

7. ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРАНЕ НА НАДЕЖДНОСТТА НА МЕИ

7.1. Модели на надеждност на МЕИ

Под *оценка на надеждността* се разбира определяне стойностите на количествените показатели на надеждността на МЕИ. Когато оценката на надеждността е свързана с предсказване на събития в бъдещето е прието да се говори за прогнозиране на надеждността.

Такова прогнозиране, при което се осъществява екстраполация на свойствата на извадка върху свойствата на генерална съвкупност се нарича прогнозиране в настоящето.

Под *прогнозиране на надеждността* се разбира решаването на специален кръг задачи, свързани с предсказване или косвена оценка на надеждността на МЕИ с определена степен на достоверност, която теоретично се обосновава и се потвърждава на практика [14].

Количествените характеристики на надеждността се формират във вид на групови и индивидуални стойности и норми на показателите на надеждност.

Статистическият подход при оценка на показателите на надеждност се базира на случайния характер на възникване и проявяване на отказите и включва показателите на надеждност като изходни групови норми и стойности. Този подход използва математически методи за обобщаване на информацията за отказите в МЕИ.

Причинният подход се основава на анализа и на оценката на причините и механизмите за отказите. Същността на подхода е в моделиране на отказите чрез анализ на свойствата и процесите в елементите, изследване на причините за тяхната деградация и прогнозиране на надеждността. Всеки от двата подхода може да се използва самостоятелно.

Възможно е често пъти ефективно съвместно прилагане на отделни моменти от двата подхода. В такъв случай се говори за *физико-статистически подход*.

За съвременните МЕИ нараства ролята и значението на индивидуалните характеристики на надеждността за всички етапи на времето на живот.

През етапа на проектиране и производство за единични (опитни, уникални) образци на МЕИ апостериорните индивидуални оценки се оказват единствените обективни оценки за надеждността, на чиято

основа е възможно ефективно управление на надеждността.

През етапа на изпитване на МЕИ ефективността на методите за индивидуална оценка и прогнозиране на надеждността се обуславя от изискването за съкращаване на стойността, времето и обема на изпитванията.

През етапа на експлоатация е необходимо и целесъобразно да се прилагат методите за групова оценка.

Основно противоречие в теорията и практиката на надеждността е противоречието между локалния характер на конкретните откази и интегралния характер на свойството надеждност. Свързващо звено между процесите на отказите и характеристиките на надеждността са моделите на надеждност. Надеждността е времево свойство, затова показателите на надеждност могат да се представят като функции на физическото състояние или като характеристики на електрическите и електрофизичните параметри на МЕИ и скоростта им на изменение в зависимост от външните и вътрешните фактори.

В зависимост от нивото и формата на проявяване на отказите се различават модели на надеждност от *тип натоварване - здравина* спрямо внезапните откази и модели *тип параметър - поле на допуск* спрямо постепенните откази [11].

В съответствие с модела натоварване-здравина основното уравнение на надеждността

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) \quad (7.1)$$

може да се представи във вида:

$$P(t) = P(K(t, T)), \quad (7.2)$$

където $P(t)$ е вероятност за безотказна работа; K — запас на здравина или коефициент на физически запас на структурата на МЕИ спрямо натоварването (електрическо, топлинно, механично и т.н.); T — натоварване или въздействие на външен фактор, например температура; t — време.

За високонадеждните МЕИ ($P(t) \rightarrow 1$) при независими механизми на отказите за интензивността на отказите се получава:

$$\lambda(t) = \sum_j \left(-\frac{\partial P_j}{\partial K} \frac{dK_j}{dt} \right) = \sum_j \lambda_j(t). \quad (7.3)$$

За всяко конкретно МЕИ ($\partial P_j / \partial K = const$) изходни модели на надеждността са локалните модели на отказите във форма на модели на физико-химическите процеси — dK_j/dt .

В табл. 7.1 са представени типичните физико-химични процеси, водещи до откази в МЕИ. Скоростта на физико-химичните процеси dK_j/dt е функция на външните фактори. Типичен пример е зависимостта на скоростта на химическите реакции от температурата изразена чрез уравнението на Арениус:

$$dK/dt = A \exp(-E_a/RT), \quad (7.4)$$

където A е коефициент, зависещ от вида на реакцията; R — универсална газова константа.

Табл. 7.1. Физико-химически процеси, водещи до откази в МЕИ.

Физико-химически процеси	Компоненти на МЕИ
Електромиграция	<i>MOS</i> -структури, <i>PN</i> -преходи, проводници, съединения
Дифузия	Тънкослойни резистори и кондензатори
Йонизационно стареене	Диелектрични слоеве, изолационни слоеве
Химически и електрохимически реакции	Всички конструктивни елементи на МЕИ
Механични повреди	Контактни съединения, проводници

