	0,054	0,090	0,140	0,220	0,335	0,500	0,720	1,00

och 400 perioder växelspanning 60 V. Omgivande lufttemperatur beräknas till 70° C.

Den totala spänningen blir:

$$35 + 60\sqrt{2} = 120$$

Arbetskvoten blir ~~151/250 = 0,6~~ $120/600 = 0,2$

I tabell 18 avläses felintensiteten till 0,018 % per kh.

EXEMPEL 2

Papperskondensator. Nominell spänning 250 V likspänning. Den pålagda spänningen beräknas till 80 V likspänning och 400

Tabell 19. Elektrolytkondensatorer. Felintensitet vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskvot
	0,8—1,0
0	0,116
5	0,120
10	0,128
15	0,139
20	0,153
25	0,174
30	0,200
35	0,240
40	0,292
45	0,380
50	0,490
55	0,670
60	0,930
65	1,35
70	2,05
75	3,30
80	5,40
85	9,00

perioder växelspänning 50 V. Omgivande lufttemperatur beräknas till 70° C.

Den totala spänningen blir:

$$80 + 50\sqrt{2} = 151 \text{ V}$$

Arbetskvoten blir $151/250 = 0,6$

Växelspänningen — 400 periodig, 50 V — utgör 20 % av den nominella likspänningen — 250 V. Enligt fig. 17 skall 15° C adderas till den beräknade omgivningstemperaturen, varför denna blir 85° C.

Felintensiteten avläses nu ur tabell 17. För en arbetskvot av 0,6 och en temperatur av 85° C blir den 0,009 % per kh,

Tabell 20. Överslagsvärden på felintensiteter för vissa materielslag.

Materielslag	Felintensitet % per kh	Anteckningar
Transformatorer, spolar, drosslar.....	1,0	
Motorer, generatorer.....	4,0	5 000 varv/min
	10,0	10 000 »
Kontaktbon.....	0,03	1-polig
	0,10	10-polig
	0,19	20-polig
Reläer.....	1,0	
Tryckta kretsar.....	0,004	5 anslutningar
	0,020	25 »
	0,070	100 »
	0,35	500 »
Kvartskristaller.....	0,02	
Ferritelement.....	2,5	
Vibratorer.....	4,0	400 perioder
Glimlampor.....	0,02	

Övriga komponenter

Felintensiteten för övriga komponenter beräknas på i princip liknande sätt. Utrymmet i denna studie tillåter emellertid inte en fullständig genomgång av beräkningsmetoderna. Här skall endast anges några värden på basfelintensiteter, som kan användas vid överslagsberäkningar av funktionssäkerheten.

Beräkningsmetodernas säkerhet

Värdet av beräkningar över funktionssannolikheten för elektriska utrustningar är i hög grad beroende på de tillämpade beräkningsmetoderna och det statistiska underlaget. En överslagsberäkning enligt grupp- och faktormetoderna kan naturligtvis endast ge en grov uppskattning. Så har exempelvis fel-

Tabell 17. Papperskondensatorer. Felintensitet vid olika lufttemperaturer och arbetskvoter.

Omgivande lufttemperatur °C	Arbetskvote									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,005	0,010	0,018	0,033
5	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,006	0,011	0,020	0,036
10	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,006	0,012	0,021	0,036
15	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,007	0,013	0,023	0,041
20	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,007	0,014	0,025	0,044
25	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,004	0,008	0,015	0,027	0,048
30	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,004	0,009	0,016	0,029	0,052
35	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,004	0,009	0,018	0,031	0,055
40	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,005	0,010	0,019	0,034	0,060
45	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,005	0,011	0,021	0,037	0,064
50	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,005	0,012	0,022	0,040	0,068
55	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,006	0,013	0,024	0,043	0,074
60	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,006	0,014	0,026	0,046	0,079
65	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,007	0,015	0,028	0,050	0,086
70	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,007	0,016	0,030	0,054	0,092
75	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,008	0,017	0,032	0,057	0,098
80	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,008	0,018	0,035	0,062	0,106
85	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,009	0,020	0,037	0,067	0,114
90	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,010	0,022	0,040	0,072	
95	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,010	0,023	0,043	0,078	
100	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	0,011	0,025	0,046	0,084	
105	0,001	0,001	0,001	0,002	0,005	0,012	0,027	0,050	0,090	
110	0,001	0,001	0,001	0,002	0,005	0,013	0,029	0,054		
115	0,001	0,001	0,001	0,002	0,006	0,014	0,031	0,058		
120	0,001	0,001	0,001	0,002	0,006	0,015	0,033			
125	0,001	0,001	0,001	0,002	0,006	0,016	0,036			

4

Funktionssäkerhet och redundans

Vid konstruktion och samtidig kontrollberäkning av funktionssäkerheten hos en enhet kan det ibland vara svårt att fylla det projekterade kravet på säkerhet. Konstruktören har då möjligheter att använda funktionssäkrare komponenter eller sänka arbetskvot eller temperatur på komponenterna. Om icke detta är lämpligt eller tillfyllest, kan man dubblera komponenter, kretsar eller hela enheter, d. v. s. införa redundans i konstruktionen. Vid beräkning av funktionssäkerheten måste man ta hänsyn härtill, varför en kort översikt av beräkningsmetoderna ges här.

Ur statistisk synpunkt är funktionssäkerheten för ett system sannolikheten av att *systemet* fungerar under en fastställd tid. Om ett komponentfel medför att systemet slutar att fungera, är komponenten »i serie», om däremot systemet fungerar trots att ett komponentfel inträffar, är komponenten »parallell».

Funktionssannolikheten för ett antal komponenter i serie är, som redan framhållits på sid. 25

$$R(t) = e^{-zt}$$

där z betecknar summan av komponenternas felintensiteter.

Vid parallella komponenter kan dock felintensiteterna inte adderas utan vidare. Man måste skilja mellan *aktiv* och *passiv* redundans, d. v. s. om de parallella komponenterna (enheter-

na) arbetar kontinuerligt eller om den ena komponenten kopleas till först när den andra slutar att fungera.

Aktiv redundans

Om två parallella komponenter (enheter) arbetar samtidigt kallar man kopplingen för aktiv redundans.

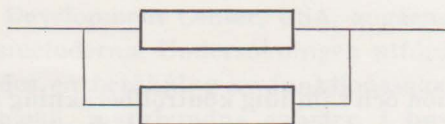


Fig. 18. Aktiv redundans med två komponenter (enheter).

Funktionssannolikheten är då enligt additionssatsen:

$$R = p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2 = e^{-z_1 t} + e^{-z_2 t} - e^{-t(z_1 + z_2)}$$

där z_1 och z_2 betecknar komponenterna p_1 och p_2 felintensiteter. Medellivslängden mellan fel är:

$$m = \int_0^{\infty} R dt = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} - \frac{1}{z_1 + z_2}$$

Om de två komponenterna är lika ($z_1 = z_2 = z$) blir

$$m = \frac{3}{2z}$$

För n lika parallellkopplade komponenter blir

$$m = \frac{1}{z} + \frac{1}{2z} + \frac{1}{3z} + \dots + \frac{1}{nz}$$

Vid ett seriesystem bestående av komponenter med exponentiella livslängdsfördelningar är — som förut framhållits — felintensiteten konstant och kan uttryckas $z = 1/m$. Felinten-

säleten för ett redundant system är däremot *inte* konstant utan varierar med tiden. Detta förstås lätt genom förhållandet att ett redundant system fortsätter att fungera även sedan en parallellkopplad komponent fallit ur funktion på grund av fel. Då en felaktig komponent minskar antalet »funktionsvägar» i systemet blir felintensiteten på ett redundant system med felaktiga komponenter större än för samma system med samtliga komponenter intakta. Felintensiteten ökar således med tiden. Enligt definitionen på sid. 16 beräknas felintensiteten ur uttrycket

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt}$$

Under förutsättning att man inte ersätter eller reparerar en felaktig komponent är medeltiden mellan fel konstant vid ett redundant system. Men en av fördelarna med ett redundant system är ju att *systemet* fortsätter att fungera även om en komponent faller ur funktion. Det är därför lämpligt att man söker ersätta eller reparera en felaktig komponent så snart fel uppstått. Vid vilken tidpunkt detta utbyte eller reparation skall ske är givetvis beroende dels av systemets felintensitet, dels av antalet redundanta komponenter.

Om systemet består av komponenter med exponentiell livs-

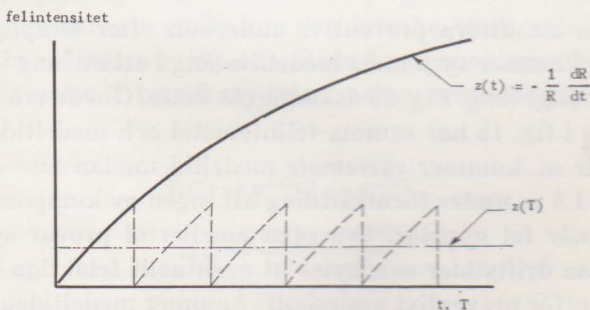


Fig. 19. Felintensitetens förlopp i tiden vid ett redundant system, dels utan preventivt underhåll (heldragna kurvan) dels med underhåll (streckade kurvan).

längdsfördelning kommer dess teoretiska felintensitet att ha det förlopp, som den heldragna kurvan på fig. 19 visar. Antag att inspektion av systemet sker efter en viss drifttid. Om systemet då har felaktiga komponenter, byter eller reparerar man dem. Systemet blir då åter som nytt, felintensiteten blir 0 som den streckade kurvan visar.

Medeltiden mellan två underhållsåtgärder vid en drifttid av t_d timmar är:

$$T_{uh} = \int_0^{t_d} R dt = \int_0^{t_d} e^{-zt} dt = \frac{1}{z} (1 - e^{-zt_d})$$

I detta uttryck är $(1 - e^{-zt_d})$ lika med sannolikheten av att fel uppträder under drifttiden t_d . Detta betecknas $Q(t_d)$. Medeltiden mellan fel i systemet blir, om tiden mellan två underhållsåtgärder betecknas med T :

$$m(T) = \frac{T_{uh}}{Q(T)} = \frac{\int_0^T R(t) dt}{Q(T)}$$

och felintensiteten (medelvärdet)

$$z(T) = \frac{1}{m(T)} = \frac{Q(T)}{\int_0^T R(t) dt}$$

Genom att utföra preventivt underhåll efter lämpliga tidsperioder kommer systemets medellivslängd att bli lång — teoretiskt oändligt lång. Fig. 20 åskådliggör detta. Om de två komponenterna i fig. 18 har samma felintensitet och medeltiden mellan fel är m , kommer *systemets* medeltid mellan fel — m_1 — att vara 1,5 m under förutsättning att ingen av komponenterna ersätts, när fel uppstår. Om man emellertid provar systemet efter vissa driftstider och byter ut eventuellt felaktiga komponenter (utför preventivt underhåll) kommer medeltiden mellan fel — $m(T)$ — att representeras av den heldragna kurvan.

medeltid
mellan fel

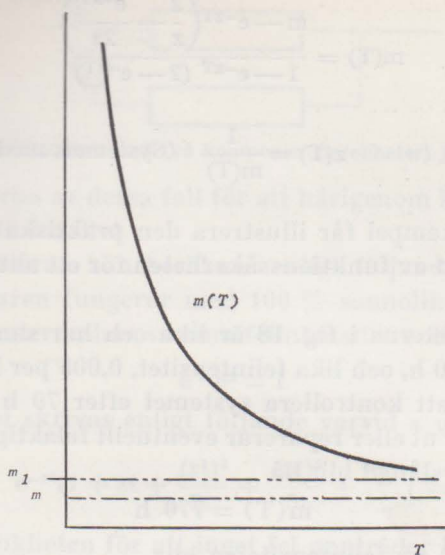


Fig. 20. Medeltiden mellan fel på ett aktivt redundanta system är beroende av tiden mellan två underhållsåtgärder.

Medelvärdet av felintensiteten blir, som förut framhållits, konstant. Den kan adderas till felintensiteterna för komponenter i serie med ett dylikt redundanta system enligt de metoder, som tidigare beskrivits.

De formler som behövs för beräkning av funktionssannolikheten för dylika system kan tas fram på grundval av det sagda. Följande ekvationer gäller för den kanske vanligaste kretsen med aktiv redundans (fig. 18). Båda komponenterna har samma felintensitet. T betecknar tiden mellan två underhållsåtgärder.

$$R(t) = e^{-zt}(2 - e^{-zt})$$

$$z(t) = \frac{2z(1 - e^{-zt})}{2 - e^{-zt}}$$

$$m = \frac{3}{2z}$$

$$m(T) = \frac{m e^{-zT} \left(\frac{2}{z} - \frac{e^{-zT}}{2z} \right)}{1 - e^{-zT} (2 - e^{-zT})}$$

$$z(T) = \frac{1}{m(T)} \quad (\text{Systemets medelfelintensitet})$$

Följande exempel får illustrera den praktiska arbetsgången vid kakylation av funktionssäkerheten för ett aktivt redundant system:

De två enheterna i fig. 18 är lika och har samma medeltid mellan fel, 200 h, och lika felintensitet, 0,005 per h. Man finner det lämpligt att kontrollera systemet efter 70 h drifttid, varvid man byter ut eller reparerar eventuellt felaktig enhet. Systemets medellivslängd blir då

$$m(T) = 770 \text{ h}$$

Medelvärde av felintensiteten blir

$$z(T) = 0,0013 \text{ fel per h}$$

Den så beräknade felintensiteten kan som tidigare framhållits, adderas med andra felintensiteter, t. ex. för enheter i serie med detta system, enligt den uppställning som framgår av fig. 14. Därvid måste givetvis anges att beräkningen är grundad på en underhållsperiod av T timmar.

Passiv redundans

Vid den passiva redundansen börjar en redundant komponent att arbeta först sedan fel uppstått på den komponent som är i funktion. I allmänhet fordras något slag av omkopplare härför. Fig. 21 visar en redundant koppling med en passiv komponent jämte en omkopplare.

I denna koppling kan tre fel uppstå: i någon av de två komponenterna samt i omkopplaren. Man måste därför beräkna

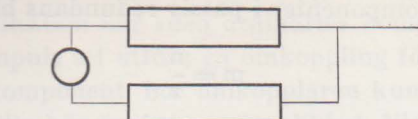


Fig. 21. Passiv redundans med två komponenter (enheter) jämte omkopplare. sannolikheterna av dessa fall för att härigenom kunna beräkna systemets felintensitet.

