

8. ОПТИМИЗАЦИЯ НА НАДЕЖДНОСТТА НА МЕИ

8.1. Оптимизация на продължителността на технологичното трениране

За всички МЕИ съществува период на „ранни откази“, които се характеризират с повишена интензивност на отказите. Това е свързано с проявата на скритите дефекти в началния период на експлоатация, непосредствено след изготвянето на МЕИ. Производителят има интерес да получи максимална безотказност за своите изделия в процеса на експлоатация и следователно да се разкрият всички скрити дефекти на изделието преди предаването му на потребителя. Едновременно с това, за разкриване на скритите дефекти в условията на недостатъчно развити методи за неразрушаващ контрол, производителят трябва да провежда технологично трениране, което е свързано с материални загуби, които са пропорционални на продължителността на тренирането и на отказите в МЕИ от тренирането.

В тези условия се дефинира правата и обратната задача за оптимизацията на продължителността на тренирането по икономически критерий.

Правова задача — да се определи оптималната продължителност на технологичното трениране, която трябва да осигурява зададена гарантирана отработка на МЕИ при минимални сумарни загуби от трениране и ремонт в гаранционния срок на електронната апаратура, в която се влагат тези изделия.

Обратна задача — да се определи оптималната продължителност на технологичното трениране, която трябва да осигурява максимална гарантирана отработка при минимални сумарни загуби от тренирането и ремонт в гаранционния срок на ЕА, в която се експлоатират МЕИ.

В редица случаи може да се търси оптимизация по вероятността за безотказна работа.

Средните сумарни загуби при провеждане на тренирането и на гарантираните ремонти се определят от съотношението:

$$C = C_{TT} + C_{GR}, \quad (8.1)$$

където C_{TT} и C_{GR} са съответно средните загуби на производителя от провеждането на технологичното трениране на микроелектронните изделия, които се вграждат в апаратурата и от гарантиран ремонт на електронната апаратура.

От своя страна

$$C_{TT} = C_{TT}^I t_{TT} \quad (8.2)$$

$$\text{и } C_{ГР} = C_{ГР}^I m_{ГР}, \quad (8.3)$$

където C_{TT}^I е стойността на материалните загуби, свързани с провеждането на тренирането на МЕИ за единица време; t_{TT} — продължителност на тренирането; $C_{ГР}^I$ — средни загуби за провеждане на гарантиран ремонт на ЕА поради едно отказало МЕИ; $m_{ГР}$ — среден брой отказали МЕИ през време на гаранционния срок.

Очевидно

$$m_{ГР} = \int_{t_{TT}}^{t_{TT}+t_{Г}} \lambda(t) dt, \quad (8.4)$$

където $\lambda(t)$ — интензивност на отказите на изделието; $t_{Г}$ — гарантирана отработка на изделието.

Много често за началния интервал от експлоатацията на МЕИ зависимостта на интензивността на отказите от отработката до отказ може да се представи с израза:

$$\lambda(t) = (\lambda_0 - \lambda_C) e^{-at} + \lambda_C, \quad (8.5)$$

където λ_0 е стойност при $t=0$, λ_C — стойността, която се установява след завършване на периода на ранните отказу; a — коефициент, който характеризира скоростта на протичане на отработката.

Относителната точност на интензивността на отказите към момента на завършване на периода на отработка за откриване на скритите дефекти в МЕИ се определя от израза:

$$\delta = \frac{\lambda(t_u) - \lambda_C}{\lambda_C}. \quad (8.6)$$

Като се замести (8.6) в (8.5) и се извършат елементарни преобразувания се получава:

$$at_u = \ln(\eta - 1) - \ln \delta, \quad (8.7)$$

където $\eta = \lambda_0 / \lambda_C$.

Табл. 8.1. Резултати от изчисленията по уравнение (8.7), даващи връзката между относителния поток на отказите η и продължителността на технологичното трениране t_u .

η	1,5	2	3	5	10	20	50
$a t_u$	2,3	3	3,7	4,4	5,2	5,9	6,9

В табл. 8.1. са представени резултатите от изчисленията по уравнение (8.7) за $\delta = 0,05$ и $1,5 \leq \eta \leq 50$.

Като се отчита зависимостта (8.4) и (8.5) може да се запише:

$m_{ГР} = Ae^{-at_{ГТ}} + \lambda_C t_{Г}$, (8.8) като обикновено на практика $t_{Г} > t_u$ и тогава:

$$A = \frac{\lambda_0 - \lambda_C}{\lambda_C} (1 - e^{-at_{Г}}) \approx \frac{\lambda_0 - \lambda_C}{a}. \quad (8.9)$$

Като се реши уравнение (8.7) спрямо t_u и се вземе под внимание (8.9), се получава съотношение определящо продължителността на областта на ранните откази като функция на λ_0 , λ_C , a и δ :

$$t_u = \frac{\ln(\eta - 1) - \ln \delta}{a} = \frac{\ln(aA/\lambda_C) - \ln \delta}{a}. \quad (8.10)$$

Параметърът A е числено равен на броя на скритите дефекти, водещи до повишена интензивност на отказите на МЕИ през време на технологичното трениране:

$$A \approx m(t_u) - \lambda_C t_u. \quad (8.11)$$

Като се вземат пред вид изрази (8.2), (8.3) и (8.8) уравнението (8.1) приема вида:

$$C = C_{ГР} \lambda_C t_{Г} + C'_{ГТ} t_{ГТ} + AC_{ГР} e^{-at_{ГТ}}. \quad (8.12)$$

Като се реши уравнение (8.12) спрямо $t_{Г}$, се получава израз за гарантираната отработка на МЕИ като функция на технико-икономическите показатели:

$$t_u = \frac{1}{C_{ГР} \lambda_C} [C_{гон} - C_{ГР} A - AC_{ГР} e^{-at_{ГТ}} - C'_{ГТ} t_{ГТ}]. \quad (8.13)$$

За решаване на правата задача за оптимизиране на продължителността на тренирането по отношение на минимални загуби на производителя трябва да се изследва екстремума на уравнение (8.13). Така се получава:

$$t_{ГТopt} = - \frac{\ln\left(\frac{C'_{ГТ}}{aAC_{ГР}}\right)}{a}. \quad (8.14)$$

Ако (8.14) се замести в (8.12) се получава израз, определящ минималните загуби на производителя при провеждане на трениране и гарантиран ремонт на ЕА:

$$C_{min} = C_{ГР} \lambda_C t_{Г} + C'_{ГТ} \left(\frac{1}{a} + t_{ГТopt} \right). \quad (8.15)$$

8.2. Основни принципи при осигуряване на надеждна работа на МЕИ в електронната апаратура

Надеждността като сложно свойство на МЕИ е едно от най-важните съставки на качеството. Затова трябва да се познава съотношението между тези две характеристики на МЕИ.

Качеството на всяко изделие е съвкупност от свойства, които се формират от необходимостта за съответното изделие. Така съставките на качеството се формират като се отчитат изискванията на областите на приложение, за които дадено изделие е предназначено. При промяна на условията на приложение се изменят съответно и изискванията към качеството на МЕИ. За да се прецени качеството на МЕИ е достатъчно да се прегледат техническата документация, да се провери съответствието на електрическите параметри със съвременните изисквания, съответствието на конструктивните характеристики с общоприетите правила и конкурентноспособността на икономическите показатели.

Положението се усложнява, когато трябва да се оценяват надеждностните съставки на качеството. Те се потвърждават както с изпитвания в процеса на производство, така и с продължителна експлоатация в различни електронни апаратури. Във връзка с това цялата система за управление на качеството с всичките и организационни и технологични мерки е насочена към осигуряване и реализация на надеждностните съставки на качеството. За осигуряването пък на рационално използване на надеждностните характеристики на МЕИ в ЕА са необходими специални организационни и технически мерки, които се обединяват в системата за управление на надеждността. Така системата за управление на надеждността е с по-висок ранг от системата за управление на качеството на МЕИ, тъй като има по-широка област на разпространение.