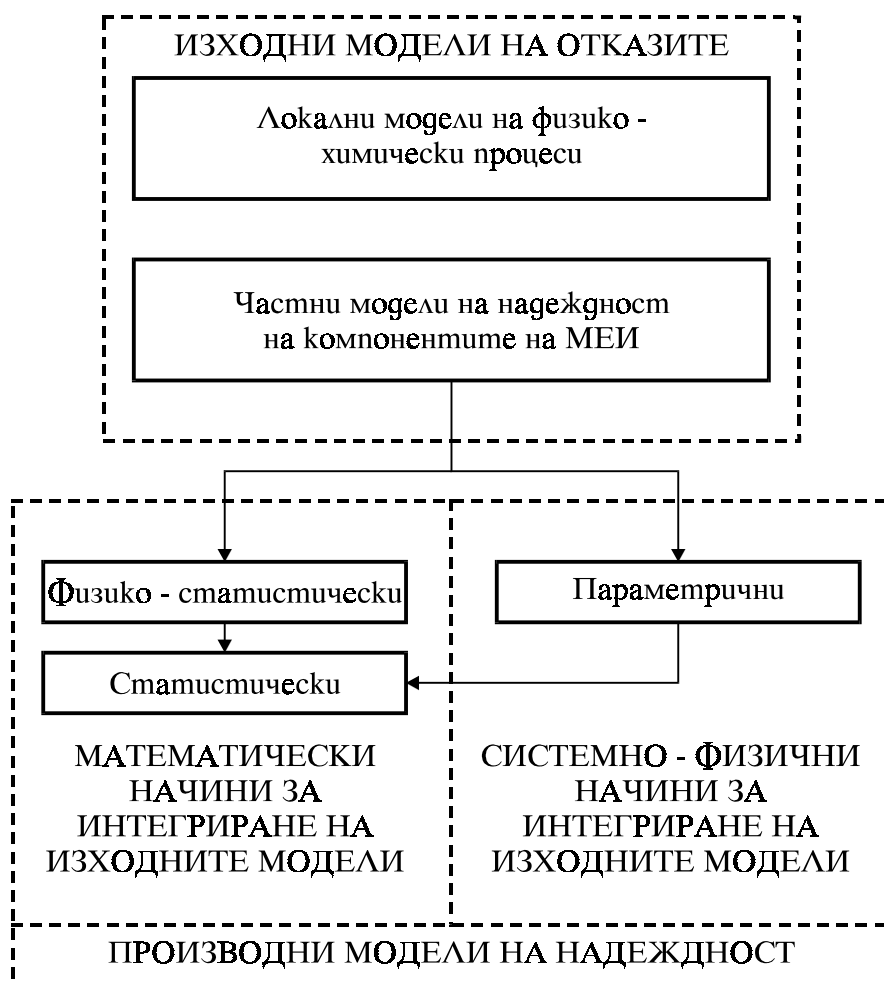
На базата на уравнение (7.4) се съставят частни или локални модели на надеждност. Примери на такива модели са показани в табл. 7.2 [17].

Табл. 7.2. Локални модели на надеждност на компоненти на МЕИ спрямо различни процеси.

Отработка до отказ на компоненти на МЕИ	Модел
<p>ЕЛЕКТРОМИГРАЦИЯ слоен проводник</p> <p>контакт метал - силиций</p>	$t = [ab \exp(-E_a/kT)]/A j^2$ <p>a, b — ширина и дебелина на проводника; A — коефициент на материала; j — плътност на тока.</p> <hr/> $t = A j^{-1} a \exp(-A'/l + E_a/kT)$ <p>A — коефициент, който се определя експериментално при изпитване на тестови структури; l — дължина на проводника; A' — коефициент на структурата на металния проводник, определен експериментално.</p>
<p>ПРОНИКВАНЕ НА ВЛАГА пластмасов корпус</p>	$t = B^2 b^2 / D, \quad 0,1 \leq B \leq 1,0$ $B^2 = (1,1 - B)/(1 + B)$ <p>D — коефициент на дифузия на водни пари; B — нормиран коефициент на влажност; b — дебелина на стената на пластмасовия корпус</p>
<p>КОРОЗИЯ Al-проводящи слоеве</p>	$t = A \exp(-E_a/kT) B^d$ <p>A, d — експериментално определяни коефициенти; B — относителна влажност в корпуса.</p>

Основа на *физико-статистическите модели* на надеждността е математическият начин на интегриране (сумиране) на локалните характеристики на надеждността по механизми на отказите и по конструктивно-технологични компоненти на ненадеждност.

На принципно друга методология е изграден *системно-физичният* подход, при който интеграцията на надеждностните свойства се осъществява за сметка на прехода от локалните физични свойства и параметри към интегралните параметри на състоянието, включващи и функционалните параметри на МЕИ. Тази методология е в основата на *параметричните модели* за надеждност от типа параметър-поле на допуск. При това съвкупността от физико-химични отказови процеси се отразява във формата на закономерно или случайно изменение на съответните електрофизически и електрически параметри на МЕИ спрямо техните гранични стойности.



Фиг. 7.1. Система модели на надеждност на МЕ изделия.

Статистическите модели за високонадеждните МЕИ имат смисъл на априорни ориентировъчни модели на надеждност. Ефективността на статистическите модели в апостериорен смисъл е ограничена от времеви, стойностни и информативни критерии и от достоверността вследствие ограничената статистика за отказите на МЕИ.

Така, системата модели на надеждността на МЕИ включва изходни (локални физически) модели на отказите и производни (интегрални физико-статистически, параметрични, статистически) модели на надеждност. Производните модели на надеждност могат да се класифицират според математическите и системно-физичните начини на интегриране на изходните модели. Класификационната схема на моделите на надеждност е представена на фиг. 7.1.

7.2. Методи за прогнозиране на надеждността на МЕИ

Оценката на надеждността може да има както констатиращ, така и прогнозиращ характер. *Априорните методи* за оценка на надеждността на МЕИ са прогнозиращи и се основават на физико-статистически, параметрични или статистически модели на надеждност. *Апостериорните методи* за експериментална оценка на фактичката надеждност на МЕИ могат да бъдат както констатиращи, така и прогнозиращи.