Sannolikheterna kan beräknas enligt följande: Antag först att omkopplaren fungerar med 100 % sannolikhet. De övriga två komponenterna har samma felintensitet z . Eftersom

$$e^{-x} e^x = 1$$

kan uttrycket skrivas enligt följande varvid x utbyts mot zt :

$$e^{-zt}(1 + zt + \frac{(zt)^2}{2!} + \frac{(zt)^3}{3!} + \dots) = 1$$

Om sannolikheten för att inget fel uppträder betecknas med p och sannolikheten att fel uppträder med q , är givetvis alltid $p + q = 1$. Som förut framhållits är sannolikheten för inget fel (= funktionssannolikheten) vid komponenter med exponentiell livslängdsfördelning

$$p = e^{-zt}$$

Om nu parenteserna multipliceras med detta uttryck representerar termen $e^{-zt}(zt)$ sannolikheten att exakt ett fel inträffar, termen $e^{-zt}(zt)^2/2!$ att exakt två fel inträffar etc. Således blir sannolikheten att inget fel eller ett fel inträffar $e^{-zt} + e^{-zt}(zt)$. I den redundanta kretsen enligt fig. 21 får (när omkopplarens säkerhet är 100 %) högst ett fel inträffa. Man har således erhållit ett uttryck för kretsens funktionssäkerhet:

$$R_k = e^{-zt} + e^{-zt}(zt) = e^{-zt}(1 + zt)$$

Medeltiden mellan fel blir

$$m = \int_0^{\infty} R_k dt = \frac{2}{z}$$

För n lika komponenter i passiv redundans blir

$$m = \frac{n}{z}$$

Om emellertid omkopplarens funktionssäkerhet inte är 100 % måste även denna komponent tas med i kalkyleringen. Beteckna omkopplarens funktionssäkerhet med R_o . Då blir funktionssäkerheten för hela kretsen

$$R_{kr} = e^{-zt} + R_o(e^{-zt}zt)$$

Funktionssäkerheten för en krets bestående av två olika komponenter med felintensiteterna z_1 och z_2 blir

$$R_{kr} = e^{-z_1 t} + \frac{z_1}{z_2 - z_1} (e^{-z_1 t} - e^{-z_2 t})$$

och medeltiden mellan fel blir

$$m = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}$$

Antag att enheterna i fig. 21 har felintensiteten 0,002 och 0,001 fel per timme samt att omkopplarens felintensitet är 0,0001. Vilken funktionssäkerhet besitter systemet under en drifttid av 50 h?

$$R = e^{-0,002 \cdot 50} + e^{-0,0001 \cdot 50} \frac{0,002}{0,002 - 0,001} (e^{-0,002 \cdot 50} - e^{-0,001 \cdot 50})$$

$$R = 0,9048 + 0,9960 (-2) (0,9048 - 0,9512)$$

$$R = 0,9972$$

Då felintensiteten vid ett passivt redundanta system inte är konstant utan varierar med tiden måste systemets felintensitet beräknas på samma sätt som vid den aktiva redundansen. Om systemet inspekteras med lämpliga tidsmellanrum, varvid eventuellt felaktiga komponenter (enheter) byts, kommer medelvärde av felintensiteten att även här bli konstant i likhet med vad sagts om de aktivt redundanta systemen.

Om man kan konstruera kretsen i fig. 21 så, att omkopplaren inte är i funktion när »den ordinarie» komponenten arbetar utan får impuls att utföra en omkoppling först då fel uppstår i denna komponent, bör omkopplaren kunna arbeta med en utomordentlig hög funktionssannolikhet. Vid de regelbundna inspektionerna kan omkopplaren överses eller bytas. Värdet på omkopplarens funktionssannolikhet bör då ligga mycket nära 1.

I det fall omkopplaren är i arbete både när »den ordinarie» komponenten eller den parallella komponenten är i funktion, beräknas den sammanlagda felintensiteten genom addition av omkopplarens och systemets felintensiteter.

Följande ekvationer gäller för den kanske vanligaste kretsen med passiv redundans: två komponenter med samma felintensitet z . T betecknar tiden mellan två provningar med åtföljande eventuella underhållsåtgärder. (Omkopplaren är icke medtagen).

$$R(t) = e^{-zt}(1 + zt)$$

$$z(t) = \frac{z^2t}{1 + zt} = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$$

$$m = \frac{2}{z}$$

$$m(T) = \frac{m - e^{-zT}(m + T)}{1 - e^{-zT}(1 + zT)}$$

$$z(T) = \frac{1}{m(T)}$$

Felintensiteten kan adderas till övriga felintensiteter på t. ex. komponenter i serie med systemet. Därvid skall anges att beräkningen är grundad på en underhållsperiod av T timmar.

Antag att blockschemat för en station, bestående av ett antal enheter, kan uppgraderas enligt fig. 22.

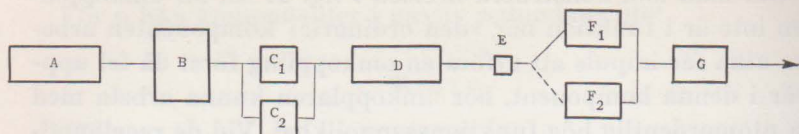


Fig. 22. Blockschema över en station, bestående av ett antal enheter, dels i serie, dels redundanta.

Enheternas totala felintensiteter och medeltid mellan fel har beräknats enligt föregående (fig. 14), och är:

Enhet	Felintensitet fel per h	Medeltid mellan fel h
A	0,00100	1 000
B	0,00083	1 200
C ₁	0,00400	375
C ₂	0,00400	
D	0,00091	1 100
E	0,00010	10 000
F ₁	0,0050	400
F ₂	0,0050	
G	0,00095	1 050

Stationen är avsedd att fungera kontinuerligt 24 h per dygn.

Som framgår av uppställningen är medeltiden mellan fel för de redundanta systemen C₁—C₂ och F₁—F₂ 375 h och 400 h under förutsättning att inget preventivt underhåll utförs. Dessa värden är låga i förhållande till de övriga enheternas värden, det är med andra ord ur funktionssäkerhetssynpunkt dålig balans mellan de i stationen ingående enheterna. Det antas emellertid att det inte är ekonomiskt lönande att tillverka funktionssäkrare enheter av typen C och F utan det blir billigare att utföra preventivt underhåll efter viss driftperiod. Man kommer överens med kunden att inspektion av stationen skall utföras efter 3 dygns drift varvid eventuellt felaktiga enheter repareras. Reparationstiden beräknas till 2 h; under denna tid tas stationen ur drift. Tiden mellan två underhållsåtgärder är således $3 \cdot 24 - 2 = 70$ h. Vilken funktionssäkerhet har stationen under denna tid?

De redundanta systemens medeltid mellan fel och felintensiteter beräknas med hänsyn till underhållsperioden 70 h och är:

$$m(70)_C = 1\,140$$

$$z(70)_C = 0,00088$$

$$m(70)_F = 1\,290$$

$$z(70)_F = 0,00076$$

Stationens felintensitet redovisas exempelvis på sätt som framgår av fig. 23. Den totala felintensiteten är 0,0054 fel per h. Funktionssäkerheten för 70 h drift beräknas till

$$R = e^{-0,0054 \cdot 70} = 0,69$$

ENKEL FLYGÖRVALNINGEN
UNDERHÅLLSAVDDELNINGEN
STOCKHOLM '80

Sammanställning

Blad 1/1

DRIFTANALYS

Station PS-XXX

Enhet

Drifttid

Bearbetad av

Datum 19 nov 1962

blad	underenhet			total felintensitet z % kh	uppmätta värden	
	namn	typ	sida i Rd-kat		antal rapp	total felintensitet
1	2	3	4	5	6	7
	Enhet A			100		
	Enhet B			83		
	Enhet C med en underhållsperiod om 70 h			88		
	Enhet D			91		
	Enhet E			10		
	Enhet F med en underhållsperiod om 70 h			76		
	Enhet G			95		
			<u>Summa:</u>	<u>543</u>		

Fig. 23. Sammanställning av felintensiteterna på stationen enligt fig. 22.

Provning av funktionssäkerheten

I det kontrakt, som är upprättat mellan köpare och säljare, skall funktionssäkerheten vara föreskriven. Då full betalning av produkten inte kan ske förrän köparen förvissat sig om att den föreskrivna funktionssäkerheten innehålles, måste produkten utsättas för sådana prov att detta kan konstateras. Enklast, provningstekniskt sett, skulle vara att sätta in produkten på dess plats i vapensystemet, anteckna det antal fel som inträffar, för att så småningom kunna bedöma funktionssäkerheten. Ett sådant provningsförfarande skulle emellertid ta orimligt lång tid i anspråk om goda värden på funktionssäkerheten skall kunna åstadkommas. Varken köparen eller säljaren kan godkänna en dylik metod. Det gäller i stället att konstruera sådana provningsmetoder att värdet på funktionssäkerheten på produkten kan mätas på kort tid med stor sannolikhet för att det erhållna värdet är det rätta.

Funktionssäkerheten kan definieras enligt följande:

»En produkts funktionssäkerhet är sannolikheten av att produkten skall kunna fungera på avsett sätt, under en viss tid under givna förhållanden».

I det föregående har beskrivits metoder för *förutberäknad* funktionssäkerhet. Det gäller nu att komma fram till den *empiriska* funktionssäkerheten.

Vid provning av en produkt antar man, att någon parameter m har ett visst givet värde m_0 och utför något slag av statistisk prövning av antagandet. De på så sätt erhållna värdena \bar{x} sammanfaller i allmänhet inte med det antagna värdet m_0 varför det gäller att ta ställning till frågan om avvikelserna $\bar{x} - m_0$ är av slumpmässig karaktär och således förenliga med antagandet $m = m_0$ eller om de är signifikativa och således $m \neq m_0$. Vid en sådan provning av en uppställd hypotes har man dock inga som helst garantier för att inte misstag kan bli begångna. Det är i huvudsak två fel som kan uppkomma, nämligen att hypotesen förkastas fastän den är sann eller accepteras fastän den är oriktig. Man brukar beteckna dessa båda risker med α och β .

Metoden att pröva en hypotes statistiskt består i att man tar slumpvisa värden x_1 ut en population, och den parameter som skall provas beräknas ur dessa värden. Antag att hypotesen är att medelvärdet m av en population är m_0 . Man vill nu genom stickprov ur populationen undersöka om detta är fallet. Om medelvärdet av alla stickprov x_i , nämligen \bar{x} , ansluter sig nära till m_0 skall hypotesen accepteras, i annat fall förkastas.

Från statistiken är bekant att medelvärdet av ett antal observationer beräknas enligt

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Ju större antal observationer som utföres, desto säkrare värde erhålles på \bar{x} . Om nu variabeln x är normalfördelad med medelvärdet m_0 och standardavvikelsen σ blir även medelvärdet \bar{x} normalfördelat med samma medelvärde m_0 men med standardavvikelsen $\sigma\sqrt{n}$. (Detta gäller för de flesta fördelningar om n är stort).

Man kan nu bestämma sig för att om \bar{x} underskrider eller överskrider vissa värden så förkastas hypotesen $m = m_0$ men

om \bar{x} ligger mellan dessa värden accepteras hypotesen. Man bestämmer t. ex. att hypotesen förkastas om avvikelsen $(\bar{x} - m)$ är större eller mindre än $1,95 \sigma\sqrt{n}$ i annat fall accepteras den. Ur en tabell över normalfördelningen erhålles värden för detta uttryck. Om $m = m_0$ är risken att \bar{x} är mindre än $m_0 - 1,96 \sigma\sqrt{n}$ lika med 2,5 % och risken att \bar{x} är större än $m_0 + 1,96 \sigma\sqrt{n}$ är likaledes 2,5 %. Sannolikheten att \bar{x} ligger mellan dessa två värden är 95 %, fig. 24.

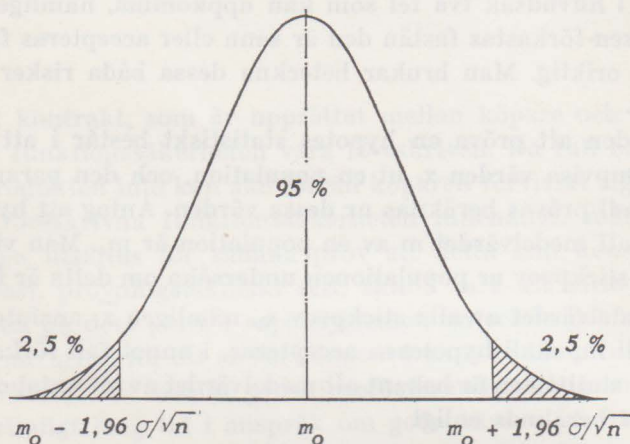


Fig. 24. Gausskurva med två konfidensgränser.

Gränserna för denna sannolikhet kallas *konfidensgränser* och intervallet mellan dem för *konfidensintervall*.

I vissa fall skall hypotesen $m = m_0$ förkastas endast om differansen $(\bar{x} - m_0)$ är antingen positiv eller negativ. Samma resonemang som ovanstående föres, resultatet framgår av fig. 25.

I båda dessa fall är under förutsättning att $m = m_0$ sannolikheten eller »risken» 5 % att *slumpmässigt* finna ett värde \bar{x} utanför konfidensintervallet. Om kurvans ekvation betecknas med $p(u)$ erhålles värdet av risken α i det senare fallet lätt även genom uttrycket

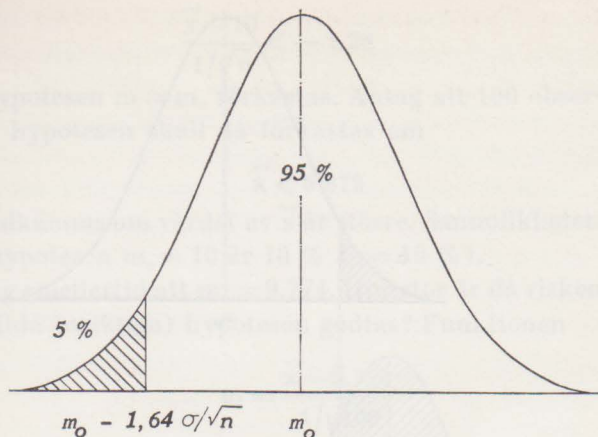


Fig. 25. Gausskurva med en konfidensgräns.

$$p(-\infty < u < a) = \int_{-\infty}^a p(u) du$$

där a är konfidensgränsen.

Som förut framhållits finns inte endast risken att förkasta en hypotes $m = m_0$ fast den är sann, det finns även en risk att acceptera den fast den är oriktig, och denna risk betecknas med β .