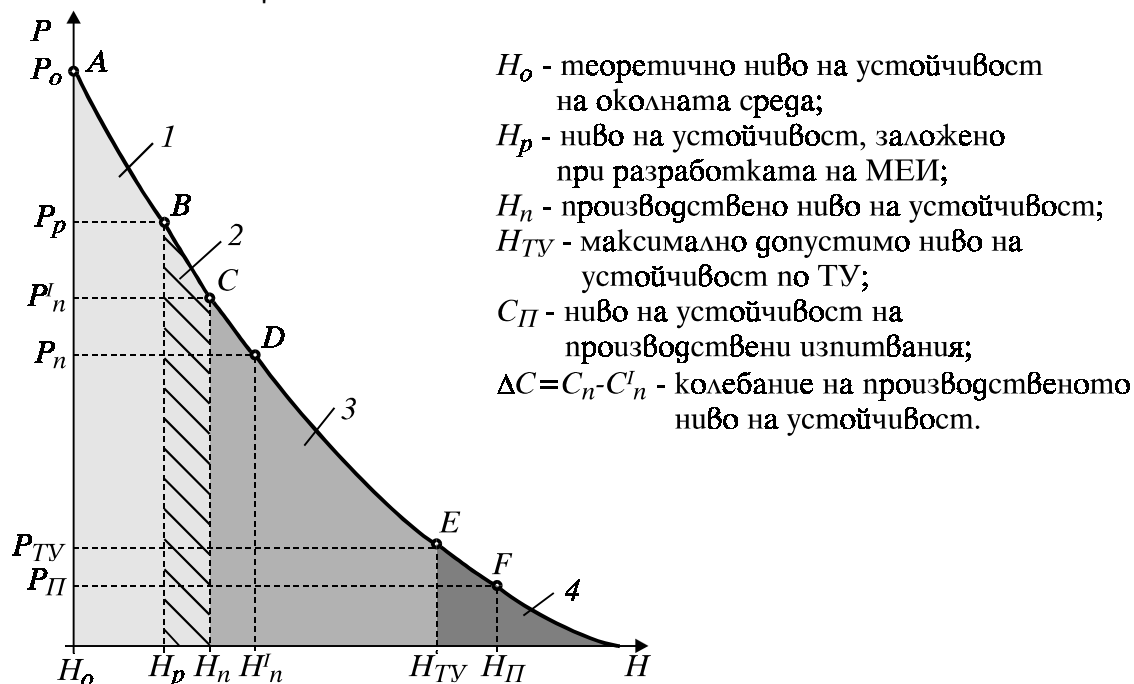
При преминаване през различните етапи от времето на живот, МЕИ е подложено на все по-голям брой въздействащи фактори и на увеличаване на степента им на влияние. Така се ускоряват физико-химическите процеси в МЕИ, бързо се изразходват ресурсите им възможности, в резултат на което се влошават надеждностните характеристики.

Надеждността на МЕИ P зависи от устойчивостта на въздействие на условията на околната среда H :

$$P = f(H), \quad (8.16)$$

където H е комплексен параметър, зависещ от съвкупността на всичките фактори (X_1, \dots, X_n) , въздействащи върху МЕИ в процеса на времето му на живот. Зависимост (8.16) е показана на фиг. 8.1. Формата на тази графика е монотонна и може да се прекъсне при настъпване на

масови внезапни откази, когато се превиши максимално допустимия режим на експлоатация на МЕИ.



Фиг. 8.1. Зависимост на надеждността P на МЕИ от устойчивостта H на условията на околната среда.

Характерните точки на графиката съответстват на различните състояния на зависимостта (8.16). При това всяко състояние се характеризира със съответен комплекс от фактори на околната среда, който определя устойчивостта и съответно нивото на надеждност в дадената точка.

Състояние A (P_0, H_0) съответства на началното, теоретически възможното ниво на надеждност на МЕИ. Това е най-високото ниво, което може да се получи при реализация на идеалния физически модел на изделието. Това означава получаване на бездефектно МЕИ и използване на съвършени изходни материали.

Състоянието B (P_p, H_p) е с по-ниска надеждност, тъй като технологичният процес има определени колебания, а изходните материали не са съвършени. Така при разработката се достига надеждност P_p . Разликата $\Delta P_1 = P_0 - P_p$ от една страна характеризира качеството на процеса на проектиране, а от друга — резерва на производителя.

Състоянието C (P_n, H_n) характеризира условията на производство. Ако не се използват всички потенциални възможности, заложен в МЕИ, нивото на надеждността значително се намалява. Разликата $\Delta P_2 = P_p - P_n$ дава степента на усвояване на технологичния процес и

представлява производствения резерв за повишаване на надеждността при прилагане на автоматизирано оборудване и висококачествени материали.

Колебанието на производствените условия се отразява на надеждността, което е означено като състояние $D (P_n, H_n)$. Разработката на специални мерки и внедряването им променя условията H_n и ликвидира разликата в нивата на надеждността.

Системата за управление на качеството в производството на МЕИ има за цел да не допуска колебания на технологичния процес и така да осигури стабилно ниво на надеждността P_n .

Състоянието $E(P_{ТУ}, H_{ТУ})$ се отнася за минималното ниво на надеждност, което може да се достигне при максимално допустимите условия на функциониране на МЕИ. Извън пределите на това ниво не се разрешава и не се гарантира експлоатацията на МЕИ.

Състоянието $F(P_{П}, H_{П})$ характеризира минималното ниво на надеждност, за което се контролира производството. Планът за контрол се избира така, че при икономически целесъобразни загуби от изпитване, съответствието на надеждността на МЕИ с ниво $P_{П}$ да бъде максимално. Това ниво е условно и характеризира само икономическата страна на плана на контрола и стабилността на производствения процес. То не бива да се бърка с производствената надеждност. В зависимост от критериите на надеждността и устойчивостта на околната среда $P_{П}$ може да се намира както в областта на гарантирана надеждност, така и извън пределите и.

Разглежданите състояния ограничават няколко характерни области на графиката от фиг. 8.1.

В област 1 усилията се съсредоточават към максимално доближаване на надеждността към теоретичното ниво P_0 . Стремeжът е и към изместване нагоре на цялата графика.

Област 2 се характеризира с усилия към намаляване на разликата между състояния B и C . Това се постига с детайлно изследване на изходните материали, усъвършенстване на контрола, на технологичните процеси и максимално изключване на човешкия фактор от процеса.

Област 3 е областта на гарантираната надеждност.

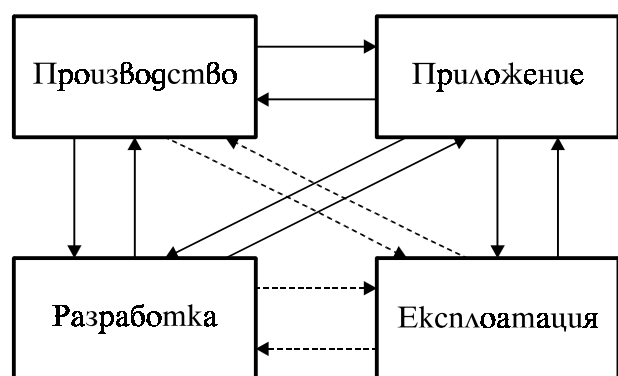
В област 4, МЕИ се подлагат на повишени натоварвания, вследствие на което тяхната надеждност е под минималното ниво.

Експлоатационната надеждност на МЕИ, която се изразява с количествените показатели на надеждността на МЕИ в състава на ЕА има две съставки. Първата отразява нивото на надеждност на МЕИ,

достигнато в производството. Втората — нивото на проектираната ЕА и условията и на експлоатация. Основните задачи на системите за управление на качеството и на надеждността в условията на експлоатация имат за цел да оценят двете съставки и да предприемат мерки, които да изключат или сведат до минимум втората от тях.