Прогнозирането на надеждността може да се осъществява на етапа проектиране, производство и експлоатация. Математичните основи на прогнозиране са общи за тези етапи, но методите за оценка на надеждността са различни. За етапа на производство, изпитване и експлоатация водещата роля принадлежи на апостериорните методи за оценка и прогнозиране на надеждността.

Ако в резултат на прогнозирането се получава предполагаема стойност на параметъра за бъдещи моменти от времето, то прогнозирането се нарича *право*. Тогава се изчисляват параметрите за загадени моменти в бъдещето. При *обратното прогнозиране* резултатът от прогнозата е определянето на момента на излизане на параметрите извън допустимите граници.

В случая на *индивидуално прогнозиране* се изследва функцията на състоянието $Q(\xi, t)$ на индивидуално МЕИ в областта T_1 и се осъществява оценка на поведението на тази функция в областта $T_2 > T_1$. Това прогнозиране на надеждността има първостепенно значение при оценка на надеждността на скъпи и гребносериен МЕИ. При *груповия метод на прогнозиране* се изследва функцията на състоянието вече на цяла група изделия, анализират се статистическите характеристики получени в областта T_1 .

Възможностите и ефективността на апостериорните методи за оценка и прогнозиране на индивидуални и на групови характеристики на надеждността на МЕИ се определят от съотношението и степента на взаимна връзка между априорната информация във формата на модели на надеждността и апостериорната информация във формата на диагностирани свойства и параметри на състоянието на обектите.

Методите за апостериорна оценка на характеристиките на надеждността според начина на представяне и анализ на диагностираните параметри за състоянието на МЕИ се разделят на четири групи:

1. *Функционална диагностика* в надеждностен смисъл — представлява диагностика на отказите на МЕИ по критерия „да-не“ [20]. Прогнозиращата способност на функционалните методи на диагностика практически е нулева. Резултатите дават възможност да се получат констатиращи апостериорни оценки само за групите

характеристики на надеждността за съвкупност от еднотипни обекти, съответстващи на статистическите модели на надеждност.

2. *Диагностика на параметри-критерии* за годността на МЕИ. Такава диагностика позволява да се получат апостериорни оценки на индивидуалните или груповите характеристики на надеждността спрямо параметричните (степенните) откази. Прогнозиращата способност на такива параметри е ограничена, поради предприеманите специални мерки по тяхната стабилизация (отрицателни обратни връзки, термо-стабилизация, дискретизация на сигналите и т.н.).

3. *Неразрушаващи (физико-технически) методи* за диагностика (оптични, електронни микроскопи, радиационни и др.). Те позволяват да се получат апостериорни индивидуални оценки на параметрите на локалните дефекти, определящи процесите на деградация и откази. Основното ограничение се изразява в отсъствие на модели на взаимна връзка между физическите характеристики на състоянието и показателите на надеждността на МЕИ. Това налага прилагането на методи за разпознаване на образи и използване на физични еталони.

4. *Методи за диагностика на информативни параметри* на МЕИ. Те заемат междинно положение между втората и третата група методи за диагностика. Към информативните параметри се отнасят електрофизичните и електрическите параметри, които се определят от специфичните особености на МЕИ. Такива са например параметрите и степента на линейност на $V-A$ и $C-V$ характеристики на елементите на МЕИ, утечни токове на изолиращите слоеве и т.н.

Информативността на параметрите се определя, първо от тяхната корелационна или функционална връзка с определени видове физически дефекти и деградационни процеси на МЕИ. В този смисъл тази група методи се разглежда като интегрален вариант на физико-техническите методи за диагностика с интегриране на информацията за надеждностните свойства на МЕИ чрез системно-физични методи. Електрофизичните и електрическите параметри са изходни за формиране на функционални параметри-критерии за годност на МЕИ.

Затова реализацията на задачата за апостериорна оценка и прогнозиране на индивидуалните и груповите характеристики на надеждността чрез тези методи е възможна за реални обекти или тестови структури както във вид на физико-статистически модели с използване на методите за разпознаване на образи, така и във вид на параметрични модели на надеждност. В табл. 7.3 са представени основните методи за диагностика на физико-технически и информативни параметри на типични дефекти на ГИС [14].

Табл. 7.3. Методи за диагностика на дефекти на МЕИ (ВАХ — диагностика на V-A характеристика; ЕМ — електронна микроскопия; ПН — пробивни напрежения; УТ — утечни токове; ВФХ — V-F характеристика; ССС — сканираща светлинна сонда; РМ — рентгенови методи; ТМ — топлинни методи; ВМ — визуални методи).

Методи за диагностика на дефекти	ВАХ	ЕМ	ПН	УТ	ВФХ	ССС	РМ	ТМ	ВМ
Дефекти на:									
— закрепване на чип в корпус							*	*	
— проводници		*					*		*
— чипа		*					*		*
— термокомпресионни съединения							*	*	
— междуслойните контакти	*							*	
— метализацията		*						*	*
— повърхността	*	*	*	*		*			*
— P-N преходите, предизвикващи пробив или утечка	*	*	*	*		*	*		
— изолиращи слоеве		*	*	*			*		
Дефекти от отклонения на топологични и конструктивни параметри на:									
— метални слоеве		*				*			*
— легирани области	*	*							*
— диелектрични слоеве		*							*

Диагностичните модели на МЕИ в зависимост от нивото и от пълнотата на априорната информация се класифицират на *качествени* (във формата на вероятностни характеристики на отказите) и *количествени* (във формата на корелационни или функционални модели).

Съществуват математически и системно-физични (в частност термодинамични) начини за интегриране на диагностичните параметри. При силна корелационна връзка по-ефективни са системно-физичните подходи, а при по-слаба — математическите.