Antag att hypotesen $m = m_0$ inte är riktig utan i stället $m = m_0 - a$. Se fig. 26.

Den skuggade delen på nedre kurvan är då sannolikheten av att förkasta hypotesen $m = m_0$, men den oskuggade delen är sannolikheten eller risken β att acceptera hypotesen $m = m_0$ trots att den inte är sann.

Av fig. 26 ses lätt att om antalet observationer n är konstant och ett visst värde väljes på a , bestämmer detta β . En minskning av värdet för a ökar värdet för β . Om både a och β önskas mindre måste antalet observationer ökas.

Det bör observeras att i samtliga exempel antages populationens standardavvikelse vara känd.

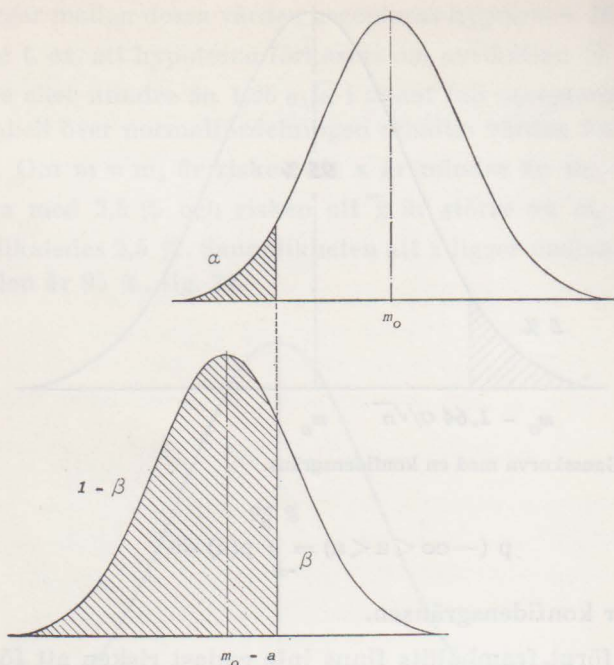


Fig. 26. Om en uppställd hypotes $m = m_0$ inte är riktig utan i stället hypotesen $m = m_0 - a$ är rätt så är sannolikheten att ändå acceptera hypotesen $m = m_0$ lika med β .

Följande sifferexempel kan göras: Vid beställningen av en produkt har föreskrivits att en parameter m skall ha värdet $m_0 = 10$. Producentens risk α är 10 %. Det antages att fördelningen av variabeln \bar{x} är normal med samma medelvärde som populationen av produkten och med standardavvikelsen σ/\sqrt{n} . Felfrekvensfunktionen normeras till en u-fördelning:

$$u = \frac{\bar{x} - m}{\sigma/\sqrt{n}}$$

d. v. s. u är normalt fördelad med medelvärdet 0 och standardavvikelsen 1. Om således

$$\frac{\bar{x} - 10}{1/\sqrt{n}} < -1.28$$

skall hypotesen $m = m_0$ förkastas. Antag att 100 observationer utförs: hypotesen skall då förkastas om

$$\bar{x} < 9.872$$

men godkännas om värdet av \bar{x} är större. Sannolikheten att förkasta hypotesen $m_0 = 10$ är 10 % ($\alpha = 10\%$).

Antag emellertid att $m_0 = 9.774$. Hur stor är då risken att den uppställda (oriktiga) hypotesen godtas? Funktionen

$$u_1 = \frac{\bar{x} - 9.774}{1/\sqrt{100}}$$

är normalt fördelad med medelvärdet 0 och standardavvikelsen 1. Insättes värdet på \bar{x} erhålles:

$$u_1 = \frac{9.872 - 9.774}{1/10} = 1.28$$

vilket motsvarar en sannolikhet av 10 %. Se fig. 27.

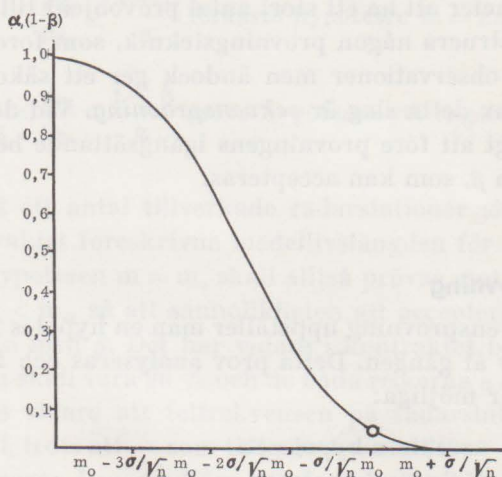


Fig. 27. Kurvan visar sannolikheten α att förkasta en hypotes $m = m_0$ vid olika avvikelser på m_0 .

Om således det rätta värdet på m_0 är 9.774 är risken att godkänna den först uppställda hypotesen $m_0 = 10$ — fastän den är oriktig — 10 % ($\beta = 10$ %).

Man kan göra ett diagram som visar förhållandet mellan m , α och β . I fig. 27 har antagits hypotesen $m = m_0$ med risken $\alpha = 5$ %. Kurvan visar sannolikheten α av att förkasta hypotesen $m = m_0$ vid olika avvikelser på m_0 samt sannolikheten $(1 - \beta)$ av att godta hypotesen $m = m_0$ vid olika avvikelser på m_0 . Om exempelvis $m = m_0 - \sigma/\sqrt{n}$ är det 26 % sannolikhet att hypotesen $m = m_0$ förkastas och $100 - 26 = 74$ % sannolikhet att den godtas. Längre fram skall visas hur denna kurva lätt förvandlas till en OC-kurva (Operating Characteristic curve).

Av de här genomgångna exemplen framgår, att om man i förväg önskar bestämma riskerna av att förkasta en riktig hypotes eller acceptera en oriktig, så bestämmer detta antalet erforderliga provtagningar. Vidare framgår, att antalet provtagningar i de flesta fall måste vara relativt stort. Det är därför nödvändigt — då man vid funktionssäkerhetsprovningar sällan har möjligheter att ha ett stort antal provobjekt till förfogande — att konstruera någon provningsteknik, som fordrar ett minimum av observationer men ändå ger ett säkert resultat. En metod av detta slag är *sekvensprovning*. Vid denna är det även möjligt att före provningens igångsättande bestämma de risker α och β , som kan accepteras.

Sekvensprovning

Vid en sekvensprovning uppställer man en hypotes $m = m_0$ och tar *ett* prov åt gången. Detta prov analyseras och följande tre slutsatser är möjliga:

- a) acceptera hypotesen
- b) förkasta hypotesen
- c) ta fler prov

För att kunna dra någon av dessa slutsatser måste man fastställa konfidensintervallet. Det kan man göra genom att först beräkna sannolikheten för hypotesen $m = m_0$. Denna sannolikhet benämnes p_{n_0} . Därefter beräknas sannolikheten för hypotesen $m = m_1$, vilken benämnes p_{n_1} . Om då p_{n_0} är mycket större än p_{n_1} , skall hypotesen $m = m_0$ accepteras, om däremot p_{n_1} är mycket större än p_{n_0} , skall hypotesen $m = m_1$ accepteras. Om slutligen värdena på p_{n_0} och p_{n_1} inte skiljer sig mycket skall ännu ett prov tas och analyseras.

Nu är det lämpligt att man jämför värdena på respektive sannolikheter genom att använda kvoten p_{n_1}/p_{n_0} som funktion av riskerna α och β , av vilka α nu kan benämnas »producentens risk» och β »konsumentens risk». Det kan visas rent matematiskt, att sekvensprovningen karaktäriseras av förhållandena

$$\frac{p_{n_1}}{p_{n_0}} \leq \frac{\beta}{1-\alpha} \text{ acceptera hypotesen } m = m_0$$

$$\frac{p_{n_1}}{p_{n_0}} \geq \frac{1-\beta}{\alpha} \text{ förkasta hypotesen } m = m_0$$

$$\frac{\beta}{1-\alpha} < \frac{p_{n_1}}{p_{n_0}} < \frac{1-\beta}{\alpha} \text{ pröva hypotesen ytterligare}$$

Antag att ett antal tillverkade radarstationer skall provas. Den i kontraktet föreskrivna medellivslängden för stationerna är 200 h. Hypotesen $m = m_0$ skall alltså provas mot en hypotes $m = m_1$, $m_1 < m_0$, så att sannolikheten att acceptera mothypotesen är lika med β . Det har vidare i kontraktet bestämts att konfidensen skall vara 90 % och de båda riskerna $\alpha = \beta = 10$ %.

Det antas vidare att felfrekvensen på radarstationerna är exponentiell, trots att — som tidigare framhållits — redundans i utrustningarna kan medföra att frekvensfunktionen blir av annat slag.

Sannolikheten för fel, som inträffar under funktionstiden t är enligt Poisson-processen

$$p_n = \frac{\left(\frac{t}{m}\right)^n e^{-\frac{t}{m}}}{n!}$$

där n är antalet fel

Om p_n i fortsättningen betecknar kvoten p_{n_1}/p_{n_0} erhålles:

$$p_n = \left(\frac{m_0}{m_1}\right)^n e^{-\left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_0}\right)t}$$

Provningen skall alltså fortsätta om

$$\frac{\beta}{1-\alpha} < \left(\frac{m_0}{m_1}\right)^n e^{-\left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_0}\right)t} < \frac{1-\beta}{\alpha}$$

Om t löses ut ur ovanstående olikhet, erhålles ekvationerna för gränserna:

$$t < \frac{-\ln \frac{\beta}{1-\alpha} + n \ln \frac{m_0}{m_1}}{\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_0}}$$

$$t > \frac{-\ln \frac{1-\beta}{\alpha} + n \ln \frac{m_0}{m_1}}{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_0}}$$

Sättes värdena $m_0 = 200$ och $m_1 = 100$ in i ekvationerna erhålles gränsen för accepteraandet av hypotesen $m = m_0$.

$$\frac{t}{200} = 0,69 n + 2,2$$

och gränsen för förkastandet av hypotesen

$$\frac{t}{200} = 0,69 n - 2,2$$

där $t/200$ är provningstiden t som multipel av medeltiden mellan fel.

Dessa två ekvationer kan representeras i ett diagram, fig. 28, där abskissan utgöres av antalet fel — n — och ordinatan av den erforderliga provningstiden — uttryckt som multipel av medeltiden mellan fel t/m_0 .

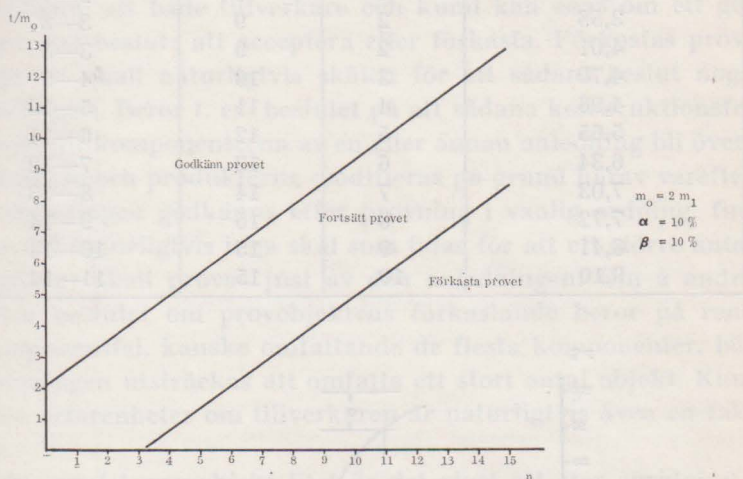


Fig. 28. Sekvensprovning. Gränser för godkännande eller förkastande av provet då $m_0 = 2 m_1$, $\alpha = \beta = 10 \%$.

Om 1 fel inträffar under tiden $t/m_0 = 3$, i exemplet efter 600 h, skall produkten godkännas, om 8 eller fler fel inträffat, skall produkten förkastas, om antalet inträffade fel är 2—7 skall provningen fortsätta. Tabell 21 visar några värden för t/m_0 från 3 till 9,10.

I exemplet har värdet på m_1 satts till 100 h, d. v. s. $m_0/2$ vilket måhända är ett alltför lågt värde. Det kanske vanligaste värdet för ifrågavarande produkter är $m_0 = 1,5 m_1$ men även mindre differenser tillämpas, exempelvis $m_0 = 1,2 m_1$.

OC-kurvan kan nu konstrueras, fig. 29, varvid på abskissan avsatts värden på m_0 och på ordinatan sannolikheten att acceptera en produkt med ett visst m_0 -värde.

Tabell 21. Antal fel för godkännande eller förkastande av provet vid en konfidensnivå av 90 % och $\alpha = \beta = 10\%$.

t/m_0	Antal fel		
	Godkänn	Förkasta	Fortsätt provet
3,0	1	8	2—7
3,58	2	9	3—8
4,01	2	9	3—8
4,70	3	10	4—9
4,96	4	11	5—10
5,65	5	12	6—11
6,34	6	13	7—12
7,03	7	14	8—13
7,72	8	15	9—14
8,41	9	15	10—14
9,10	10	15	11—14

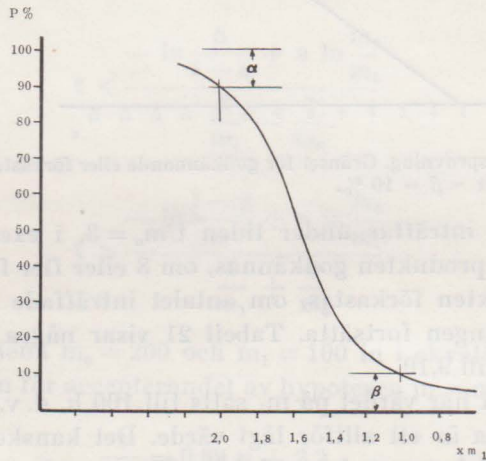


Fig. 29. OC-kurva. Konfidensnivån är 90 % och $\alpha = \beta = 10\%$ samt $m_1 = 0,5 m_0$.

Hur många objekt skall provas?

Problemet hur många objekt ur en population det är nödvändigt att prova kan naturligtvis lösas statistiskt med kända metoder, men det är ibland tveklaktigt om en sådan lösning är praktisk. Minsta provtid har här satts till 3 m₀ och man bör under denna tid kunna erhålla sådana erfarenheter av provstationen, att både tillverkare och kund kan enas om ett gemensamt beslut: att acceptera eller förkasta. Förkastas provobjektet skall naturligtvis skälen för ett sådant beslut nogga klarläggas. Beror t. ex. beslutet på att sådana konstruktionsfel gjorts att komponenterna av en eller annan anledning bli överbelastade och produkterna modifieras på grund härav varefter modifieringen godkänns efter provning i vanlig ordning, finnes det naturligtvis inga skäl som talar för att ett större antal stationer skall provas just av den anledningen. Om å andra sidan beslutet om provobjektens förkastande beror på rena komponentfel, kanske omfattande de flesta komponenter, bör provningen utsträckas att omfatta ett stort antal objekt. Kundens erfarenheter om tillverkaren är naturligtvis även en faktor.