Системата за управление на качеството с всичките организационни и технологични мерки е насочена към осигуряване и реализация на надеждностните съставки на качеството. За осигуряването пък на рационално използване на надеждностните характеристики на МЕИ в ЕА са необходими специални организационни и технически мерки, които се обединяват в системата за управление на надеждността. Така последната е с по-висок ранг от системата за управление на качеството на МЕИ, тъй като има по-широка област на разпространение.

Задача на системата за управление на надеждността на МЕИ е да се осигури ниво на експлоатационна надеждност в границите на областта на гарантирана надеждност, т.е. по-близо до R_{II} . Това се постига с облекчени топлинни и електрически режими.



Фиг. 8.2. Структурна схема на системата за осигуряване на надеждна работа на МЕИ в ЕА.

Тези положения са основата за построяване на система за осигуряване на надеждна работа на МЕИ в ЕА [33]. Структурната схема на такава система е показана на фиг. 8.2. и включва елементите *разработка*, *производство* и *експлоатация*, които отразяват основните етапи от времето на живот на МЕИ. Елементът *приложение* се включва в системата за реализиране на принципите за непрекъснати действия

свързани с осигуряване на надеждността и за отговорност на производителя за нивото на надеждност през всичките етапи от времето на живот на МЕИ. Този елемент има функции на регулиране на взаимодействието на другите съставки.

8.3. Икономически аспекти на изпитванията на надеждност

От всички изпитвания на МЕИ най-голям е обема (до 70 %) на приемопредавателните изпитвания, след това се нареждат изпитванията

на надеждност, периодичните и типовите изпитвания.

Ориентировъчно разпределение на загубите по видове изпитвания на МЕИ е показано в табл. 8.2. За МЕИ голяма част от загубите се дължат на контролно-измервателните операции, поради сложността на технологичния процес и високата прецизност на контрола. Например за ГИС контролно-измервателните операции съставляват повече от 30 % от всички технологични операции, а при производството на микромодули — половината. Затова повишаване на икономическата ефективност, производителност и точност на изпитванията се постига единствено с автоматизация на контрола.

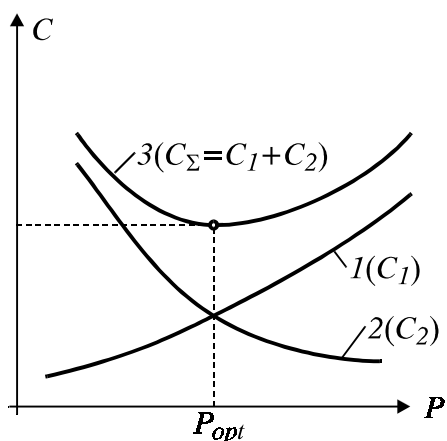
Табл. 8.2. Разпределение на загубите по различни видове изпитвания на МЕИ.

Вид на изпитването на МЕИ	% стойност на изпитването
Устойчивост на вибрации	5,0
Ударна якост	0,5
Случайна вибрация	5,7
Въздействие на единични удари	1,7
Въздействия на линейни ускорения	0,7
Студоустойчивост	0,7
Топлоустойчивост	0,7
Термоцикли	3,6
Влагоустойчивост	3,2
Въздействие на повишено налягане	0,8
Въздействие на понижено налягане	0,9
Въздействие на слънчева радиация	2,7
Термоудар	4,5
Устойчивост на гъби и плесени	1,7
Надеждност	7,5
Дълготрайност	49,0

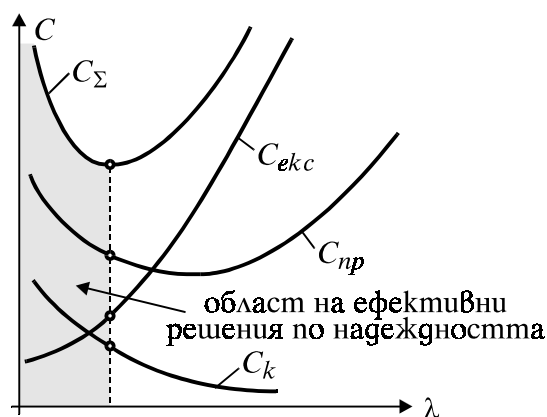
Съществува функционална връзка между необходимите показатели на надеждността, производствените разходи и изпълнението на плана за контрол. Характерните зависимости на разходите за контрол на МЕИ и загубите за сметка на брака от вероятността за безотказна работа са изобразени на фиг. 8.3.

При $P = 0$ графика 1 не попада в нулевата точка на координатната система.

Очевидно това ниво на надеждността изисква известни разходи при изготвянето, амортизация на оборудването и др.



Фиг. 8.3. Зависимости на разходите за контрол на качеството и надеждността C_2 и на загубите от брака C_1 от вероятността за безотказна работа P .



Фиг. 8.4. Зависимости на разходите при експлоатация $C_{екс}$ производство $C_{пр}$ и конструиране C_k на МЕИ от интензивността на отказите λ .

От графиката се забелязва, че началното повишаване на надеждността и качеството на МЕИ се осигурява със сравнително неголямо увеличаване на загубите, а при $P \rightarrow 1$ загубите нарастват към безкрайност. Ефектът от работата по повишаване на надеждността е в тясна връзка с качеството на ЕА, в която се използват тези изделия.

Загубите по време на експлоатация на МЕИ (графика 2) при повишаване на нивото на надеждността им намаляват. Следователно, икономически оптималното ниво на надеждност ще съответства на минимална сума на загубите (графика 3) в сферата на производството и експлоатацията на МЕИ. Основният икономически критерий за избор на оптимално ниво на надеждността има вида:

$$C_{\Sigma} = C_{пр} + C_{екс} + C_k + EC_{кан} = \min, \quad (8.17)$$

където $C_{пр}$, $C_{екс}$, C_k и $C_{кан}$ са съответно текущи загуби за производство, експлоатация, конструиране и капитални загуби; E — коефициент на икономическа ефективност, приеман за 0,15.

Зависимостта на загубите при повишаване на надеждността на МЕИ от интензивността на отказите е дадена на фиг. 8.4.

Както се вижда от фиг. 8.3 и фиг. 8.4 проблемът за повишаване на надеждността на МЕИ при увеличаване на количествените показатели на надеждността прераства в икономически проблем. За случаите, когато надеждността има решаващо значение икономическите съображения отстъпват на втори план.

8.4. Избор на рационално съотношение между точността и достоверността на оценката на показателите за надеждност

Основни характеристики на статистическата оценка на надеждността са точността и достоверността на извадковата оценка на генералната характеристика. Точността на оценка се характеризира с ширината на доверителния интервал, който с доверителна вероятност (числено равна на достоверността на оценката) покрива генералната характеристика

$$\gamma = P\{\theta_1 \leq M[X] \leq \theta_2\}, \quad (8.18)$$

където γ е достоверността на извадковата оценка на генералната характеристика $M[X]$; (θ_1, θ_2) — доверителен интервал, характеризиращ точността на извадковата оценка.

Съществен интерес представлява изборът на реалното съотношение между точността и достоверността на извадковата оценка на детерминираната генерална характеристика. Едновременното увеличаване на точността и достоверността е невъзможна, ето защо е необходимо изборът да се оптимизира на базата на някакъв критерий. Такъв може да бъде например критерий, който минимизира сумата на загубите от неточността на статистическата оценка и на проведените изпитвания. Но на практика е почти невъзможно да се определи първата съставляваща, поради което и не съществуват методи, базирани се на икономически критерии.