Въпреки многообразието методите за прогнозиране на надеждността на МЕИ могат да се групират в следните класове: математически, физични и физико-статистически.

В зависимост от формата *математическите методи* за прогнозиране на надеждността на МЕИ се класифицират на:

1. *Статистически методи* за апостериорна оценка на надеждността с използване на вероятностни модели [7]. Обработка на резултатите от експлоатацията или изпитванията (нормални или ускорени) се извършва за оценка на отказите или състоянията на МЕИ по критерия „да-не“.

2. *Вероятностните методи* за оценка на изменението на параметрите на състоянието на МЕИ във вид на различни форми на представяне на случайните функции (времеви редове, марковски процеси и т.н.) могат да се използват в параметричните модели на надеждността.

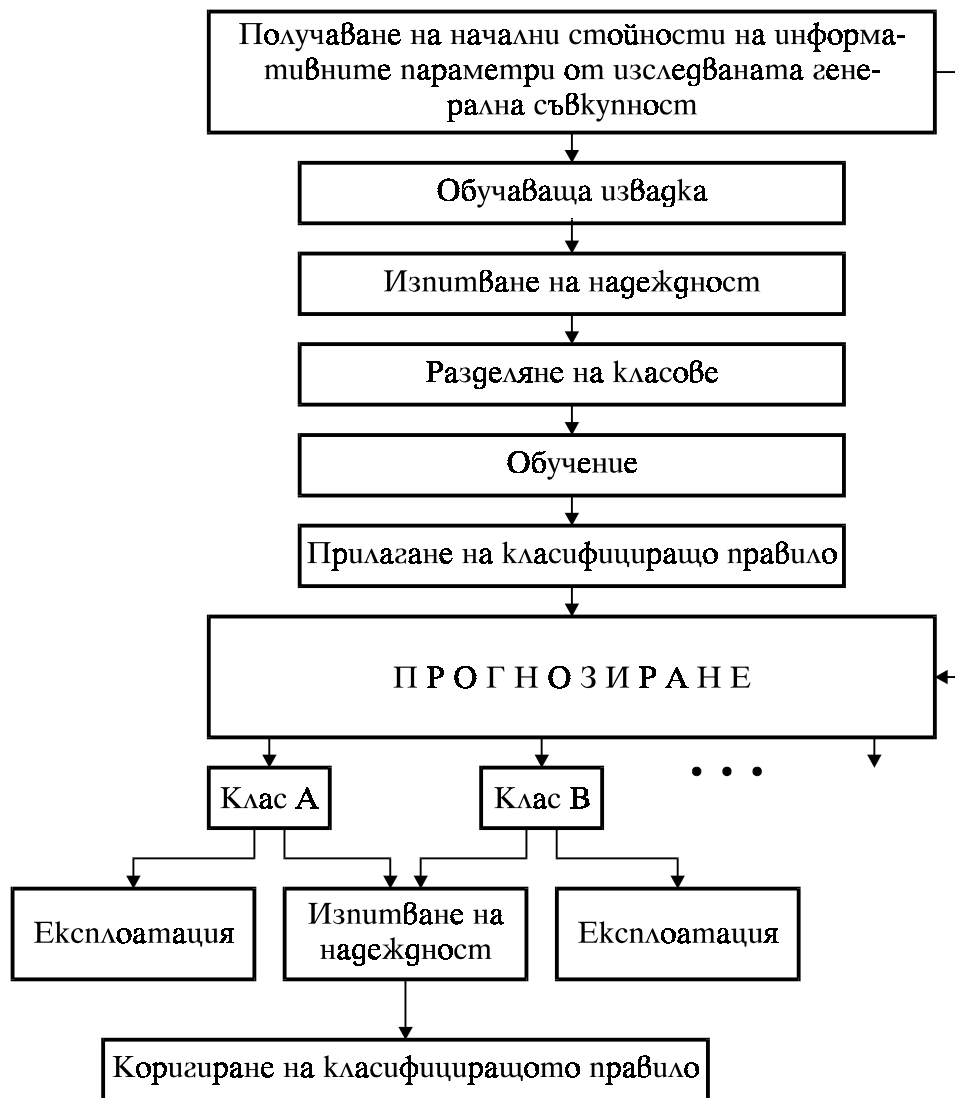
3. *Методи за разпознаване на образи* — инвариантни по отношение формите на крайно проявяване на отказите [14]. Ефективността им се определя от информативността и прогнозиращата способност на диагностичните параметри на МЕИ. Решаването на задачата за прогнозиране на надеждността по този метод включва два етапа.

На първия етап се осъществява формиране на обучаваща извадка, подбор на параметри, включващи параметри-критерии за годност и информативни електрофизически параметри, изграждане на класифициращи правила. Този етап е етап на групово (статистическо) обучение на съвкупност еднородни обекти за различни класове.

На втория етап се осъществява индивидуална класификация на диагностируемите обекти, т.е. отнасянето им към определен клас по критерий за надеждност, който е формиран през първия етап. Алгоритъмът на прогнозиране е представен на фиг. 7.2. С провеждане на изпитвания може да се коригира класифициращото правило, на чиято база всяко МЕИ от генералната съвкупност се прогнозира за дълготрайност с отнасяне към съответен клас (например клас А или В).

Методът за прогнозиране на надеждността с използване на разпознаване на „образи“ е ограничен за високонадеждните ГИС. При тях е невъзможно по „случайно“ измерени параметри да се създаде достоверен „образ“, който да съответства на определено ниво на надеждност. Също така не бива по експериментален път да се получават показателите за надеждност.