Är antalet provobjekt litet är det givet att stor spridning i provningsresultatet kan uppstå. Detta behöver på intet sätt tyda på ojämn produktion eller ojämn kvalitet, i föregående avsnitt av denna studie har visats hur de plötsliga felen uppkommer »av en slump» i tiden. Om emellertid misstanke om ojämn kvalitet uppkommer, bör provningen utsträckas under så lång tid, att ett säkert beslut kan fattas.

Det provningsförfarande som här beskrivits förutsätter, att provobjekten befinner sig i »den nyttiga tiden» (se fig. 10) och att alltså inkörning utförts innan provningen påbörjas. Vidare skall den miljö, i vilken provet företas, specificeras i kontraktet. Man kan då antingen specificera en sådan miljö, som motsvarar objektens normala arbetsmiljö, eller föreskriva en bättre eller sämre miljö samt kompensera de resultat, man därvid erhåller, till motsvarande för standardmiljö.

6

Funktionssäkerhetskontroll vid projektering, konstruktion och tillverkning av elektronisk materiel

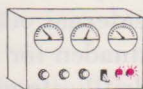
Som tidigare framhållits har vid utvecklingen av militär vapenmateriel av elektronisk typ mest strävats efter en hög teknisk prestationsförmåga — funktionssäkerhetskravet har beaktats först i andra hand. När materielen satts i tjänst och svagheterna i funktionssäkerheten blivit uppenbara, har man sökt förbättra driftsäkerheten genom modifieringar och ombyggnader. Därtill har man nödgats att anskaffa och utbilda ett stort antal tekniker, som genom täta underhållsåtgärder bättrat på driftsäkerheten. Detta har i sin tur krävt stora investeringar i form av verktygs- och mätutrustningar, utbytesenheter och reservdelar.

Det är givet att alla dessa åtgärder kostar pengar, men det är absolut inte lika givet att de ger materielen den driftsäkerhet som är erforderlig för att den beräknade försvarskraften skall uppnås. En sak är emellertid fullkomligt säker, nämligen att man med sådana metoder *inte* erhåller den eftersträfvade maximala effektiviteten. Denna kan ernås endast genom en optimering av funktionssäkerheten och underhållsriktigheten. Härigenom blir driftkostnaderna de minsta möjliga.

Underhållsriktigheten på en produkt kan definieras enligt följande:

»Underhållsriktigheten är en av konstruktionen beroende egenskap hos en produkt som gör det möjligt att till fullo utnyttja den underhållskapacitet som tillföres produkten i syfte att öka dess tillgänglighet.»

Produkterna skall konstrueras och byggas så, att avbrotts-tiderna för att genomföra de erforderliga underhållsåtgärderna blir de minsta möjliga. Det är dock nödvändigt att se till att funktionssäkerheten inte blir lidande på grund av strävan efter hög underhållsriktighet t. ex. genom att placera en underenhet på ett sådant sätt att den är lätt utbytbar, men genom sin placering är utsatt för onormala påkänningar. Fig. 30 ger några exempel på hur kravet på hög underhållsriktighet inte beaktas i erforderlig grad. I flygplanet i bildens mitt har en enhet med hög felintensitet placerats så, att fyra enheter med låg felintensitet måste monteras ner för att komma åt den. Det betyder att underhållstiden blir längre än vad som varit fallet



Tiden mellan två fel, $m = \frac{1}{\lambda_{TOT}}$



"Daglig kontroll av att förstärkarens kontrollampa lyser"

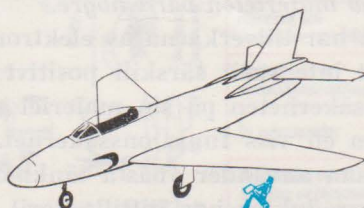
4 enheter måste ned för att komma åt den femte
Det betyder:
Lång underhållstid



Systemet skall byggas så att avbrotts-tiderna för underhållsåtgärdernas genomförande blir ett minimum



Att se runt hörn är omöjligt.....
Rätt instrumentplanering har stor betydelse för underhållsarbetet



(I luftintaget sitter en antenn)

"Endast en sinäväxt tekniker kan göra den dagliga inspektionen av motorn"

Fig. 30. Kravet på produkternas underhållsriktiga utformning måste alltid beaktas.

om enheten kunnat placeras lämpligare. Dessutom kommer det onödiga monteringsarbetet på de övriga fyra enheterna att slita materielen. Det kan även tänkas att felaktigheter kan uppstå i samband med upprepade ned- och uppmonteringar.

Som tidigare framhållits kan man erhålla maximal effektivitet endast genom att optimera funktionssäkerhet och underhållsriktighet. Det betyder, att man skall börja behandla driftsäkerhetsfrågorna *redan på projektstadiet* och kontinuerligt bearbeta dem under konstruktions- och tillverkningsprocedurerna.

Att så hittills inte har skett i någon större utsträckning är även kunden skuld till. Kundens oförmåga att klart definiera sina krav på materielens driftsäkerhet har omöjliggjort bl. a. vägningen av kostnaderna för funktionssäkerhetens inbyggande i materielen mot kostnaderna för materielens drift vid en viss tillgänglighetskvot d. v. s. förhållandet mellan drifttiden och summan av drifttid och avbrottstid. Följden härav har blivit, att »driftsäkra konstruktioner inte lönat sig» för en tillverkare, vars offerter legat högre än konkurrenternas och därför inte blivit antagna, trots att den totala kostnaden för materielen — alltså anskaffningskostnaden jämte driftkostnaden — varit lägre och, vad betyder mer ifråga om militär materiel, *försvarsvärdet av materielen varit högre.*

Å andra sidan har tillverkarna av elektronisk materiel hittills i allmänhet inte varit särskilt positivt inställda till att specificera driftsäkerheten på sin materiel och ännu mindre till att garantera en viss funktionssäkerhet. Man hänvisar i stället till att man använder »bästa tänkbara komponenter» eller att »våra produkter har hittills varit funktionssäkra». Intet av dessa påståenden äger någon reell tyngd. »De bästa komponenter» kan exempelvis bli högst otillförlitliga om man placerar dem i olämplig miljö vid konstruktionen av en krets, och att tillverkaren hittills producerat tillförlitlig materiel, ger visserligen kunden en viss säkerhet, men alls ingen garanti för att tillverkaren lyckas i detta speciella fall. Dessutom är ett

sådant påstående alltför subjektivt och obestämt för att kunna användas som en parameter i effektivitetsekvationen.

I allmänhet har varken kund eller tillverkare behandlat driftsäkerhetsfrågorna på ett systematiskt sätt vid projekteringen och den vidare utvecklingen av materiel. Fig. 31 är avsedd att generellt visa hur man går tillväga för att uppnå ekonomiskt optimal driftsäkerhet.

Vid den taktiska planeringen av systemet måste man ha klart för sig vilken *driftsäkerhet* man fordrar av det, t. ex. om man nöjer sig med att ha systemet i drift 8 av 24 h, eller om det operativa kravet gör det nödvändigt att systemet fungerar 23,9 av 24 h. Man måste även redan nu åtminstone i stora drag ha en plan för hur materielen skall underhållas, t. ex. om underhållet helt eller delvis kan förläggas till någon redan existerande underhållsorganisation eller om en ny underhållsorganisation måste byggas upp, de ungefärliga anskaffnings- och driftskostnaderna för denna o. s. v.

Under systemstudierna bearbetas dessa uppgifter ytterligare. Frågan om erforderlig personal för underhållsverksamheten, erforderlig utbildning, utbytesenheter, reservdelar, utrustning och lokaliteter utreds successivt, så att kostnader för olika alternativ senare kan framtas.

I samband med den ekonomiska avvägningen och systemvalet måste kostnaderna för underhållet för en viss beräknad driftsäkerhet beaktas. Kostnaderna för driftsäkerheten är, som förut framhållits, beroende av materielens funktionssäkerhet. Nu är tillfället inne att väga kostnaderna för att bygga in högre funktionssäkerhet i materielen mot kostnaderna för det i så fall lägre underhållsbehovet. Vägningen är inte enkel, sannolikt måste ett flertal hypoteser prövas innan det slutliga systemvalet kan ske.

Det är härvid naturligt att söka värdet på funktionssäkerheten vid vilket kostnaderna för ett visst uppdrag eller en viss funktionstid för materielen blir de minsta möjliga. Man kan utveckla praktiskt tillämpbara teorier om hur kostnaderna för

funktionssäkerhet skall vägas mot kostnaderna för drift och underhåll av materielen, dessa teorier kan grafiskt åskådliggöras enligt fig. 32. Det gäller att finna den totala kostnadskurvans minimivärde.

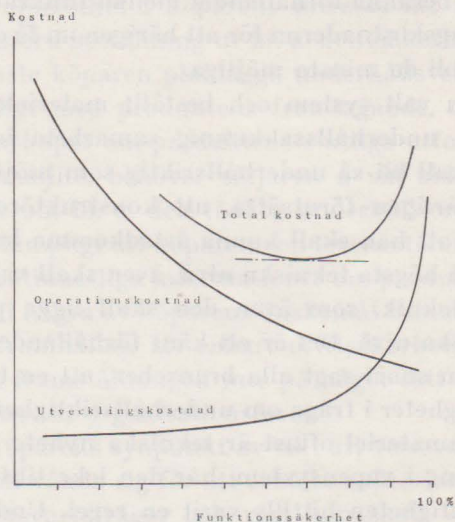


Fig. 32. Det gäller att finna det värde på funktionssäkerheten vid vilket kostnaderna för en viss funktionstid för materielen blir de minsta möjliga.

Den i detta sammanhang kanske intressantaste frågan är sambandet mellan utvecklingsgraden och kostnaderna härför. Det är uppenbart att utvecklingskostnaden för en produkt består dels av en grundkostnad som är oberoende av utvecklingsgraden, dels av en kostnad som är beroende av denna. Kurvan utgår således inte från origo. I närheten av funktionssäkerheten 100 % stiger kurvan snabbt och går mot oändligheten.

Funktionssäkerheten på nuvarande elektronisk vapenmateriel är i allmänhet låg och det synes av hittills bearbetade erfarenheter som om den skulle kunna ökas väsentligt för mått-

liga utvecklingskostnader. Det är troligt att kurvan har en ungefärlig linjär sträckning åtminstone upp till funktionssäkerhetsvärden omkring 80 % samt att stigningen är måttlig. Med kännedom om de ständigt stigande underhållskostnaderna — personallöner, administration etc. — är det därför nödvändigt att söka beräkna förhållandet mellan funktionssäkerheten och utvecklingskostnaderna för att härigenom få de totala kostnaderna att bli de minsta möjliga.

Sedan man valt system och beställt materielen skall konstruktör och underhållssakkunnig samarbeta intimt för att produkten skall bli så underhållsriktig som möjligt. Man kan nämligen svårligen förutsätta, att konstruktören, av vilken man fordrar att han skall kunna åstadkomma konstruktioner som ligger på högsta tekniska nivå, även skall vara sakkunnig i underhållsteknik, som även den skall ligga på för dagen högsta tekniska nivå. Det är ett känt förhållande, som gör sig gällande inom snart sagt alla branscher, att en teknisk nyhet har vissa svagheter i fråga om underhållsriktigheten. Eftersom militär vapenmateriel oftast är tekniska nyheter vid leverans och inplacering i vapensystem, har den icke tillfredsställande underhållsriktigheten hittills varit en regel. Under de senare åren har dock detta förhållande observerats speciellt av de firmor, som har vapenmateriel på sitt huvudprogram. Då emellertid framställningen av modern vapenmateriel sprids ut på allt fler tillverkare, blir det även alltmer nödvändigt att också sådana tillverkare, som har både civil och militär produktion, skaffar sig personal, som är insatt i underhållstekniska frågor.

Slutligen skall underhållsorganisationen bestämmas definitivt allt eftersom konstruktion, tillverkning och installation av materielen fortskrider. Underhållsplanen skall slutligt fastställas, beräkningen av utbydessystem slutföras, anskaffningen av reservdelar planläggas, underhållsutrustningen beräknas och anskaffas m. m.

Resultatet av alla dessa överläggningar, beräkningar och övriga åtgärder, blir — om ett intimt samarbete mellan samt-

liga i planlösningen deltagande sker — en maximal effekt av utlagda försvarsanslag.

Driftsäkerhetsorganisationen

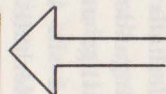
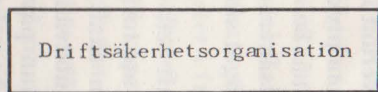
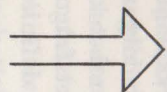
Det ligger i allmänhet i köparens intresse att följa utvecklingen av en gjord beställning ur bl. a. driftsäkerhetssynpunkt. Dessutom måste köparen planlägga underhållsverksamheten i detalj samtidigt med produktens framtagande, och för detta erfordras kunskaper om produktens slutliga utformning. Som tidigare framhållits, behöver säljaren å sin sida en hel del informationer om bl. a. den tänkta underhållsorganisationen, varför det är lämpligt att köparen och leverantören enas om ett system för kontinuerliga informationer om produktens utveckling. Här skall några av köparens önskemål behandlas men det bör särskilt framhållas, att enbart driftsäkerhetsfrågorna berörs samt att framställningen inte på något sätt får betraktas som ett förslag till organisationsform.

Det är ur köparens synpunkt av vikt att veta vart inom företaget han skall vända sig för att erhålla auktoriserade uttalanden i driftsäkerhetsfrågor och vart han skall vända sig när överläggningar inom detta område är nödvändiga. Eftersom ett beslut inom driftsäkerhetsområdet kan påverka ett flertal av de inblandade arbetsgruppernas verksamhet, är det både praktiskt och ekonomiskt att ha ett huvudorgan för dessa frågor (fig. 33), man spar då både tid och arbetskraft.