За случая, когато е известно генералното средно квадратично отклонение σ :

$$\gamma = F(\theta_2)_0 - F(\theta_1) \quad (8.19)$$

или

$$\gamma = \frac{[\Phi(\theta_2) - \Phi(\theta_1)]}{2}, \quad (8.20)$$

където

$$\theta_2 = (X_2 - M[X])\sqrt{n}/\sigma, \quad (8.21)$$

$$\theta_1 = (M[X] - X_1)\sqrt{n}/\sigma. \quad (8.22)$$

$F(\alpha)$ е нормирана и центрирана функция на нормалното разпределение; $\Phi(z)$ е функция на Лаплас; n — брой измервания на случайната величина.

За симетричен доверителен интервал, когато

$$X_2 - M[X] = M[X] - X_1 = \varepsilon \quad (8.23)$$

съотношенията (8.19) и (8.20) добиват вида

$$\gamma = 2F(\alpha)_0 - 1 \quad (8.24)$$

$$\gamma = \Phi(\alpha), \quad (8.25)$$

където

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\sigma} \sqrt{n}. \quad (8.26)$$

Ако генералното средно квадратично отклонение е неизвестно:

$$\gamma = \int_{-y}^y \varphi(x) dx, \quad (8.27)$$

където $\varphi(x)$ е плътност на разпределението на Стюгънт, която се определя от съотношението [28]

$$\varphi(x) = \frac{\Gamma[(n+1)/2]}{\sqrt{n\pi}\Gamma(n/2)} \left(1 + \frac{x^2}{n}\right)^{-(n+1)/2}, \quad (8.28)$$

при това

$$y = \frac{\varepsilon}{s} \sqrt{n}, \quad (8.29)$$

където s е извадковото средно квадратично отклонение x на СВ.

В качеството на критерий за оптимизация на показателите на статистическата оценка (ε — точност и γ — достоверност) се избира:

$$\Delta\gamma(r_{opt}, n) = \max, \quad (8.30) \text{ където}$$

$$\Delta\gamma(r, n) = \gamma(r, n) - \gamma(r, 1), \quad (8.31)$$

както когато σ е известно $r = \varepsilon/\sigma$, а когато σ е неизвестно:

$$r = \varepsilon/s. \quad (8.32)$$

Физическият смисъл на формули (8.30) и (8.31) се изразява със следното: при зададен брой измервания n СВ x за оптималния нормиран показател на точността $r = \varepsilon/\sigma$ или $r = \varepsilon/s$ се взема такава стойност r_{opt} при която се осигурява максимално повишаване на показателя за достоверност на оценката γ в сравнение със случаите, когато броят на измерванията е $n = 1$.

При отчитане на изрази (8.24), (8.26) и (8.32) съотношението (8.31) се представя във вида:

$$\Delta\gamma(r, n) = \frac{1}{\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{r\sqrt{n}} e^{-x^2/2} dx - \int_{-\infty}^r e^{-x^2/2} dx \right\}. \quad (8.33)$$

За изследване на израз (8.33) за екстремум спрямо r се търси първата производна, която се приравнява на нула. Така се получава:

$$r_{opt} = \sqrt{\frac{2 \ln \sqrt{n}}{n-1}}. \quad (8.34)$$

При отчитане на зависимостите (8.24 ÷ 8.26), (8.32) и (8.34):

$$\gamma_{opt} = 2F_0\left(\sqrt{\frac{2n \ln \sqrt{n}}{n-1}}\right) - 1 \quad (8.35)$$

или

$$\gamma_{opt} = \Phi\left(\sqrt{\frac{2n \ln \sqrt{n}}{n-1}}\right). \quad (8.36)$$

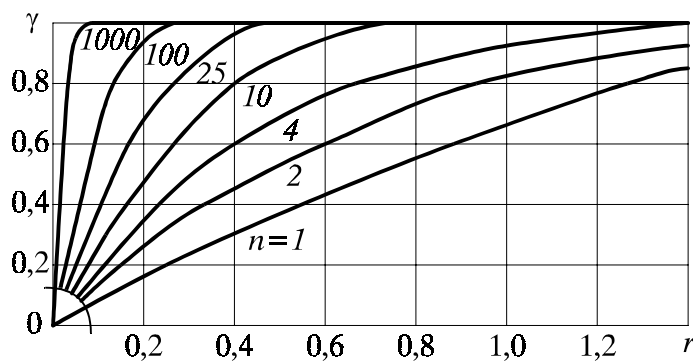
С помощта на израз (8.34) се вижда, че:

$$\lim_{x \rightarrow 1} r_{opt} = 1, \quad (8.37)$$

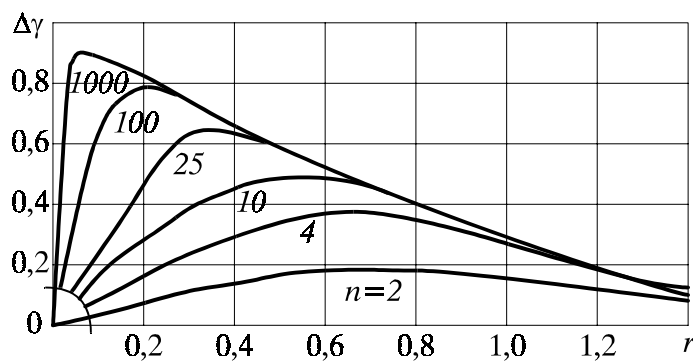
т.е. $\varepsilon_{opt} = \sigma$ при $n = 1$.

Като илюстрация на фиг. 8.5 и фиг. 8.6 са показани зависимостите на $\gamma = f_1(r, n)$ и на $\Delta\gamma = f_2(r, n)$ за нормално разпределение с известно σ .

На фиг. 8.7 е представена пресметнатата чрез уравнение (8.34) зависимост на $r_{opt} = f(n)$, от която може да се избере оптимална стойност на нормирания показател за точността на статистическата (извадкова) оценка r_{opt} при зададен брой измервания n .



Фиг. 8.5. Зависимост на $\gamma = f(r, n)$ при нормално разпределение с известно σ .



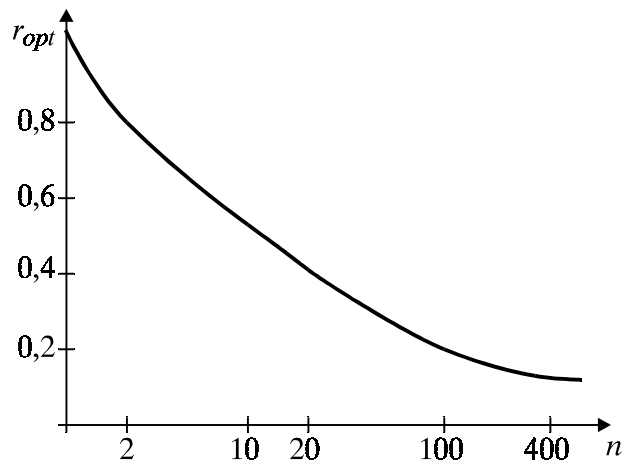
Фиг. 8.6. Зависимост $\Delta\gamma = f(r, n)$ при нормално разпределение с известно средно квадратично отклонение σ .

Вижда се, че максималната ширина на оптималния доверителен интервал се получава при $n = 1$ и е равна на $(X_2 - X_1) = 2\sigma$.

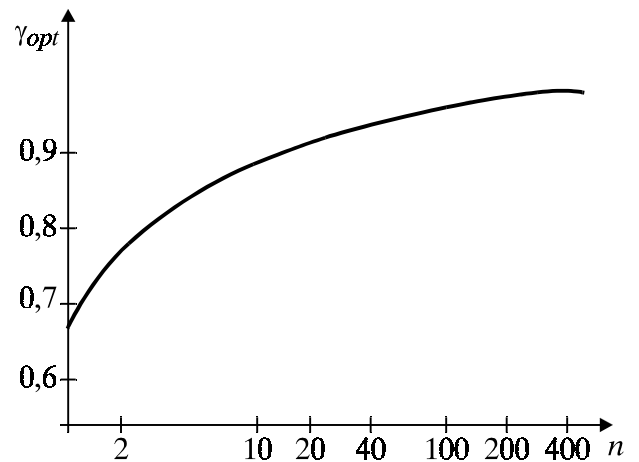
С увеличаване броя на измерванията на СВ x , оптималният доверителен интервал се свива. Например, ако са зададени брой измервания $n = 10, 100, 1000$, оптималната ширина на доверителния интервал става съответно $\sigma, 0,43\sigma; 0,17\sigma$.