Модернизираният метод за разпознаване на „образи“ използва информативните параметри на елементите на ГИС, които характеризират съвкупността от механизми на отказите, определящи показателите на надеждност. Най-важно е да се познават функциите на разпределение на информативните параметри и изменението им от експлоатационните дестабилизиращи фактори.



Фиг. 7.2. Алгоритъм за разпознаване на образци.

Така за прогнозиране на показателите за надеждност на ГИС трябва да се изследват и определят:

- информативните електрофизични и електрически параметри;
- комплекса значими експлоатационни дестабилизиращи фактори, влияещи на надеждността;
- връзката между показателите на надеждност и допустимата многомерна област на изменение на информативните параметри;
- да се състави обучаваща програма за ЕИМ.

7.3. Статистически модели на надеждност

При изграждане на статистическите модели на надеждността е важно да бъдат изяснени няколко основни момента:

- съотношението между производствената и експлоатационната

интензивност на отказите;

— влиянието на условията на работа на МЕИ върху експлоатационната надеждност;

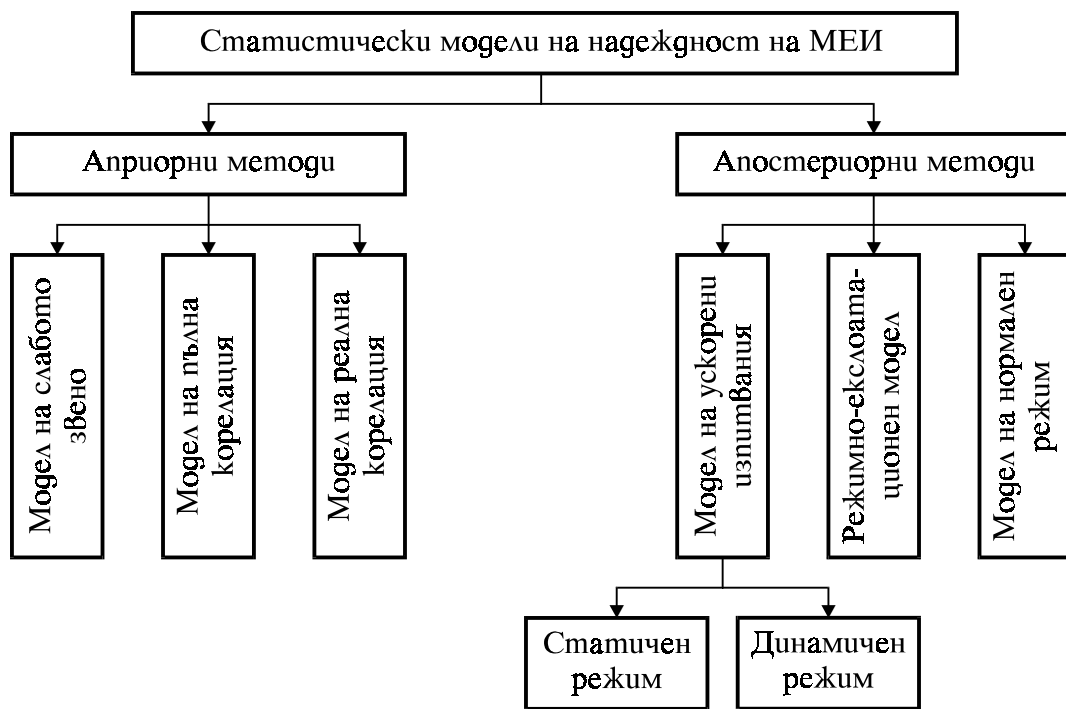
— възможността за получаване на достоверна оценка за надеждността в определен доверителен интервал;

— оптимизирането на обема (брой изпитвани МЕИ и време на изпитване) на изпитваната партида, за получаване на достоверна оценка;

— познаване на корелационните зависимости между параметрите на надеждността на съответните градивни компоненти на МЕИ;

— оптимизирането на режимите за ускорени изпитвания, за да не се допусне да се активират неправилно огнища на откази.

Съобразно момента и мястото на осъществяване и крайната цел статистическите модели се разделят на апостериорни и априорни (фиг. 7.3).



Фиг. 7.3. Класификация на статистическите модели на надеждност на МЕИ.

При апостериорните модели за статистическа оценка на наблюдавани внезапни или постепенни (параметрични) откази $\Delta n(\Delta t)$ за период Δt от постъпили за изпитване $n(0)$ изделия се определят основните показатели на надеждността по известните зависимости:

— вероятност за безотказна работа:

$$P(t) = \frac{n(0) - \Delta n(\Delta t)}{n(0)}; \quad (7.5)$$

— интензивност на отказите:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(\Delta t)}{n(0)\Delta t}. \quad (7.6)$$

Данните за отказите при моделиране на надеждността се натрупват, когато МЕИ работят в нормален режим. При високонадеждните МЕИ моделът в тази си форма е неефективен. На практика той се съчетава с някои физични методи за изследване, например с метода на активния многофакторен експеримент. Така може да се получи достоверен математически модел за зависимостта $\lambda(t)$ при намален обем на експерименталната дейност.

За събиране на експериментални данни за моделите на ускорени изпитвания се прилага еднофакторния и многофакторният експеримент. За определяне на необходимите регресионни коефициенти се използва сравнително малка част от експерименталните данни, което понижава точността на оценката.

При активния многофакторен експеримент, едновременно варират всички променливи. Така всеки от регресионните коефициенти може да бъде определен по данните от целия извършван експеримент. Затова, грешката при определяне на надеждността става много по-малка, дори при същото количество данни или при намален обем на изпитваната извадка [28].