Huvudorganisationen för driftsäkerhetsfrågor har ansvaret för dels att driftsäkerheten beskrivs och definieras realistiskt i de dokument som är erforderliga, dels att varje berörd organisationsenhet i företaget erhåller sådana upplysningar och direktiv, att arbetet kan bedrivas efter upplagda planer. En dylik huvudorganisation är nödvändig, ty materiell driftsäkerhet kan inte erhållas genom en mängd från varandra skilda ansträngningar eller aktioner, de måste i stället koordineras och inriktas på det gemensamt uppställda målet.

Materielens
användningsområde
operationstid per tidsenhet
uppställningsplatser
benämning

Underhållsorganisationens
allmänna uppbyggnad
geografiska belägenhet
transportmöjligheter
allmänna utrustning
personella resurser



Driftserfarenheter av
liknande materiel
Felstatistik
Underhållsdata i form av
funktionssäkerhet
underhållsriktighet
erforderliga underhålls-
resurser

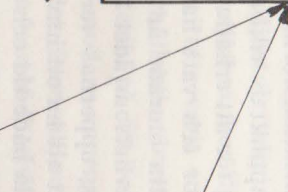
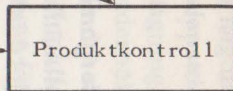
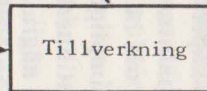
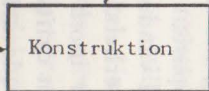
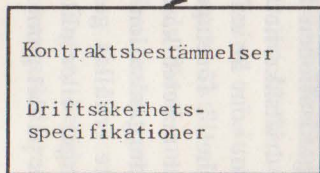


Fig. 33. Driftsäkerhetsorganisationen inom ett företag har ansvaret för att varje berörd organisationsenhet erhåller sådana upplysningar och direktiv, att arbetet kan bedrivas efter upplagda planer.

Kontraktbestämmelser. Driftsäkerhetspecifikationer

Som tidigare framhållits måste driftsäkerheten byggas in under olika steg i materielens utveckling. Det betyder, att man under hela utvecklingen av en produkt måste överväga inte bara hur de olika kretsarna och underenheterna skall konstrueras för att funktionssäkerheten skall bli stor, utan även hur ett inträffat fel skall kunna lokaliseras och avhjälpas med minsta möjliga ansträngning och med minsta möjliga stilleståndstid på enheten.

Man måste specificera driftsäkerheten på något lämpligt sätt, t. ex. bestämma att materielen skall kunna fungera 20 av 24 h och förutsätter härvid att kostnaderna för detta i form av underhållsresurser blir de minsta möjliga. Det är inte tillräckligt att specificera driftsäkerheten som t. ex. »största möjliga», då man naturligtvis genom att tillverka materielen med en funktionssäkerhet nära 100 % och genom att skapa mycket stora underhållsresurser kan åstadkomma en utomordentligt stor driftsäkerhet. Kostnaderna härför stiger emellertid till stora belopp, och detta inkräktar givetvis på andra objekt så att den totala effektiviteten går förlorad. Man måste därför avgöra den erforderliga driftsäkerheten på grundval av den aktuella materielens betydelse i ett vapensystem.

I en senare studie kommer metoder för att definiera och mäta underhållsriktigheten på materiel att utvecklas, här skall i huvudsak endast funktionssäkerheten behandlas. Köparen skall i det upprättade kontraktet ange t. ex. värdet för medellivslängden m och säljaren skall garantera att den färdiga produkten innehåller detta värde.

Producenten måste således allt efter projektets framåtskridande ständigt se till att värdet på m ligger till grund för konstruktion, tillverkning och installation. Generellt kan detta framställas så, att en funktionssäkerhetsorganisation övervakar dessa frågor inom alla övriga organisationsenheter som har med projektet att göra. Funktionssäkerhetsorganisationen

måste ha ett intimt samarbete med köparen (brukaren) av materielen och av denne erhålla erforderliga uppgifter om *hur* materielen skall användas, *var* den skall användas, *när* den skall användas etc. Uppgifter om planerad underhållsorganisation och allt vad detta innesluter i sig är många gånger erforderliga.

Dessa uppgifter skall kanaliseras till producentens olika organisationsenheter där de behövs i arbetet. Det är vidare av vikt, att brukarens erfarenheter av i drift varande materiel meddelas funktionssäkerhetsorganisationen för sådan bearbetning, att t. ex. konstruktionsavdelningen i fortsättningen kan undvika en konstruktion, som kanske rent tekniskt är fullt godtagbar men av någon anledning är mindre lämplig i praktisk drift.

Det sagda kan sammanfattas i följande:

Köparen och säljaren skall i kontraktet införa ett specificerat värde på funktionssäkerheten. Under vilka förhållanden detta värde gäller skall specificeras. Föreskrifter om hur funktionssäkerheten skall provas och under vilka förhållanden provningen skall ske skall vara intagna i kontraktet. Om köparen ur reservdelssynpunkt önskar, att produkten byggs upp av vissa slag av komponenter, skall även detta föreskrivas.

Konstruktion

Bell Telephone Laboratories och Electronics Laboratory of the US Navy har i en undersökning av felorsakerna på elektroniska enheter funnit att dessa kan hänföras till

konstruktion	40 %
komponenter	30 %
felaktigt handhavande av enheterna	
i drift	20 %
tillverkning	10 %

Man kan av denna och liknande undersökningar dra följande slutsats: För att en konstruktion skall bli funktionssäker, är det inte tillräckligt att man använder enbart goda komponenter och sammanför dem i teoretiskt oklanderliga kombinationer. Konstruktionstekniken måste dessutom kombineras med stor kunskap om hur de teoretiska intentionerna kan praktiskt omsättas i tillverkningsproceduren. En i massa ingjuten modul är kanske på grund av möjligheterna att skydda komponenterna mot mekanisk åverkan och fuktupåvägningar teoretiskt sett mer funktionssäker än en modul, oskyddat uppbyggd på en tryckt krets, men om den är säkrare i verkligheten beror givetvis på *hur* modulerna tillverkas.

Det förekommer ofta på nuvarande materiel, att enheter som beräknas inte bli utsatta för mekaniska påkänningar inneslutes i ej hermetiskt tillslutna kåpor. Efter någon tid slutar enheten att fungera, beroende på att det vatten, som bildats i kåpan på grund av temperatur- och tryckförändringar, angripit vissa komponenter och orsakat fel. På insända rapporter om dylika fel brukar meddelas att »hål för vattnets avrinning upptagits i kåpan» samtidigt som man föreslår att kåpan borttas helt. Man har nämligen av erfarenhet lärt sig att icke hermetiskt tillslutna kåpor inte utgör något skydd för fuktangrepp på komponenter, utan snarare befördrar fuktangrepp och sålunda är en felkälla. Det är möjligt att konstruktören avsett att kåpan skulle ha gjorts hermetiskt tillsluten men att tillverkningen inte mäktat utföra hans intentioner praktiskt.

Av det nämnda framgår att ett intimt samarbete måste utvecklas mellan konstruktion och tillverkning, och att ett sådant samarbete utgör en av grundstenarna för driftsäker materiel.

På konstruktionssidan vilar emellertid ansvaret att först utveckla de teoretiska förutsättningarna för den fastställda medellivslängden mellan fel. I och med att flera konstruktörer arbetar på var sin del av produkten, måste de olika delarnas (enheternas, underenheternas) funktionssäkerhet bestämmas.

Gränser för funktionssäkerheten skall fastställas, så att inte extremt höga värden erhålles för vissa enheter och låga för andra, till förfång för den totala kostnaden och därmed effektiviteten.

Fig. 34 visar ett typiskt exempel på detta. Exemplet är taget från en äldre radarutrustning, bestående av 5 underenheter. Ordinatan anger antalet komponenter för hela enheten eller för underenhet, »komplexiteten», och abscissan anger medellivslängden m mellan fel. Underenheten 1 bestående av 130 komponenter har $m = 1\,600$ h under det att underenheten 5 bestående av 435 komponenter har $m = 170$ h. Stationens totala $m = 75$ h. Om felintensiteten per komponent i utrustningen beräknas, kan kurvan dras (man gör givetvis ett fel genom antagandet att felfrekvensen är lika för samtliga komponenter) och man kan jämföra komplexiteten med medeltiden mellan fel. Man gör härvid den reflektionen att underenheten 5 är huvudansvarig för stationens låga medellivslängd. Om denna underenhet genom omkonstruktion av något slag kunnat bringas att ligga på kurvan, således ha $m = 650$ h, skulle den totala medellivslängden ökat från 75 till 115 h.

Av exemplet framgår även med önskvärd tydlighet hur nöd-

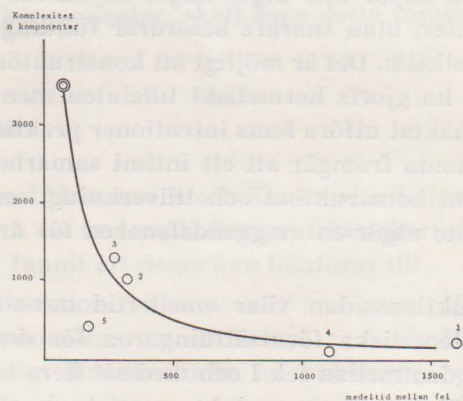


Fig. 34. Jämförelse mellan medellivslängderna för i en station ingående underenheter. Underenheten 5 »styr» funktionssäkerheten för hela stationen.

vändigt det är att föreskriva den erforderliga funktionssäkerheten av samtliga i ett vapensystem ingående enheter. Exemplet visar vidare hur *en* underenhet »styr» funktionssäkerheten för hela stationen. Detsamma är förhållandet i en systemkedja, bara med den skillnaden att den kostnad, som nedlagts i ett vapensystem, är så ofantligt mycket större.

På den skiss över materielens principiella uppbyggnad, som bör utföras omedelbart då konstruktionsarbetet börjar (om icke en dylik skiss redan utförts i samband med kontraktsförhandlingarna), skall anges huvudprinciperna för hur man tänkt sig materielens uppbyggnad i enheter, kombinationen av mekaniska, hydrauliska, pneumatiska, elektriska och elektroniska enheter etc. Vidare skall anges vilka metoder för kontroll av enheterna som är planerade, om man avser att använda inbyggda eller fristående kontrollinstrument, om man planerar manuell eller automatisk kontroll m. m.

Köparen har då möjligheter att på grundval av dessa informationer göra en första beräkning över hur materielens underhållsbehov kan täckas av den redan befintliga organisationen, vilka kostnader som är förbundna med detta samt vilka kostnader, som kan väntas vid en erforderlig ändring eller utvidgning av underhållsorganisationen. Överläggningar om ändringar av materielens uppbyggnad är möjliga. Köparen har härvid möjligheter att orientera säljaren om samtliga de faktorer, som kommer att påverka driftsäkerheten, t. ex. underhållets organisation, geografiska utspridning, reservdelsförsörjning, personella resurser, utrustningsstandard m. m. Det är en förutsättning för hög driftsäkerhet att konstruktören är väl förtrogen med de förhållanden underhållsverksamheten arbetar under och de resurser som kan ställas till underhållsorganisationens förfogande. En hög funktionssäkerhet måste kombineras med hög underhållsriktighet och stor underhållssäkerhet d. v. s. rätt uppbyggda underhållsresurser, för att man även skall uppnå en stor driftsäkerhet. Det betyder, att ett intensivt arbete måste läggas ned på att göra handhavandet av

materielen så enkelt som möjligt: konstruktören måste under hela sitt arbete antingen själv eller i samarbete med särskild expert göra klart för sig hur fel på materielen skall mötas.

Den funktionssäkerhetsberäkning, som legat till grund för den i kontraktet föreskrivna och garanterade medellivslängden, bearbetas ständigt i takt med konstruktionens framskridande. Det verkliga antalet komponenter jämte typer och fabrikat skall förtecknas för varje underenhet, felintensiteterna beräknas och underenhetens medeltid mellan fel uppskattas. Erforderliga redundanser införes. Köparen skall ha tillfälle att granska denna bearbetning av funktionssäkerhetskalkylen med hänsyn dels till komponentvalet, dels till redundansen och dels till felintensiteterna. Komponentvalet kan inverka på köparens reservdelsorganisation och komponenternas felintensiteter kan bli föremål för diskussioner, där säljaren måste vara beredd att förklara eventuellt antagna lägre felintensiteter än vad erfarenheter av existerande materiel ger vid handen.

Då funktionssäkerhetskalkylen granskas framgår även »de svaga punkterna» i konstruktionen. Tillfällen till överläggningar hur dessa så vitt möjligt skall förstärkas yppar sig här. Det är möjligt, att köparen är beredd att betala för en funktionssäkrare lösning av ett problem, och tillfälle till ett sådant beslut finns i detta sammanhang. Det är också möjligt, att säljaren kan föreslå en konstruktionsprincip som skulle ge en betydligt större prestation men som är oprövad ur funktions-säkerhetssynpunkt. Köparen har då möjlighet att väga fördelar och nackdelar med en sådan lösning. Som förut framhållits, är ett av huvudskälen till att fel uppträder i elektronisk utrustning att teoretiska grunder för en konstruktion saknas; man kan på förhand inte uttala sig om hur materielen kommer att fungera. Den risk köparen tar om han godkänner sådana konstruktioner, kan motverkas genom att man vidtar åtgärder för att möta en eventuell icke godkännbar minskning i funktionssäkerheten med högre underhållssäkerhet eller att

man utarbetar planer för en snabb modifiering av en dylik konstruktion.

Det är givetvis alltid önskvärt att endast kända och utprovade konstruktionsprinciper används, men i den kapplöpning i utvecklingen av militär vapenmateriel som försiggår är detta inte alltid möjligt.

De komponenter som man avser använda i konstruktionen, skall givetvis vara av hög kvalitet. Det är emellertid inte alltid tillräckligt att enbart anlita välkända komponenttillverkare, man måste även på något sätt förvissa sig om att en aktuell leverantör är lämplig att leverera just det komponentslag som behövs. Man har då möjligheterna att själv prova komponenterna eller att få provningsresultat från exempelvis ett statligt eller privat provningsföretag. Vilket alternativ som än väljes får man vara beredd att betala till synes mycket pengar som dock är en bråkdel av de kostnader som uppstår, om konstruktionen förses med olämpliga komponenter.

I detta sammanhang kan framhållas möjligheterna att samla informationer om komponenter genom snabbåldring. Man ökar belastningen på komponenterna och genomför ett testprogram. Om man känner till relationerna mellan den konstgjorda miljö man på så sätt skapat och den verkliga arbetsmiljön, kan slutsatser dras om komponenternas livslängder. Vid ett dylikt provningsförfarande kan man vinna mycken dyrbar tid, men snabbåldring kan inte helt ersätta de konventionella metoderna utan blir endast ett komplement till dessa. Under de senaste åren har inom US Air Force gjorts undersökningar över lämpliga program för snabbåldring men arbetena synes ännu inte vara avslutade. Litteratur finnes tillgänglig, exempelvis B. T. Howard: Accelerated Aging of Semiconductors.