На фиг. 8.8 е показана зависимостта $r_{opt} = f(n)$, съответстваща на изрази (8.35) и (8.36). С нейна помощ може да се определи оптималната стойност на показателя за достоверност на статистическата (извадкова) оценка

r_{opt} за определен брой измервания n .



Фиг. 8.7. Зависимост $r_{opt} = f(n)$ за избор на оптимален показател за точността на оценката на надеждността при зададен брой измервания n .



Фиг. 8.8. Зависимост $\gamma_{opt} = f(n)$ за избор на оптимална стойност на показателя за достоверност на оценката на надеждността при зададен брой измервания n .

Минималната стойност на оптималната двустранна доверителна вероятност има смисъл при $n = 1$ и е $r_{opt} = 0,683$, следователно минималната стойност на едностранната доверителна вероятност ще бъде $r_{opt}^* = 0,5(1 + r_{opt}) = 0,84$. С увеличаване на броя на измерванията расте и стойността на r_{opt} , която при $n = 10; 100; 1000$ е съответно $r_{opt} = 0,89; 0,97; 0,99$.

За случая, когато генералното средно квадратично отклонение σ е неизвестно, като се вземат предвид изрази (8.27 ÷ 8.29), зависимостта (8.31) приема вида:

$$\Delta\gamma(r, n) = \frac{\Gamma[(n+1)/2]}{\sqrt{n\pi}\Gamma(n/2)} \left\{ \int_{-r\sqrt{n}}^{r\sqrt{n}} \left(1 + \frac{x^2}{n}\right)^{-(n+1)/2} dx - \int_{-r}^r \left(1 + \frac{x^2}{n}\right)^{-(n+1)/2} dx \right\}. \quad (8.38)$$

За да се намери екстремума на (8.38) се определя производната спрямо r и тя се приравнява на нула. Така се намира:

$$r_{opt} = \sqrt{\frac{n - n^{n/(n+1)}}{n^{n/(n+1)} - 1}}. \quad (8.39)$$

Накрая при отчитане на зависимостите (8.27 ÷ 8.29) за (8.39) се получава:

$$\gamma_{opt} = \Phi_1 \left(\sqrt{\frac{n(n - n^{n/(n+1)})}{n^{n/(n+1)} - 1}} \right), \quad (8.40)$$

където

$$\Phi_1(\alpha) = \int_{-\alpha}^{\alpha} \varphi(x) dx, \quad (8.41)$$

а $\varphi(x)$ се определя от (8.28).

Табл. 8.7. Стойности на оптималния показател за точността на статическата оценка r_{opt} изчислени за различен брой измервания n .

n	4	25	100	Формула
$r_{opt} = \varepsilon/\sigma$	0,680	0,366	0,216	(2.27)
$r_{opt} = \varepsilon/s$	0,689	0,369	0,218	(2.32)

В табл. 8.7 са представени стойностите на r_{opt} изчислени с уравнения от (8.34) и (8.39) за $n = 4; 25; 100$. От данните в таблицата

следва, че получените резултати практически съвпадат. Това означава, че показаните на фиг. 8.7 и фиг. 8.8 зависимости могат да се използват и в случая, когато σ е неизвестно. При това следва да се отчита само съотношение (8.32).

8.5. Технологично и структурно резервиране на МЕИ

За повишаване на надеждността на системите и елементите се прилага резервиране, което използва един или друг вид излишък от елементи. В зависимост от това се определят следните разновидности резервирания: технологично, функционално, информационно и структурно.

Развитието на *технологичното резервиране* се стимулира от увеличаването на степента на интеграция и необходимостта от повишаване на рангемана при производството на МЕИ. То се изразява с въвеждане на излишък на елементи, т.е. базовите ПП пластини се изготвят с повече от необходимия брой елементи. След проверка на работоспособността на всеки елемент се реализира необходимото схемно решение чрез използване на избирателно свързване само на годни елементи. Топологията на съединенията се получава в резултат на редица последователни металзации.

Например при ГИС се използва многослойна металзация, тъй като всички съединения не могат да се изпълнят на едно ниво поради многократните пресичания. На първо ниво се реализират връзките между отделните активни и пасивни елементи, образуващи базовите логически

схеми И, ИЛИ, И-НЕ и др. Това ниво на съединенията съответства на метализация в ПП ИС от втора степен на интеграция. На второ ниво се свързват по-сложни схеми от типа на тригери, управляващи схеми и т.н. На трето ниво се формират връзките в регистри, суматори, многогорядни броячи.

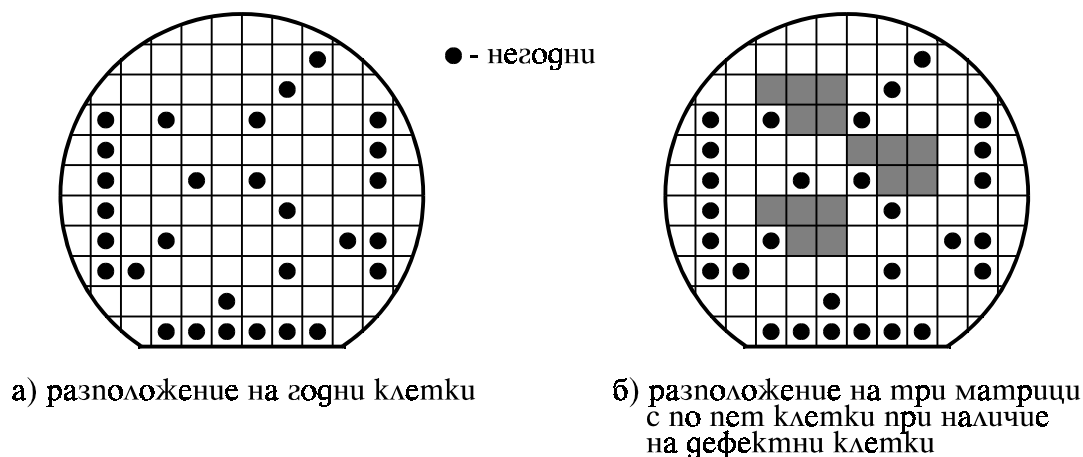
При разработката на ГИС с фиксирани междусъединения спада рангемана, тъй като с увеличаване на площта на кристала нараства и броя на дефектите в него. За преодоляване на тези трудности се оказва целесъобразно въвеждането на избирателни междусъединения и излишество на елементи, чийто брой се съобразява с реалния процент реализирани годни елементи при производството на МЕИ. Преимуществото на такъв подход при създаване на ГИС е свързан с повишаване на рангемана, тъй като той се определя в случая само от процесите на формиране на металizacionните слоеве и изолацията между тях.

Но резервирането на отделни елементи и прилагането на избирателни съединения рязко намалява интегралната плътност на схемата. Затова е ефективно да се въвежда излишество на елементи на ниво прости схеми с фиксирани съединения и да се изготвят ГИС чрез обединяване на тези схеми с избирателни съединения на второ или на трето ниво на метализация. Така вече в излишък се използват прости схеми, състоящи се от група елементи. Например за матрицата на ЗУ, предпочитана конфигурация е групата елементи, представляващи клетка от паметта с капацитет една дума. В този случай за цялата група елементи са необходими само една захранваща и две адресни шини.

Технологичното резервиране и избирателните съединения се използват при създаването на програмируеми логически матрици и на базови матрични кристали.