При събиране на данни от ускорени изпитвания при нормален режим МЕИ се изпитват в приетите за нормални условия на работа. Такова изпитване е прогностично. Прогнозира се промяната на параметъра на надеждност (чрез екстраполация на експерименталните резултати за контролируем период). При форсираните ускорени изпитвания МЕИ работят при режими, някои от които могат да превишават допустимите за нормална работа.

Режимно-експлоатационни модели. При определяне на надеждността на МЕИ могат да се използват модели, които отчитат влиянието на електрическото натоварване, на температурата, на механични натоварвания, на влага и атмосферно влияние. С тях се получават реални експлоатационни стойности на интензивността на отказите при нормални и гранични условия на работа.

Влиянието на външните условия на работа може да се изрази чрез няколко коефициента [15]:

— α_j — обобщен коефициент за всеки елемент, изразяващ влиянието

на товара α_L и температурата α_T ;

— k_M — коефициент на механично влияние;

— k_B — коефициент на влияние на влагата;

— k_A — коефициент, отчитащ атмосферното налягане.

Стойностите за тези коефициенти се избират от табл. 7.4 и табл. 7.5.

При земни условия на експлоатация се избира $k_A = 1,0$. С промяна на височината на всеки километър стойността на коефициента се увеличава с $0,015 \div 0,020$.

Табл. 7.4. Стойности на коефициента K_M

Условия	K_M
Лабораторни	1,0
Полеви	1,07
Корабни	1,37
Автомобилни	1,46
Железопътни	1,54
Самолетни	1,65

Табл. 7.5. Стойности на коефициента K_B

Условия		Стойност на K_B
Влага, %	Температура, °C	
60 ÷ 70	20 ÷ 40	1
90 ÷ 98	20 ÷ 25	2
90 ÷ 96	30 ÷ 40	2,5

Обобщеният коефициент α_B , зависещ от електрическият товар и температурата се определя за основните градивни дискретни елементи като транзистори α_{Tr} , диоди α_D , резистори α_R и кондензатори α_C съгласно зависимостите на фиг. 7.4.

Параметричните коефициенти на товара за диоди и транзистори се определят от:

$$\alpha_{L_{Tr}} = \alpha_{L_D} = \max \begin{cases} \alpha_{L_I} = I_i / I_{i_{max}} \\ \alpha_{L_U} = U_i / U_{i_{max}} \end{cases}, \quad (7.7)$$

където I_i е токът на i -транзистор или диод включен в права посока, а U_i е напрежението U_{CE} на транзистора или U_R на запушен диод.

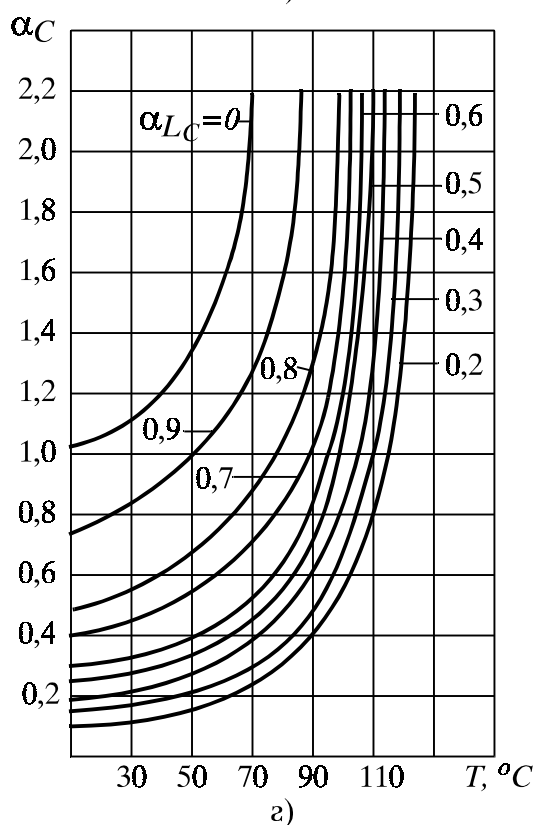
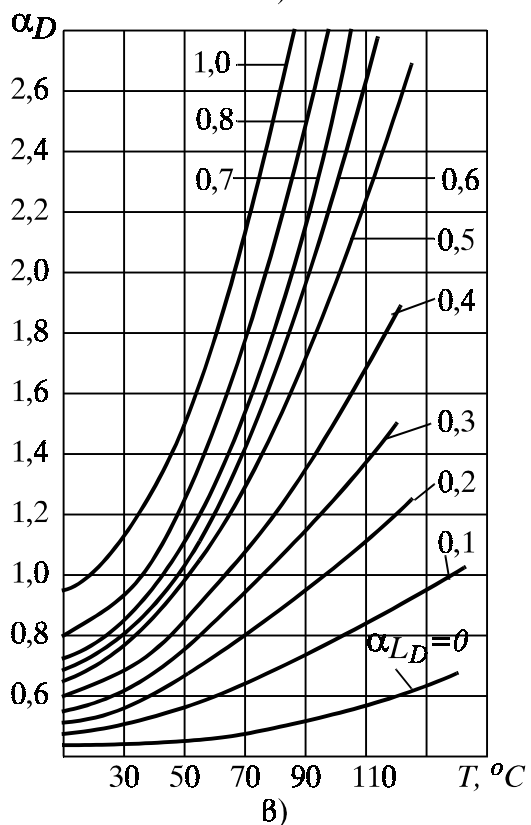
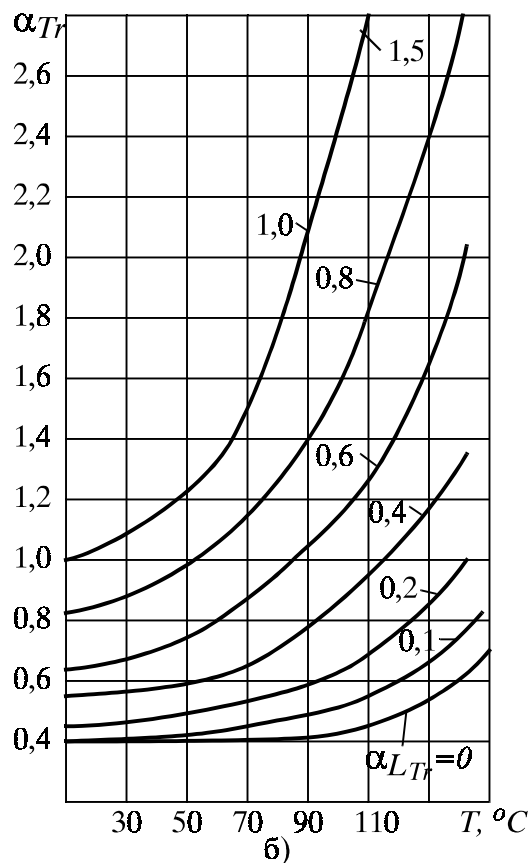
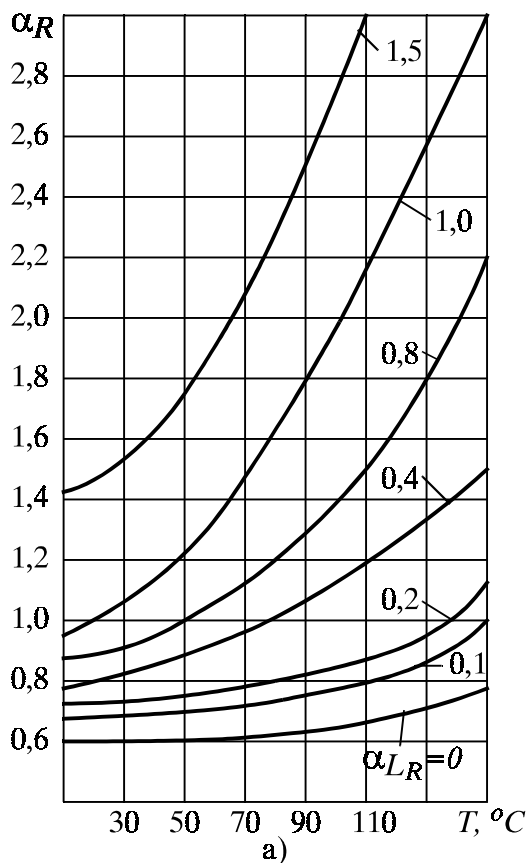
Коефициентът на товара на дискретните резистори е:

$$\alpha_{L_R} = P_i / P_{i_{max}}, \quad (7.8)$$

а на слойните резистори — съответно:

$$\alpha_{L_R} = P_i / P_{i_{max}} = I_i \rho_s / (b_i^2 P_0). \quad (7.9)$$

$I_{i_{max}}$, $U_{i_{max}}$ и $P_{i_{max}}$ са съответно максимално допустимите стойности на тока, напрежението и мощността, а P_0 — допустимата разсейвана мощност на слойните резистори.



Фиг. 7.4. Зависимост на обобщените коригиращи коефициенти от температурата и коефициента на товара α_L за слоеви резистори (а), транзистори и интегрални схеми (б), диоди (в) и слоеви кондензатори (з).

Товарният коефициент на дискретни и слойни кондензатори е:
 $\alpha_{LC} = U_i / U_{i_{max}}$. (7.10)

За интегрални схеми се приема $\alpha_{IC} = \alpha_{Tr}$.

При тези коефициенти и известна базова интензивност на отказите за отделните елементи, режимната интензивност на отказите е:

$$\lambda_i = \alpha_i k_M k_B k_A \lambda_{oi}. \quad (7.11)$$

Табл. 7.6. Означения и стойности на базовите интензивности на отказите на елементите на ненадежност на МЕИ.

Елемент на ненадежност на МЕИ	Означенie	Базова интензивност на отказите $\lambda_{oi} (\times 10^{-9}), h^{-1}$
Транзистори (брой N_{Tr})	λ_{oTr}	10
Диоди (брой N_D)	λ_{oD}	10
Резистори (брой N_R)	λ_{oR}	1
Кондензатори (брой N_C)	λ_{oC}	8 ÷ 10
Проводящи шини (брой N_{ic})	λ_{oic}	0,5
Контактни площадки (брой N_{pc})	λ_{opc}	1
Контакти на активните елементи (брой N_{bc})	λ_{obc}	1
Корпус (брой N_c)	λ_{oc}	0,5 ÷ 1,1
Подложка (брой N_b)	λ_{ob}	0,5
Бондове (брой N_{cp})	λ_{ocp}	1
Интегрални схеми (брой N_{IC})	λ_{oIC}	6

Може да се състави модел на интензивността на отказите например на мултичинна хибридна интегрална схема [15], съдържаща слойни пасивни елементи и монтирани диоди, транзистори и ИС, свързани чрез бондиране или чрез повърхностен монтаж:

$$\lambda_{HIC} = k_i \left[\begin{aligned} &N_{IC} \lambda_{oIC} \alpha_{IC} + N_{Tr} \lambda_{oTr} \alpha_{Tr} + N_D \lambda_{oD} \alpha_{oD} + \\ &+ N_R \lambda_{oR} \alpha_{oR} + N_C \lambda_{oC} \alpha_{oC} + N_{ic} \lambda_{oic} \alpha_{ic} + N_{cp} \lambda_{ocp} \alpha_{cp} + \\ &+ \left(\sum_{i=1}^n N_{bc\ IC} + 3N_{Tr} + 3N_D \right) \lambda_{obc} + \\ &+ 2 \left(\sum_{i=1}^n N_{pc\ IC} + 3N_{Tr} + 2N_D \right) \lambda_{opc} + \lambda_{oc} + \lambda_{ob} \end{aligned} \right] \quad (7.12)$$

където означенията за N и за средно статистическите базови интензивности на отказите λ_{0j} са дадени в табл. 7.6.