Tillverkning

Varje företag har något slag av kontrollorganisation i sin tillverkning. Vare sig denna organisation eller tillverkningen som

sådan kan dock som regel göra en produkt funktionssäkrare än vad konstruktören avsett. Kontrollens huvudfunktion förblir att kontrollera att den avsedda säkerheten inte minskas under tillverkningsproceduren. Det ligger emellertid utom ramen för denna studie att behandla de allmänna kontrollproblemen i tillverkningen; här skall endast framhållas att kontrollfunktionen dels har ansvar för att det av konstruktionssidan uppställda funktionssäkerhetsmålet innehålls, dels även att produkten blir så underhållsriktigt tillverkad, att driftsäkerheten kan hållas på en hög nivå. Det kan även framhållas, att ett nära samarbete mellan konstruktion och tillverkning möjliggör att de eventuella fel, som konstruktionssidan begår, rättas till i tillverkningen. Härvid erfordras dock att tillverkningen är tillräckligt informerad om funktionssäkerhetsmålet för den aktuella produkten.

Vad som under rubriken konstruktion sagts om överläggningar mellan köpare och säljare är i stort även tillämpligt för tillverkningen, med det undantaget att en eventuell ändring blir svårare och kostsammare att genomföra sedan projektet kommit i produktion. Om emellertid sådana misstag gjorts från köparens eller säljarens sida, att en ändring är ofrånkomlig, skall man grundligt utreda *var* och *när* arbetet skall utföras. I de fall ändringar är erforderliga ur den tekniska prestationens synpunkt är det i allmänhet fördelaktigt att göra dem i samband med tillverkningen eller omedelbart i anslutning till denna, även om detta betyder förlängd leveranstid. Om däremot ändringar skall utföras på grund av att underhållsriktigheten inte är tillfredsställande, är det möjligt att arbetet skall utföras vid lämpligt tillfälle efter materielens leverans. Beslut härom tillkommer köparen, men det åligger säljaren att i samarbete med köparen göra den erforderliga utredningen.

Produktkontroll

Det är många gånger lämpligt att tillverka prototyper av enheter eller underenheter för laboratorieändamål, då man vill

göra uppmätningar av olika slags belastningar på komponenterna. Särskilt aktuellt är detta vid konstruktioner där man har ringa erfarenheter av funktionssäkerheten. Dylika uppmätningar i laboratoriemiljö kan vara av intresse även för kunden, varför resultaten bör arkiveras.

Så snart en enhet eller underenhet ingående i den aktuella produkten tillverkats skall den provas på ett sådant sätt att man blir förvissad om att de uppställda funktionssäkerhetskraven innehålls. Som förut framhållits är funktionssäkerheten på en enhet inte bara beroende på konstruktionen utan även på hur den tillverkats. Det är alltså nödvändigt att prova den under sådana förhållanden som kommer att vara rådande under produktens »nyttiga tid» (fig. 10). Provningsen kan även kombineras med den erforderliga inkörningstiden, under vilken inkörningsfelen upptäcks och åtgärdas.

Av de förda provningsprotokollen skall bland annat framgå *hur* och *när* fel inträffat så att en fullständig analys kan utföras. Om härvid felintensiteten på enheten inte stämmer överens med den beräknade måste man undersöka om det beror på valet av komponenter, utformningen av kretsarna eller på tillverkningen. Provningsprotokollen skall stå till kundens förfogande liksom även de utförda analyserna av inträffade fel.

I produktkontrollen sker även den slutliga granskningen av enheternas underhållsriktighet. Utformningen har skett på konstruktionsstadiet och i tillverkningen och nu kan praktiska prov genomföras. Arbetstider för lokalisering och reparation av fel kan bestämmas liksom de lämpligaste metoderna härför. Dessa uppgifter ingår i de underhållsspecifikationerna, som tillverkaren skall utarbeta. Likaså kan de antagna metoderna för de preventiva underhållsåtgärderna verifieras och slutgiltigt bestämmas.

Slutkontrollen av hela projektet skall utföras i enlighet med de bestämmelser, som upptagits i kontraktet. Innan slutkontrollen påbörjas skall produkten vara så inkörd att inkörnings-

fel inte uppträder under kontrollperioden. Köparens representanter skall delta i slutprovningen.

Provningsprotokollet skall bland annat innehålla följande uppgifter:

1. total provtid
2. varje felyttring och tidpunkt härför
3. felorsaken
4. analys av felen
5. åtgärd för avhjälpande av felen
6. avbrottstid
 - a) felsökningstid
 - b) tid för utbyte av enhet
 - c) reparationstid av enhet
7. ändringsförslag

Om provningsresultatet inte exakt överensstämmer med bestämmelserna i kontraktet, skall godkännande eller förkastande av produkten beslutas av köparen eller av honom bemyndigad.

Erforderlig dokumentation

Man kan ställa frågan vad det är för skillnad mellan driftsäkerhet och kvalitet. Med kvalitet har man väl hittills menat en produkts tekniska prestation samt dess förmåga att fungera under lång tid, kanske under många tiotal år. I denna studie har med begreppet driftsäkerhet menats sannolikheten av att en produkt kan fungera med *fastställd teknisk prestation* under en viss tid, under vilken man underhåller den i planlagd omfattning. Denna lilla skillnad i definitionen innebär att man skall ha möjligheter öppna att väga den tekniska prestationen mot driftsäkerheten och härigenom ernå den maximala effektiviteten på militära vapensystem.

Begreppet driftsäkerhet innefattar både funktionssäkerhet

och underhållsriktighet. Det åligger tillverkaren att utforma den beställda produkten så, att kombinationen funktionssäkerhet och underhållsriktighet ger optimalt resultat. Det åligger köparen (brukaren) att anskaffa erforderliga underhållsresurser — personal, utrustning, utbytesenheter, reservdelar m. m. — så att driftsäkerheten verkligen blir den beräknade. Varken tillverkaren eller köparen förmår i allmänhet ensam överblicka hela det väldiga komplex av frågor som uppkommer vid framtagning av ett vapensystem eller delar därav. Ett intimt samarbete mellan dem är nödvändigt.

Med den skillnad i definitionerna för kvalitet och driftsäkerhet som tidigare gjorts följer, att tillverkaren förutom kvalitetskontroll även skall ha en funktionssäkerhetskontroll. Givetvis skall de båda organisationerna samarbeta sinsemellan liksom även med kundens motsvarande organisationsenheter. Det gemensamma målet är en produkt med inbyggd funktions sannolikhet så utförd att det förväntade resultatet blir en realitet.

I denna studie har frågor inom kvalitetskontrollens område inte berörts — de ligger utom studiens ram — men några synpunkter på driftsäkerhetskontroll skall dock lämnas, synpunkter som har ett visst samband med upprättandet av de dokument, som köparen fordrar att tillverkaren utarbetar.

Samtlig personal inom företagens konstruktions-, tillverknings- och provningsavdelningar måste mer eller mindre djupgående orienteras om driftsäkerhetsfrågornas principiella innebörd. Viss personal, till exempel de elektroniska konstruktörerna, måste ha en grundlig kännedom om beräkning av funktionssäkerheten i kretsar och moduler under det att annan personal, till exempel tillverkningens ingenjörer, kanske endast behöver äga kännedom om vissa principiella förutsättningar för att omsätta funktionssäkerhetsberäkningarna i tillverkningsproceduren.

De mekaniska konstruktörerna av elektroniska enheter skall

kunna beräkna underhållsriktigheten och konstruera materiel-
len ur den synpunkten.

Det är kanske även av värde att lödaren i tillverkningen får
reda på att hans lödpunkter i funktionssäkerhetskalkylen måste
 betraktas som komponenter och således som sådana är be-
 häftade med en viss felintensitet. Kvalitetskontrollens ingen-
 jörer måste ha kunskaper om den statistiska provningstekni-
 ken vid kontroll av funktionssäkerheten. Det är med andra ord
 få personer inom företaget som inte på något sätt kommer i
 kontakt med driftsäkerhetsfrågorna.

Det ligger inom driftsäkerhetskontrollens arbetsområde att
 se till att den personal som deltar i utvecklingen av en produkt
 har sådana kunskaper att driftsäkerhetsfrågorna inte bli efter-
 satta. Som framhållits förut kan driftsäkerhet inte erhållas
 genom en mängd från varandra skilda ansträngningar eller
 aktioner, de måste i stället koordineras och inriktas mot det
 gemensamt uppställda målet. Det är därför nödvändigt att
 varje man vet åtminstone innebörden i begreppet driftsäkerhet.
 Då finns också möjligheten att koordinera krafterna.

Vid utvecklingen av en produkt erfordras vissa grunddoku-
 ment, som bildar basen för all aktivitet. Köparen och säljaren
 skall samarbeta för driftsäkerhetsfrågornas lösande, varför
 köparen måste ge säljaren en mängd upplysningar om för-
 hållanden i samband med produktens användning. Det är
 köparens sak att upprätta specifikationen för den aktuella pro-
 dukten men det är *säljarens* sak att bearbeta och sammanställa
 av köparen erhållna data med produktutvecklingens data så,
 att en klar bild av produktens driftsäkerhet erhålls.

1. Säljaren skall i samband med avgivande av offert ha ut-
 fört en första analys av den förväntade funktionssäkerheten.
 Analysen kan vara utförd enligt någon av de metoder som tidi-
 gare beskrivits. Säljaren skall vara beredd att närmare utveckla
 förutsättningarna för beräkningsmetoderna.

2. Sedan projektet diskuterats både med avseende på den
 tekniska prestationen och driftsäkerheten skall säljaren ut-

föra en grundligare analys av funktionssäkerheten där hänsyn tas till vad som framkommit av ovannämnda överläggningar. Säljaren skall nu vara beredd att garantera en viss funktions-säkerhet på sin offererade produkt.

3. Sedan kontrakt upprättats mellan köpare och säljare skall i samband med konstruktionen av produkten en kontinuerlig bearbetning av funktionssäkerhetsberäkningen utföras. Funktionssäkerhetskravet skall specificeras på varje enhet som har betydelse för produktens funktion. Vid konstruktionen skall visas att detta värde innehålles. Samtliga beräkningar skall vara tillgängliga för köparen.

4. Säljaren skall speciellt beskriva de enheter (underenheter) som konstruerats med ur funktionssäkerhetssynpunkt ej utprovad teknik samt underställa köparen beskrivningarna för överläggningar om vad som bör företas i händelse dessa konstruktioner blir en svag punkt i produkten.

5. Säljaren skall förteckna de komponenter som kommer att användas i produkten samt ange beräknade felintensiteter. Köparen har då möjligheter att granska förteckningen ur bland annat förrådssynpunkt, vilket är en viktig del av underhålls-resursernas uppbyggnad. Säljaren skall vara beredd att motivera angivna felintensiteter.

6. Vid de prov som utförs på enheter eller underenheter skall protokoll upprättas även angående driftsäkerhetsfrågorna. Dessa provningsprotokoll skall vara tillgängliga för köparen.

7. I samband med konstruktion, tillverkning och provning av enheter skall säljaren utarbeta beskrivning över hur underhållsarbetet skall bedrivas för att uppnå hög driftsäkerhet. Beskrivningen skall innehålla felsökningsteknik jämte den utrustning, som är nödvändig härför. Då det åligger säljaren att konstruera materielen för hög driftsäkerhet skall studier utföras exempelvis om det är lämpligare att bygga in provnings-utrustning i produkten eller om den erforderliga utrustningen skall medföras av underhållspersonalen.

Beskrivningen skall också innehålla rekommendationer över

det erforderliga preventiva underhållet jämte utrustning härför. Beräknade arbetstider för preventivt underhåll och för de reparationer, som beräknas förekomma med relativt hög frekvens, skall anges.

För samtliga arbeten skall anges den erforderliga utbildningsnivån hos underhållspersonalen.

8. Säljaren skall utföra beräkningar av erforderliga utbytesenheter och reservdelar.

9. Sedan nämnda uppgifter tagits fram skall säljaren vara beredd att i samarbete med köparen beräkna produktens totala driftsäkerhet.

6

Control of reliability of function when planning, designing and manufacturing electronic material

When developing electronic material for military use the first demand has been high technical performance, and the question of reliability of function has been relegated to second place. When the material has been taken into use and reliability of function has been found to be a weak point modifications and reconstruction were introduced with a view to improving the degree of reliability. This could only be done by engaging and training a large number of technicians who, by making frequent maintenance examinations, raised the reliability of operation of the equipment. This procedure called for major investments in the form of tools and gauges, replacement sets and spare parts.

It is quite obvious that all these measures cost money, but it is by no means certain that they provide the degree of reliability necessary to guarantee that the envisaged defence measures are in fact established. One thing is quite certain, and that is the adoption of such methods does not provide the desired maximum effectivity. This can only be obtained by optimum reliability of function and degree of maintenance. This will also mean that operation costs are kept to a minimum.

The optimum degree of maintenance on a product can be defined as follows.

“Maintainability is a quality of the combined features and characteristics of equipment design which permits or enhances the accomplishment of maintenance by personnel of average skills, under the natural and environmental conditions in which it will appear.”

The products are to be so designed and constructed that stoppages necessary for the execution of essential maintenance are reduced to the absolute minimum. It is of course necessary to ensure that reliability of function is not sacrificed for the sake of optimum degree of maintenance, e.g., that a component is not located so as to be easily accessible but, by virtue of this location, exposed to abnormal stresses. Fig. 41 shows some examples of insufficient attention being paid to the requirement of an optimum degree of maintenance. In the aeroplane in the centre of the illustration a component with a high fault frequency has been so located that four components with a low fault frequency have to be dismantled to reach it. This means

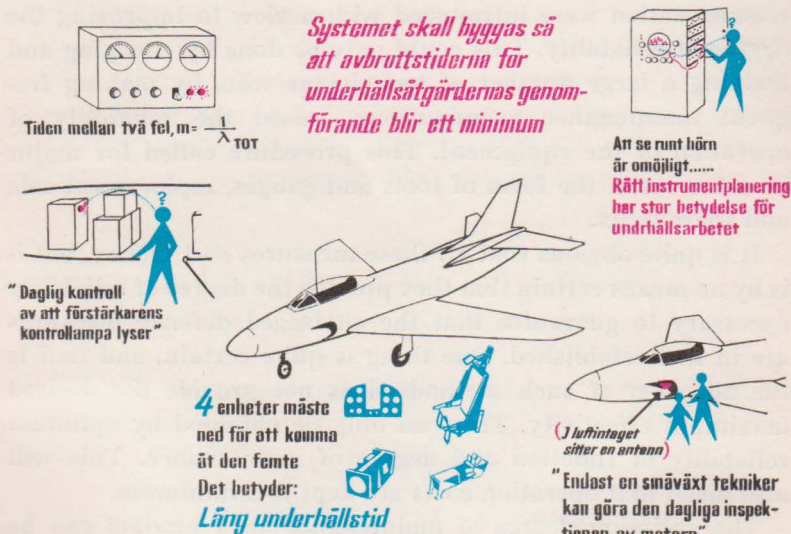


Fig. 30. Attention must always be paid to the maintenance aspect of components.

that the maintenance time is longer than would have been the case if the component had been suitably located. In addition, the unnecessary removal of the four components will result in wear of the material. It is also possible that faults may arise in connection with repeated removal and replacement.