Построяването на ГИС с програмируеми съединения се основава на използването на елементарни схемни единици — клетки, които по своята сложност са еквивалентни на ИС с втора степен на интеграция. При създаването на такива ГИС се въвежда излишество на клетки. Като се взема предвид рангемана достиган от производителя, междусъединенията се определят за всяка пластина отново с отчитане на реалното разположение на годните клетки, което е различно за всяка пластина. Първата метализация се използва за обединяване на групите схемни елементи в клетки с фиксирани свързвания независимо от тяхната годност. В топологията на този слой метализация влизат допълнително редица контактни площадки, необходими за контрол със сондова установка на функционалната годност на всяка клетка. Информацията за разположението на годните клетки се използва за проектира-

не на топологията на избирателните съединения. Така за сметка на намаляване на интегралната плътност значително се повишава рангемана.



Фиг. 8.9. Схема за построяване на ГИС на базови матрици.

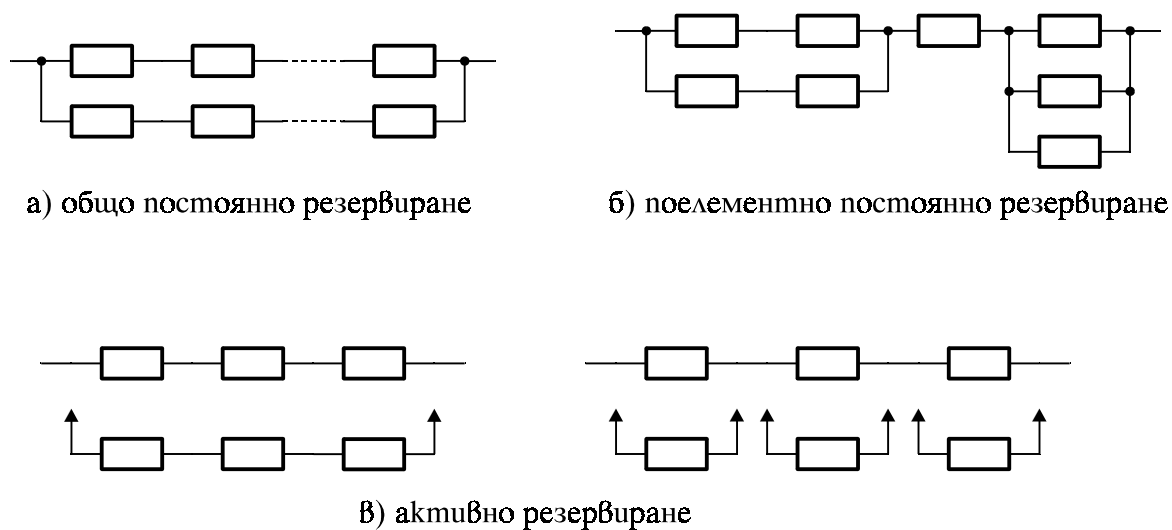
Построяването на ГИС по метода на базовите матрици предполага използване на избирателни съединения само на трето ниво на метализация при обединяване на базови матрици в ГИС. Обединяването на елементи в клетки и на клетките в базови матрици се осъществява с фиксирани съединения. Приложението на този метод е илюстрирано на фиг. 8.9, където една ГИС се създава от три базови матрици, всяка от които съдържа пет прилежащи една до друга клетки. Такъв метод на създаване на ГИС с програмируеми междуматрични съединения повишава рангемана при производството. Това предполага наличие на излишък от клетки за получаване на оптимален брой базови матрици при съществуващия рангеман на клетките. Такова технологично резервиране позволява да се използват преимуществата на фиксираните свързвания, и да се постига висок рангеман на готовите изделия чрез програмируеми избирателни междусъединения.

Основният принцип на технологичното резервиране е, че нестандартни могат да са само металните съединения. Освен това, методът на технологичното резервиране позволява да се разполага с ограничен брой стандартни клетки, а изготвянето на голям брой клетки позволява получаване на достоверни сведения за тяхната надеждност. При използване на микроматрици се получават широки възможности за избор на различен тип ГИС, включително брой клетки, топология на клетките, бързодействие, мощност и вид на транзисторите (*MOS* или биполярни).

В случая, когато различни схеми в МЕИ изпълняват близки функции,

се осъществява *функционално резервиране*.

Информационното резервиране е свързано с възможността за компенсация на загубите на информация по един канал с информация получена по друг канал.



Фиг. 8.10. Схеми на постоянно и активно резервиране.

При използване на *структурно резервиране* повишаването на надеждността се постига чрез въвеждане на допълнителни елементи в структурата на изделието. Структурното резервиране се разделя на общо и поелементно. В първия случай МЕИ се резервира цялото, а във втория — отделни елементи или групи. Схемите на общо и поелементно постоянно резервиране са показани на фиг. 8.10. а, б.

Ако резервните елементи функционират наравно с основните, то резервирането е постоянно, което се нарича още пасивно. Ако използването на резерва е свързано с превключващи операции, то резервирането е чрез заместване и се нарича активно резервиране.

При активното резервиране резервните елементи могат да са в натоварено, облекчено или ненатоварено състояние. При натоварен резерв интензивността на отказите на основния λ_o и резервния елемент λ_p са еднакви. При облекчения резерв интензивността на отказите на резервните елементи е по-ниска от тази на основните работещи елементи, т.е. $\lambda_o > \lambda_{ob}$. При ненатоварения резерв интензивността на отказите на елементите в състояние на резерв се пренебрегва $\lambda_p = 0$.

За характеристика на съотношението между общия брой еднотипни елементи n и броя r на необходимите за функциониране на МЕИ работещи елементи се въвежда понятието кратност на

резервирането:

$$k = (n - r)/r, \quad (8.42)$$

като стойностите на k могат да бъдат цяло число, ако $r = 1$ и дробно число ако $r > 1$.

Доколкото структурното резервиране е свързано с допълнителни загуби на резервни елементи, то последните се избират от съображения за повишаване на надеждността и намаляване на загубите от откази. Показателите на ефективността от резервиране дават:

— степента на повишаване на средната отработка до отказ на резервирано МЕИ $t_{рсп}$ в сравнение с тази на нерезервирано $t_{сп}$

$$B_{тсп} = t_{рсп} / t_{сп}; \quad (8.43)$$

— степен на повишаване на вероятността за безотказна работа

$$B_p = P_p / P. \quad (8.44)$$

Резервирането е ефективно, ако тези показатели са по-големи от 1.

Вероятността за отказ Q_p на паралелно работещи m елемента при $r = 1$ се определя за равнонадеждни елементи с израза:

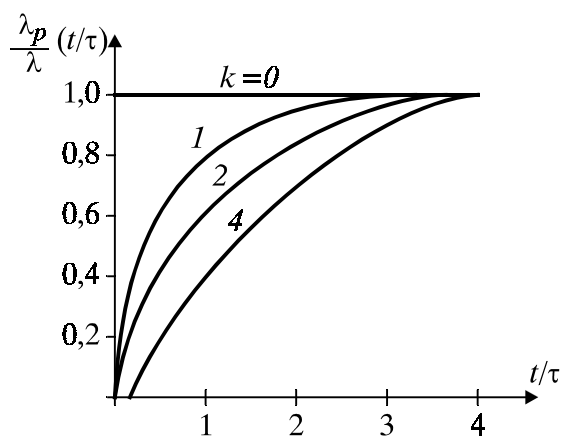
$$Q_p = q_0^m = q^{k+1} \quad (8.45)$$

Ако интензивността на отказите на нерезервирувания елемент е λ_0 , то за този случай интензивността на отказите λ_p ще бъде:

$$\lambda_p(t) \approx k\lambda_k t^{k-1} \quad (8.46)$$

Графиката на изменението на λ_p/λ в зависимост от кратността на резервиране и продължителността на работа на системата е представена на фиг. 8.11.

Практическата реализация на структурното резервиране в микроелектрониката повишава надеждността на ГИС, но има редица ограничения поради следните особености:



Фиг. 8.11. Зависимост на интензивността на отказите от кратността на резервиране.

та на последните е съизмерима с надеждността на резервираните елементи.

3. При избор на схема за резервиране (паралелно, последователно или паралелно-последователно включване на резервния елемент) трябва да се знае съотношението между отказите тип „прекъсване“ λ_{np} и тип „късо съединение“ λ_{kc} . Интензивностите на отказите за двата типа откази за един и същи елемент на ИС могат да бъдат различни, в зависимост от електрическото натоварване и експлоатационните фактори. За транзистори, диоди и кондензатори (слоини или интегрални) са възможни прекъсвания и къси съединения. Очевидно, ако $\lambda_{np} \ll \lambda_{kc}$ е целесъобразно да се извърши последователно включване на резервния елемент. Ако $\lambda_{kc} \ll \lambda_{np}$ — паралелно включване. При това вероятността за безотказна работа на веригата е:

$$P_{kc}(t) \approx 1 - (\lambda_{kc} t)^2 \quad (8.47)$$

$$P_{np}(t) \approx 1 - (\lambda_{np} t)^2, \quad (8.48)$$

където t е времето, за което се оценява вероятността.

Когато $\lambda_{kc} \approx \lambda_{np}$ се прилага паралелно-последователно резервиране. То представлява пълно резервиране по параметрите λ_{kc} и λ_{np} .

Очевидно за контактни съединения и еднослойна метализация са характерни откази от типа „прекъсване“, затова е приемлива схемата за паралелно включване. При това е необходимо да се отчитат паразитните капацитивни и индуктивни връзки за високочестотните вериги.

В цифровите ИС може да се прилага последователно резервиране,

1. Веригите, които са чувствителни към измененията на електрическите параметри на елементите (транзистор, диод, кондензатор и т.н.), не се поддават на резервиране. Всеки отказ (късо съединение, прекъсване, отклонение на параметрите от номиналните им стойности) нарушава работоспособността на ИС.

2. Резервирането на елементите на биполярни, *MOS* и хибридни ГИС води до увеличаване на броя на топологичните елементи (метализация, изолиращи джобове, обратно свързани *p-n* преходи). Надеждността

когато преобладаващ фактор за възникващите откази са колекторните напрежения и $\lambda_{kc} > \lambda_{np}$.

Паралелното включване на резервен транзистор е целесъобразно, когато преобладаващ фактор за отказите е колекторният ток и $\lambda_{kc} < \lambda_{np}$.

За ИС (логически, цифрови, аналогови и др.) най-приемливо е натовареното резервиране на вериги, защото всеки друг вид резервиране изисква допълнително контролно-превключващо устройство, чиято надеждност е съизмерима с надеждността на резервираната верига.

Една от специфичните особености на МЕИ е, че контролът на работоспособността на резервните вериги в готовите изделия е затруднен и в редица случаи е дори невъзможен. Затова при разработката на технологията трябва да се предвидят отделни контакти за сигналните и за захранващите вериги, които са необходими за автономното захранване и контрол. Тези контакти се запояват към външни изводи на изделието след провеждане на качествения контрол. Така се увеличава броят на изводите и на спойките, което се отчита при оценяване на надеждността на МЕИ.

Прилагането на натоварено резервиране е целесъобразно и възможно, ако се изпълняват следните условия:

— отказите на резервираните вериги не нарушава нормалното функциониране на изделието;

— при отказ на резервната верига преразпределението на товара не влошава надеждността на работоспособната верига;

— закъснението на резервираната верига е по-малко или равно на максимално допустимото закъснение при нормално функциониране на изделието

Класическите методи за резервиране са удобни за МЕИ предаващи информация (импулсни, аналогови и др.), тъй като отказите от тип „прекъсване“ и „късо съединение“ водят до нарушаване на работоспособността. Но за изделия, включващи двоични логически елементи, класическите схеми за резервиране са неприемливи. При тях наличието на откази от типа „късо съединение“ или „прекъсване“ могат да бъдат източник на устойчива грешна информация. Появяването на погрешна стойност 0 или 1 зависи от характера на отказа (к.с., прекъсване), от принципната схема и от логическата функция (И, ИЛИ, ИЛИ-НЕ).

В общия случай вероятността за отказ на веригата се получава от сумата на вероятностите за отказ при появата на погрешни логически нива 1 или 0.

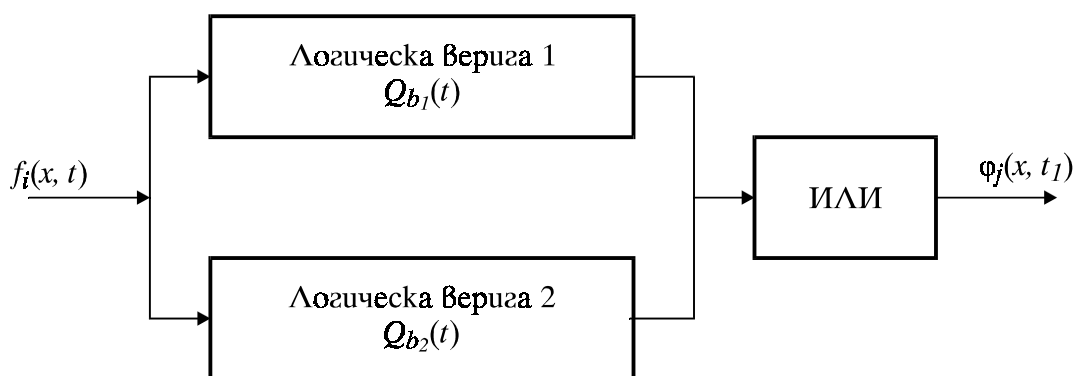
$$Q_B(t) = q_1(t) + q_0(t). \quad (7.51)$$

Схемата за еднократно резервиране на логическа верига може да се представи като се изходи от идентичността на веригите $Q_{B1}(t) = Q_{B2}(t) = Q_B(t)$.

В случая, когато $\lambda_B = \lambda_{B0}$ или $\lambda_B = \lambda_{B1}$ схемата за еднократно резервиране има вида, показан на фиг. 8.12. Изразът за вероятността за безотказна работа на резервираната схема е:

$$P_p(t) = [1 - Q^2_B(t)][1 - Q_{ИЛИ}(t)], \quad (7.52)$$

където $Q_B(t)$ и $Q_{ИЛИ}(t)$ са съответно вероятностите за отказ на логическата схема и на схемата ИЛИ. При многократно резервиране схемата ИЛИ се заменя с логически анализатор.



Фиг. 8.12. Схема на еднократно резервиране на логически вериги на ИС при $\lambda_B = \lambda_{b1}$ или $\lambda_B = \lambda_{b0}$.

Наред с разгледаните методи за резервиране при цифровите ГИС се използват методите на логическо и функционално излишество.

Въвеждането на структурно и функционално излишество значително усложнява ГИС. При това се използва същата елементна база, както и за създаването на самото МЕИ. Затова е необходимо да се отчита влиянието на надеждността на допълнителната база при оценка на ефективността от въведеното логическо и функционално излишество.

8.6. Управление на надеждността на МЕИ

Надеждността представлява сложно свойство, което се състои от редица взаимносвързани подсвойства, образуващи йерархична структура (фиг. 8.13).

Управлението на надеждността на МЕИ има за цел да се изключи

възникването на откази чрез въздействия в сферата на разработка, производство и приложение на МЕИ (статично управление) и чрез въздействия, осигуряващи беоотказност на МЕИ в ЕА или отказоустойчивост на ЕА при откази на МЕИ в периода на експлоатация (динамично управление).