As has been mentioned earlier, maximum effectivity can only be achieved by optimum reliability of function and degree of maintenance.

This means that one must begin to deal with the questions of reliability of operation during the planning stage and re-examine them regularly during the design and manufacturing stages.

The customer, too, is also responsible for this not having been done to any great extent hitherto. The incapacity of the customer clearly to define his requirements as to the operational reliability of the material has made it impossible, for example, to weigh the cost of the inclusion of reliability of function in the material against the cost of the operation of the material at a given availability quotient, i.e., the relation between the operation time and the calendar time. The consequence has been that "operationally reliable designs have not been worthwhile" for a manufacturer whose tenders have been higher than those of competitors and thus been rejected; this despite the fact that the total cost of the material—that is the purchase price plus the operation cost—was lower and, even more important when related to military material, the defence value of the material was higher.

On the other hand, manufacturers of electronic material have not as a rule been particularly anxious to specify the operational reliability of their material, and even less prepared to guarantee a given degree of reliability of function. Instead, reference is made to the fact that "only the very best components are used" or that "our products to-date have been reliable in function." Neither of these claims are of any real value. "The best components", for example, may be highly unreliable

if they are unsuitably located when designing a circuit and the fact that a manufacturer has hitherto produced reliable material—while providing the customer with some degree of reassurance—provides no guarantee that the manufacturer has succeeded in this particular case. Besides, such a claim is all too subjective and indefinite to be usable as a parameter in an effectivity equation.

In general neither the customer nor the manufacturer have dealt systematically with operational reliability when planning and further developing the material. The object of Fig. 42 is to give a general idea of the steps taken to achieve economically optimum reliability of operation.

As regards the tactical planning of the system we must define the degree of operational reliability required. For example, do we want the system to operate 8 hours out of 24 or will operational requirements call for its function 23.9 hours out of 24? We must also at this stage have some idea as to how the material is to be maintained, for example, whether maintenance can be wholly or partially entrusted to an existing maintenance organization or whether a new maintenance organization must be constructed, the approximate initial cost and operations cost of same etc.

This information is re-examined in conjunction with studies of the system. The question of the personnel requirements for maintenance work, training, replacement sets, spare parts, equipment and premises must be continually investigated so that the cost of various alternatives can be extracted later.

In conjunction with economic considerations and the choice of system we must also examine the cost of maintenance for a given degree of reliability of operation. As has been mentioned earlier, the cost of reliability of operation is dependent upon the reliability of function of the material. At this stage we must weigh the cost of higher reliability of function of the material against the lower maintenance cost thus achieved. This is not

a simple process and it is probable that several hypotheses must be tested before the final decision is made.

A natural step is to seek to establish the figure for reliability of function at which the cost of a given requirement or a given period of function will be as small as possible. We can arrive at practical theories as to how to weigh the cost of reliability of function against the cost of operation and maintenance, and all these theories can be shown in graph form as in Fig. 43. The object is to find the minimum value for the total cost curve.

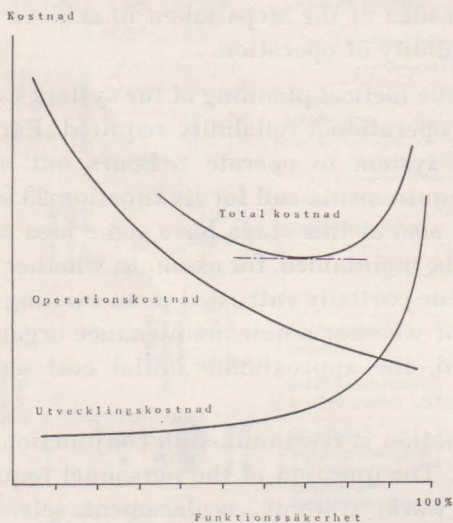


Fig. 32. The problem is to establish the reliability of function factor at which the cost of a given time of function of the material will be as low as possible.

Perhaps the most interesting question in this connection is the relation between degrees of development and the associated costs. It is obvious that the development cost of a product consists of a basic cost which is independent of the degree of development and also a cost which is dependent upon the degree of development. This means that the curve does not

start from origo. In the region of 100 % reliability of function the curve rises sharply and goes towards infinity.

In the case of current electronic military material the reliability of function is generally low and, judging by investigations made to-date, it would seem that it could be greatly increased for moderate development costs. It is probable that the curve is approximately linear at least up to a reliability of function of about 80 %, and that the rise is moderate. Knowing the constantly rising cost of maintenance—wages, administration—it is necessary to seek to calculate the relation between reliability of function and development costs and in this way reduce the total costs to a minimum.

After choosing the system and ordering the material the designer and a maintenance expert must collaborate closely to ensure that the product is as suitable as possible from the point of view of maintenance. It is too much to ask that the designer, who is called upon to produce the best possible technical designs, should also be in a position to master maintenance technique on an equally high level. It is well known in practically every technical field that any technical novelty involves certain weaknesses as regards maintenance. Since military equipment is generally technically new when first delivered and incorporated in a weapon system it has been found that it invariably involves complications from the point of view of maintenance. However, in recent years this factor has been accorded especial attention by manufacturers of military equipment. However, since the manufacture of modern military equipment is being entrusted to an increasing number of manufacturers it is becoming more and more necessary that manufacturers who produce both civil and military equipment enlist staff who understand the technicalities of maintenance.

Finally, the organization of the maintenance procedure must be allied to the progress of design, manufacture and installation of the material. The maintenance plan must be finally decided, the calculation of the replacement system concluded, the acqui-

sition of spare parts planned, the extent of the maintenance equipment calculated and acquired, etc.

The result of all these discussions, calculations and other measures will be—provided that all participants co-operate closely—the best possible value for the money spent.

Organization for operational reliability

As a rule it is in the interests of the purchaser to follow the development of an order from the point of view of such aspects as operational reliability. In addition the purchaser must make a detailed plan of the maintenance programme as manufacture progresses and this demands knowledge of the final design of the product. As has been mentioned earlier, the seller requires a great deal of knowledge concerning the proposed maintenance organization and it is for this reason that both purchaser and seller should agree as to a system of providing continuous information concerning the development of the product. It is now proposed to deal with some of the purchaser's requirements but, in this connection, it must be especially noted that only questions of operational reliability will be dealt with and that it is not intended in any way to suggest a form of organization.

It is important to the purchaser to know to which section of the company he should address inquiries concerning operational reliability and to whom he must make representations when discussions are called for. In that a decision in this field may affect a number of the relevant working groups it will be found conservant of both time and labour to have a central unit to deal with these questions (Fig. 44).

The main organization dealing with questions of operational reliability is responsible for ensuring that operational reliability is realistically described and defined in the necessary documents and that every relevant working unit in the company is

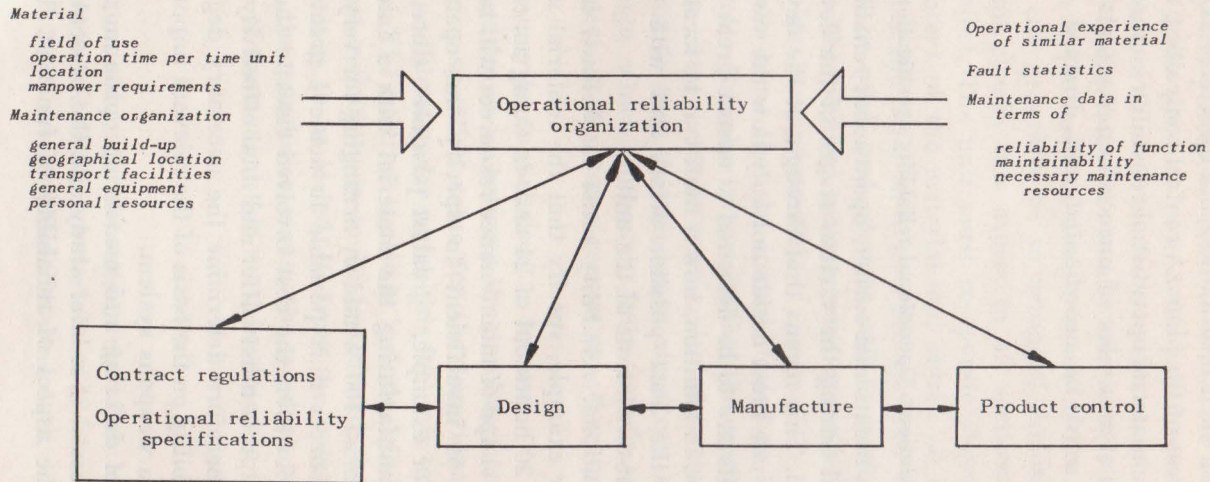


Fig. 33. The main organization in a company dealing with operational responsibility is responsible for ensuring that every unit receives such informational and directives that the task can be carried out in accordance with plans.

supplied with such information and directives as are essential to the progress of the plans. A central controlling unit is necessary because material operational reliability cannot be achieved on the basis of a number of uncoordinated efforts or actions—all efforts must be coordinated and directed towards the common goal.

Contract regulations. Operational reliability specifications

As has been mentioned earlier, operational reliability must be incorporated during the various stages of the development of the material. This means that throughout the development of the product one must decide not only how the various circuits and sub-units are to be designed to ensure great reliability of function but, in addition, how a fault can be located and remedied with the least possible effort and with the shortest possible shut-down time of the unit.

The operational reliability must be defined in a suitable manner, for example, specify that the material must be able to function 20 hours out of 24 and, in doing so, calculate that costs in the shape of maintenance resources will be as small as possible. It is insufficient to specify the operational reliability as, for example, "greatest possible" since, quite naturally, by manufacturing the material with a functional reliability of almost 100 % and by arranging for very large maintenance resources it is possible to achieve great operational reliability. However, the cost involved rises to such an extent that other aspects must suffer and total effectivity is the loser. One must therefore determine the necessary degree of operational reliability on the basis of the relevant importance of the material in a weapons system.

Methods of defining and measuring optimum maintenance will be discussed in a later study and the present object is to deal with the aspect of reliability of function. The contract

drawn up by the purchaser must indicate, for example, the average life of the product m and the seller must guarantee that the finished article will conform to this standard.

The manufacturer must constantly ensure that this average life factor m is the basis of design, manufacture and installation. This can generally be so arranged that a functional reliability unit checks this aspect in all sections associated with the project. The unit must co-operate closely with the purchaser (user) of the material and obtain all relevant information from the latter as to how the material will be used, where it will be used, and when it will be used, etc. Information as to the planned maintenance organization and all that this involves is very essential.

These details must then be communicated to the relevant production units. It is also important that the user's experience of material in current use be communicated to the functional reliability unit so that the necessary steps can be taken to avoid a design which, although fully satisfactory from a technical aspect, is for some reason or other unsuitable in practice.

The whole may be summarised as follows.

The contract drawn up between the purchaser and the seller must contain a specified value for the functional reliability factor. The conditions under which this factor is to apply must also be stated. The contract is also to include details as to how the functional reliability is to be tested and the conditions under which it is to be tested. If, from the point of view of spare parts, the purchaser wants the product to consist of certain types of component this must be stated in the contract.

Design

An investigation of causes of faults in electronic units carried out by the Bell Telephone Laboratories and Electronics Laboratory of the US Navy revealed the following data.

design	40 %
components	30 %
faulty handling of units in operation	20 %
manufacture	10 %

On the basis of this and similar investigations we can draw the following conclusions. For a design to be functionally reliable it is insufficient merely to use good components and to arrange them in a theoretically perfect combination. In addition the design technique must be combined with considerable knowledge as to how the theoretical intentions can be practically incorporated in the manufacturing process. A module cast into compound may, as a result of the opportunities afforded to protect the components against mechanical damage and moisture, appear to be theoretically superior from the functional reliability aspect than an unprotected printed circuit but, whether this is actually the case naturally depends upon how the modules are manufactured.

It is quite common nowadays that units which are not expected to be exposed to mechanical stresses are housed in non-hermetically sealed containers. After a while the unit ceases to function because the water formed in the housing as a result of temperature and pressure changes has attacked some of the components and caused faults. Reports on such faults usually state that "drainage holes have been made in the housing" and that the complete removal of the housing is recommended. Experience has shown that housings which are not hermetically sealed provide the components with no protection whatever against damp and are in fact a source of fault. It is possible that the designer intended the housing to be hermetically sealed but that the manufacturer was unable to put this intention into practice.

It will be realised from the above that the designer and the manufacturer must work in close co-operation, and that such co-operation forms the basis of a reliable final product.

It is, however, the responsibility of the designer to provide

the theoretical requirements for the required average life between faults. In that several designers are involved in designing the product as a whole it is necessary for the functional reliability of each component to be determined. The limits for the functional reliability are to be so arranged that extremely high values apply to certain units and low values to others, the net result being detrimental to the total cost and effectivity.

Fig. 34 shows a typical example. The example is taken from an older type radar unit consisting of 5 component units. The ordinate shows the number of components for the whole unit or component unit, the "complexity", and the abscissa the average life m between faults. Sub-unit 1 consists of 130 components, with $m = 1,600$ hours, while sub-unit 5 consists of 435 components, with $m = 170$ hours. The m value for the station as a whole is 75 hours. If the fault frequency per component in the equipment is calculated a curve can be plotted (naturally there is an error involved in assuming all the components to have a similar fault frequency) and we can compare the complexity with the average time between faults. We note that sub-unit 5 is mainly responsible for the low average life of the station. If, by redesigning sub-unit 5 in some way, it could be

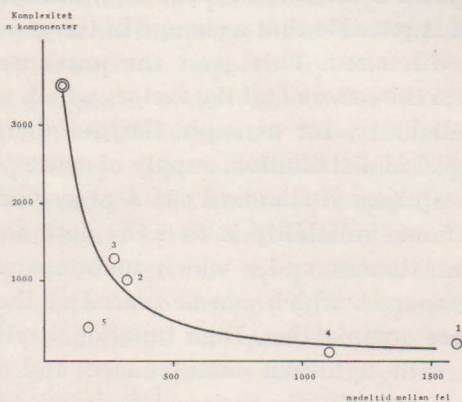


Fig. 34. Comparison between average lives of component units. Sub-unit 5 determines the functional reliability of the whole station.

brought onto the curve, that is $m = 650$ hours, the total life would rise from 75 to 115 hours.