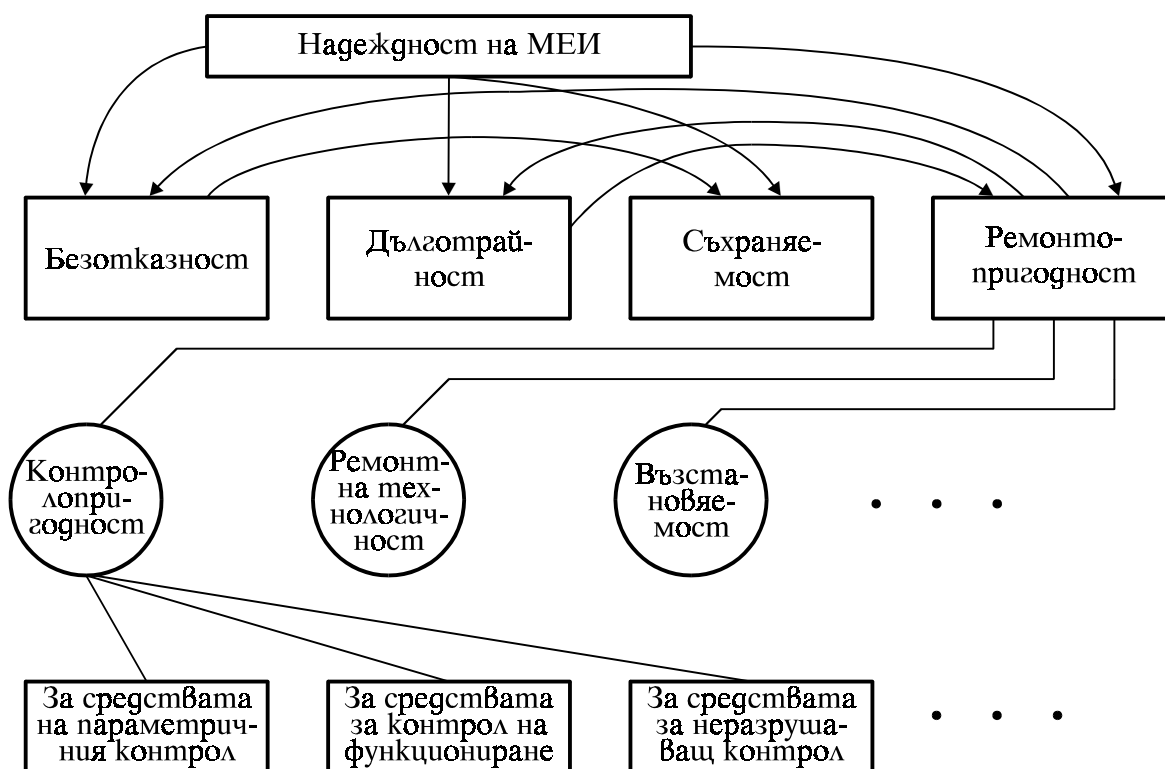
Статичното управление може да се осъществява в два плана:

— управление на надеждността на конкретен тип МЕИ при разработка и внедряване на съответни мероприятия през всичките етапи на времето му на живот;

— управление на надеждността на цялата съвкупност МЕИ, произведени в даден отрасъл, с използване на отраслова автоматизирана система за управление на надеждността.

При създаване на статични системи за управление на надеждността възникват редица проблеми, свързани с анализа на отказите.

Динамичното управление на надеждността се основава на осигуряването на структурна отказоустойчивост (т.е. „нечувствителност“ на апаратурата към възникващите откази) или на динамичното (управляемо) включване на резерв.



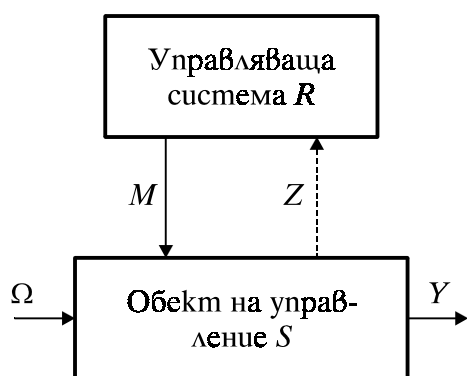
Фиг. 8.13. Структурна схема на надеждността като системно свойство.

В първия случай възниква проблема за оптимизиране на структурата, осъществяване на самоконтрол и най-пълно използване на априор-

ната информация за отказите. Във втория случай основните проблеми се свеждат до достигане на необходима достоверност при откриване на признаците за откази и оптимално използване на методите за резервиране.

Обединяването на системите на статичното и динамичното резервиране води до създаване на комплексна система, чиято реализация осигурява съчетаване на максимално високо ниво на безотказност и отказоустойчивост на ЕА.

От позицията за осигуряване на необходимата надеждност на всеки етап от времето на живот на новата ЕА показателят на надеждността на МЕИ се разглежда (фиг. 8.14) като изходен сигнал на системата за управление на надеждността на МЕИ. За показаната система M е множеството управляващи сигнали (напр. информация за замяна на комплекта МЕИ с по-надеждни и др.); Z — множеството сигнали на обратна връзка, постъпващи от управлявания обект S (напр. резултати от контрола на надеждността до и след постъпване на управляващия сигнал, информация за внезапните и постепенните откази и др.; Q — множеството въздействия от околната среда (напр. разработка на нова технология и др.).



Фиг. 8.14. Система за управление на надеждността на МЕИ през всеки етап от времето на живот на ЕА.

Характерната особеност на управлявания обект при такъв подход е, че моделът на обекта се изменя при преход от един етап на развитие на системата към друг. Например през етапа на съставяне на техническо задание той е съвкупност от характеристики; през етапа на проектиране — структурни и функционални схеми; през етапа на разработка — принципни схеми и опитни образци и т.н.

Управляващата система представлява организационна система, в която влизат хора, ЕИМ, ресурси (материали, източници на енергия) и организационни канали за връзка. Тя трябва да избере оптимално решение и да посочи средствата за решаването на поставената задача.

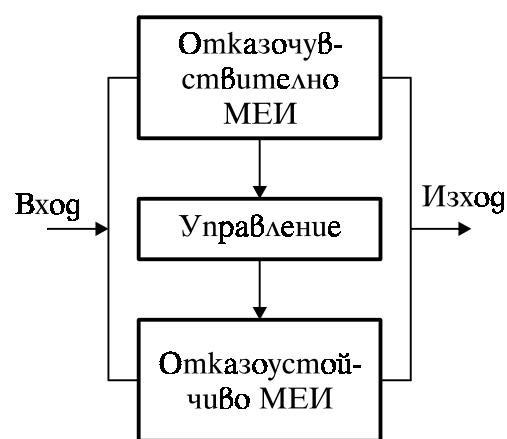
Системният подход приложен за управление на надеждността на МЕИ се състои в интегриране на дейностите по оценка на нивото на надеждност и неговото повишаване (или поддържане) по най-икономичен начин.

Динамичното структурно управление на надеждността на МЕИ в

ЕА се състои в пренастройване на структурата на апаратурата, така че отказът на МЕИ да не влияе (или ограничено да влияе) на нейното функциониране. За тази цел е необходимо да се изпълнят редица условия, по-главните от които са:

— оперативна пренастройка на структурата, която да осигурява непрекъснатост при функционирането на ЕА;

— запазване на оптимална структура след пренастройването, т.е. адаптация към новите условия на функциониране на ЕА.



Фиг. 8.15. Осигуряване на оперативност при пренастройка на отказоустойчиви системи.

Оперативността на пренастройката на структурата се постига със схемотехнични решения, обединяващи наличието на отказочувствителни и отказоустойчиви елементи. При възникване на отказ и нарушаване на съотношението вход — изход (фиг. 8.15) отказочувствителният елемент изработва управляващ сигнал, така че изпълнението на неговите функции да премине към отказоустойчивия елемент. Колкото е по-висока отказоустойчивостта на елемента, толкова по-малко е закъснението на сигнала в управляващата верига и е по-висока оперативността на

реконфигурацията, а следователно и устойчивостта към откази.

Оптимизацията на структурата се осъществява чрез минимизиране (максимизиране) на целевата и функция при избор на съответна конфигурация от всички възможни, които могат да се реализират при определените ограничения.