The example clearly indicates the desirability of prescribing the necessary functional reliability of the various sub-units. The example also shows how one sub-unit "controls" the functional reliability of the whole. The same is true of a chain of systems, except that the cost involved in a weapons system is so very much greater.

The sketch of the principal construction of the material, which should be drawn up as soon as the design work is initiated (unless it is drawn up in conjunction with the contract negotiations), is to show the general outline of the layout of the material in units, the combination of mechanical, hydraulic, pneumatic, electric and electronic units etc. It is also to indicate the methods intended for the control of the units, whether component or separate control instruments are to be used and whether local or automatic control is planned etc.

This will give the purchaser an opportunity to use this information as a basis for a primary calculation as to whether the maintenance requirements can be covered by the existing organization, the costs associated with this and the costs which may be anticipated if the maintenance organization is extended or modified. It is possible that a change in the general arrangement may be discussed. This gives the purchaser an opportunity to inform the seller of all the factors which will influence operational reliability, for example the maintenance organization, geographical distribution, supply of spare parts, personnel resources, equipment standard etc. A prerequisite to a high level of operational reliability is that the designer is familiar with the circumstances under which maintenance is carried out and the resources which can be placed at the disposal of the maintenance organization. High functional reliability must be combined with optimum maintenance and maintenance reliability, i.e., correctly dimensioned maintenance resources, so that maximum operational reliability can be achieved. This

means that much effort must be devoted to ensure that handling of the material is as simple as possible: throughout his work the designer must, either alone or together with an expert, decide how faults in the material can be measured.

The functional reliability calculation upon which the average lifetime guaranteed in the contract is based must be constantly revised as the design progresses. The actual number of components, types and manufacture can be listed for every sub-unit, the fault frequencies calculated and the average life of the sub-units between faults estimated. The necessary redundancies are introduced. The purchaser is to have access to this processing of the functional reliability calculation as regards the selection of components, redundancy and the fault frequencies. The choice of components may influence the purchaser's spare parts organization and the fault frequency of the components may be the subject of discussions in which the seller must be prepared to explain any calculated lower fault frequencies than are indicated by experience of existing material.

When the functional reliability calculation is examined the weak points in the design are also revealed. This presents an opportunity to discuss the extent to which these can be improved. It is possible that the purchaser is prepared to pay for a modification which will improve functional reliability and the discussion will present an opportunity. It is also possible that the seller can suggest a design which would offer far greater performance, but which is untried from the point of view of functional reliability. The purchaser would then have an opportunity to examine the advantages and disadvantages of such a solution. As has been mentioned before one of the main reasons for faults in electronic equipment is that there are no theoretical grounds for a design; it is impossible to say in advance how the material will perform. The risks which the purchaser accepts if he approves such designs may be offset if **one** takes steps to counteract a possible non-acceptable **reduction** in the functional reliability with a higher maintenance

factor, or that plans are made for a quick modification of such a design.

Naturally, it is always desirable that only known and tested design principles are employed but, in the race of development of military material this is not always possible.

In this connection mention may be made of the possibility of collecting information about components by rapid ageing. The load on the components is increased and a test programme is carried out. If the relation is known between the artificial conditions and the actual working conditions it is possible to reach certain conclusions concerning the life of the components. Such tests can save much precious time, but rapid ageing cannot replace conventional methods. It can only be used to complement them. In recent years the US Air Force has investigated suitable rapid-ageing programmes but the task appears to be incomplete. Literature on the subject is available, for example B. T. Howard: Accelerated Aging of Semiconductors.

The components which are to be used in the construction should, of course, be of high quality. However, it is not always sufficient to employ solely well-known manufacturers of components. Certain steps must be taken to ensure that a given manufacturer is suitable to supply just the type of component in question. It is then possible to test the components or to get test results from a private or national testing station. No matter which alternative is chosen the purchaser must be prepared to pay what seems to be a lot of money, but this is a mere fraction of the cost that would be involved if the construction were fitted with unsuitable components.

Manufacture

Every company employs some form of control of its manufactures. Neither this control nor the manufacturing process

can make a product more reliable in function than the designer intended it to be. The main function of inspection is to ensure that the intended reliability does not deteriorate during manufacture. It is not the purpose of this study to examine the general problem of inspection; suffice to say that the inspection element is responsible for seeing that the reliability of function planned by the designer is maintained and that the product is so manufactured in the light of future maintenance that operational reliability can be maintained on a high level. It may also be pointed out that close co-operation between design and manufacture functions can enable any faults on the design side to be corrected during manufacture. This requires, however, that the manufacturing side must be sufficiently well informed of the required functional reliability of the product.

The recommendations made under the heading "Design" concerning discussions between purchaser and seller are largely applicable to the manufacturing function, except that any changes will be more difficult—and costly—to introduce once the product has reached the manufacturing stage. If, however, such mistakes have been made by the purchaser or seller that a change is unavoidable a careful investigation must be made as to where and when the work is to be carried out. In the case where changes are due from the point of view of technical performance it is generally advantageous to make them in conjunction with manufacture or in immediate connection with manufacture, even if this delays delivery. On the other hand, if the changes are to be made because the maintenance aspect is unsatisfactory it is possible that the work should be carried out at a suitable time after delivery. This decision rests with the purchaser, but it is up to the seller to co-operate in making the necessary investigation.

Product control

In many cases it is advisable to manufacture prototypes of units or sub-units for laboratory purposes when it is required to

make measurements of various types of load on components. This is especially the case with designs about which little is known as regards reliability of function. Such laboratory measurements may also be of interest to the customer and consequently results should be filed.

As soon as a unit or sub-unit under production has been manufactured it is to be tested in such a way as to prove that the functional reliability factor has been satisfied. As has been mentioned earlier functional reliability is dependent not only upon the design but also upon the way the product has been manufactured. It is also necessary to test it under the conditions that will prevail during its "useful life" (Fig. 10). Testing can also be combined with the necessary running-in time during which running-in faults are discovered and remedied.

The test report is to show how and where faults occurred so that a complete analysis can be carried out. If this shows that the fault frequency of the unit does not agree with the estimated value then investigations must be carried out to see whether this is due to the choice of components, the design of the circuits or to the manufacture. The test reports are to be made available to the customer, as are also the analyses of established faults.

Product control also includes the final examination of the suitability of the units as regards maintenance. The construction has been carried out during the design and construction stages and now practical tests can be carried out. The time taken to localise and remedy faults can be determined and also the most suitable methods. This information is to be included in the maintenance specifications compiled by the manufacturer. Similarly the methods adopted for preventive maintenance can be verified and finally determined.

The final inspection of the project as a whole is to be carried out in accordance with the provisions laid down in the contract. Before the final inspection is commenced the product is to be

sufficiently well run-in to ensure that running-in faults do not occur during the inspection period. Representatives of the purchaser are to take part in the final inspection.

The inspection report is to contain the following information.

1. total test time
2. details of all faults and the time of occurrence
3. cause of fault
4. analysis of fault
5. steps taken to remedy fault
6. duration of stoppage
 - a) trouble-shooting time
 - b) time taken to replace unit
 - c) time taken to repair unit
7. suggested changes

If the results of the test do not agree completely with the provisions of the contract the acceptance or rejection of the product is to be decided by the purchaser or his representative.

Necessary documentation

The question may be asked as to the difference between operational reliability and quality. Hitherto quality has been taken to mean the technical performance of a product and its capacity to function over a long period of time, perhaps many tens of years. In this study the expression operational reliability means the probability of a product functioning with a specified technical performance over a given period during which it is given a planned amount of maintenance. This little difference in definition means that we measure the technical performance against the operational reliability and hereby achieve a military weapons system of maximum efficacy.

The term operational reliability covers both reliability of

function and an optimum degree of maintenance. It is the duty of the manufacturer to produce the article in such a way that reliability of function and optimum maintenance are combined to bring about optimum results. It is the duty of the purchaser (user) to provide the necessary maintenance resources—personnel, equipment, replacements, spare parts etc.—so that the designed degree of operational reliability is achieved. As a rule neither the manufacturer nor the purchaser alone can cover the complex of questions arising when instituting a weapons system or parts thereof. The two must work in close co-operation.

On the basis of the difference between quality and operational reliability as mentioned above it follows that the manufacturer is responsible for not only quality control but also functional reliability control. Naturally these two aspects must be on a basis of co-operation with the purchaser's corresponding organization. The common aim is a product with a basic function probability so arranged that the expected result is achieved.

This study does not include questions pertaining to quality control—this aspect being beyond the scope of the study—but it is nevertheless proposed to comment on operational reliability control—comments which are to some extent related to the compilation of the documents which the purchaser requires the manufacturer to draw up.

All members of the design, manufacturing and test departments of the company must be schooled to a lesser or greater degree in the implications of operational reliability. Certain members, for example the designers of electronic material, must have a sound knowledge of the calculation of the functional reliability of circuits and modules while other staff, for example production engineers, perhaps only require knowledge of certain broad aspects in order to be able to incorporate the functional reliability calculations in the manufacturing process.

The mechanical designers of electronic units must be able to calculate the optimum degree of maintenance and design the material with this end in view.

It is perhaps advantageous that the solderer is made to realise that his soldered joints are regarded as components for the purposes of the functional reliability calculation and as such have a certain fault frequency. The quality control engineers must have knowledge of the statistical test technique employed when testing functional reliability. In other words, there will be very few people who do not come into contact with questions relating to operational reliability.

It is the duty of the operational reliability control organization to ensure that personnel engaged in the development of the product have such knowledge of operational reliability questions that this aspect is not neglected. As has been stated earlier, operational reliability cannot be achieved via a number of separated efforts or actions—all efforts and actions must be coordinated to produce the ultimate objective. It is therefore essential that everyone understands the implications of the term operational reliability. It will then be possible to coordinate resources.

When a product is being developed it is necessary to have certain basic documents as a foundation for all activity. The purchaser and the seller must co-operate in solving the problems of operational reliability and the purchaser must give the seller all possible information concerning the use to which the product will be put. It is the task of the purchaser to draw up the specification for the actual product, but it is the duty of the seller to process and compile the data obtained from the purchaser with the product development data so that a clear picture is obtained of the operational reliability of the product.

1. In connection with the submission of a tender the seller **must** have carried out a first analysis of the expected functional **reliability**. The analysis can be based on one of the methods

described earlier. The seller must be prepared to develop the prerequisites for the methods of calculation.

2. After the project has been discussed from the points of view of technical performance and operational reliability the seller must work out a more detailed analysis of the functional reliability, due consideration being paid to points arising from the above-mentioned discussions. The seller must now be prepared to guarantee a certain degree of functional reliability in respect of the offered product.

3. After the contract has been drawn up between the purchaser and the seller the functional reliability calculation must be constantly revised as the design progresses. The functional reliability requirement must be specified in respect of every unit of importance to the function of the product. The design is to show that this value has been maintained. All calculations are to be made available to the purchaser.

4. The seller is to draw up a special description of all units (or sub-units) which have been designed in accordance with techniques which have not been tested from the point of view of functional reliability and advise the purchaser so that discussions can be arranged in the event of these designs proving to be weak points in the product.

5. The seller is to designate the components to be incorporated in the product and indicate the estimated fault frequency. The purchaser will then be able to examine the list from the point of view of storage requirements—an important feature as regards maintenance arrangements. The seller must be prepared to justify indicated fault frequencies.

6. Reports dealing with operational reliability factors are to be compiled in respect of tests carried out on units or sub-units. These reports are to be made available to the purchaser.

7. In conjunction with the design, manufacture and testing of units the seller is to provide information as to how maintenance must be carried out to ensure a high degree of operational reliability. The description is to contain details of fault-

finding technique and also the equipment necessary to do this. Since it is the responsibility of the seller to design the material for a high degree of operational reliability studies must be made to establish, for example, whether it is better to incorporate the test equipment in the product or whether the necessary equipment should be carried by the maintenance personnel.

The description is also to contain recommendations concerning preventive maintenance and the equipment needed. Estimated working time for preventive maintenance and for such repairs as are expected to occur fairly frequently is to be indicated.

In the case of all maintenance work information is to be given regarding the standard of training of maintenance staff.

8. The seller is to make calculations of the necessary replacement units and spare parts.

9. After the above information has been extracted the seller must be prepared to co-operate with the purchaser in determining the total operational reliability of the product.

LITTERATURFÖRTECKNING

- AGREE Reliability of military electronic equipment 1957
American Society for Quality Control: Reliability training text 1960
Bazovsky, Igor: Reliability: theory and practice 1962
Bureau of Naval Weapons: Aviation personnel planning data book
Bo Casten Carlberg: Företagsledning och projektarbete 1962
D. J. Davis: An analysis of some failure data
Department of the Air Force: Radar circuit analysis 1959
G. W. A. Dummer: Electronic equipment reliability 1960
General Electric: Transistor Manual
A. Hald: Statistical Theory with engineering Applications 1957
B. T. Howard: Accelerated aging of semiconductors 1961
Hughes Aircraft Company: Mathematical and engineering aspects of satellite redundancy 1960
International Electronic Research Corporation: Heat-Dissipating Electron Tube Shields 1959
Kungl. Armétygförvaltningen: Konstruktionspraxis för elektronisk materiel 1961
E. Pieruschka: Lifetime distribution models 1959
Proceedings 1956: Electronic components symposium
RADC: Reliability notebook 1960
Raytheon Technical data service: Semiconductor devices 1962
Raytheon Company: Reliability assurance program manual. Diodes and transistors 1960
RCA Service Company: Recommended methods of reliability requirements estimation, design cycle control, and numerical assessment for ground electronic equipment 1959
RCA Service Company: Accelerated test techniques 1960
RCA: Maintainability measurement and prediction methods for air force ground electronic equipment 1960
RCA: Reliability stress analysis for electronic equipment 1960
Dorothy Rodgers (General Electric): Decision making 1960