По аналогичен начин може да се представи режимният модел на една полупроводникова ИС [17].

$$\lambda_{sIC} = [N_{Tr}\alpha_{Tr}\lambda_{0Tr} + N_D\alpha_D\lambda_{0D} + (3N_{Tr} + 2N_D + N_B)\lambda_{0bc}]k_v, \quad (7.13)$$

където съответните означения и базови интензивности на отказите се вземат от табл. 7.6, а коефициентите за режима на работа от табл. 7.7. С k_v е означен коефициента на вибрации.

Табл. 7.7. Коригиращи коефициенти за режима на работа на МЕИ.

Коефициент	Температура, °C						
	20	30	40	50	60	70	80
α_{Tr}	1	1,35	1,85	2,6	3,6	4,9	6,2
α_D	1	1,27	1,68	2	2,6	3,4	4,1

Априорните методи са предназначени за прогнозиране на надеждността на едно МЕИ в етапа на проектиране. Такива пресмятания се изпо-

лзват и през време на производството, за да се получат данни за бъдещата експлоатационна надеждност на МЕИ.

Модел на слабото звено. В основата на модела е залегнал постулата за наличието при всякакви условия и в различни конструктивни изпълнения на определен поток от събития (откази). За такава съвкупност от откази, за които може да се предполага постоянност, както на съществуване, така и на поява, може да се приложи математическия модел на „слабото звено“ [26].

При такова моделиране вероятността за безотказна работа на системата ще бъде:

$$P(t) \exp \left[- \sum_{j=1}^m N_j \int_0^t \lambda_j(t) dt \right], \quad (7.14)$$

където m е броя на съставните елементи с приблизително еднаква надеждност, а N_j — броя на елементите от системата от j -тип; λ_j е интензивност на отказите на елементите от j -тип.

Интензивността на отказите за този модел се дава с израза:

$$\lambda(t) = \sum_{j=1}^m N_j \lambda_j(t). \quad (7.15)$$

От модела на слабото звено произтичат следните заключения:

— отказите на еднотипните елементи, интегрирани върху обща подложка не зависят един от друг;

— увеличаването на степеня на интеграция води до пропорционално влошаване на интензивността на отказите;

— вероятността за едновременна изява на повече от един отказ е почти нулева.

В действителност зависимостта между интензивността на отказите и броя на интегрираните елементи съвсем не е пропорционална. Напротив, интензивността на отказите нараства в много по-слаба степен в сравнение с интегрирания брой елементи. Следователно този модел може да доведе до сериозни неточности и следва да се прилага само за конкретни случаи.

В това отношение значително с по-голяма точност са моделите, които отчитат реалните корелационни връзки между параметрите. МЕИ се разглеждат като функционален възел или система, състояща се от разнородни градивни интегрирани елементи, които имат аналози с характеристиките и конструкцията на дискретните полупроводникови и други радиоелектронни елементи. Такова разглеждане позволява интензивността на отказите на МЕИ да се представи като сума от интензивността на отказите на съставните елементи.

Модел на функционалните връзки. За най-простия случай, когато МЕИ съдържа m градивни елементи и всичките са с еднаква интензивност на отказите и вероятност за едновременна изява на тези откази, общата интензивност на отказите на МЕИ ще бъде:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{j=1}^m \lambda_j. \quad (7.16)$$

Когато МЕИ се състои от две групи градивни елементи — корелирани с брой на типовете m_1 и брой на елементите от всеки тип k_1 и некорелирани с брой на типовете m_2 и интензивност на отказите за всеки от типовете съответно $\lambda_{1l}(t)$ и $\lambda_{2j}(t)$, общата интензивност е:

$$\lambda_{\Sigma}(t) = \sum_{l=1}^{m_1} k_{1l} \lambda_{1l}(t) + \sum_{j=1}^{m_2} \lambda_{2j}(t). \quad (7.17)$$

В случая към некорелираните елементи m_2 се включват спойки, активни и пасивни елементи на ХИС и др.

Така вероятността за безотказна работа при произволен закон на разпределение на интензивността на отказите се дава с израза:

$$P_{\Sigma}(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda_{\Sigma}(t) dt \right] = \exp \left[- \left(\sum_{l=1}^{m_1} k_{1l} \int_0^t \lambda_{1l}(t) dt + \sum_{j=1}^{m_2} \int_0^t \lambda_{2j}(t) dt \right) \right]. \quad (7.18)$$

Последните две уравнения описват същността на модела на функ-

ционалните връзки. Този модел предполага наличие на функционални връзки между показателите за надеждност на отделните градивни елементи на МЕИ. В случая се приема максимална гранична корелация, която е идеализирано разглеждане. По тази причина моделът на максималните корелационни връзки дава понижени стойности за интензивността на отказите. Този модел, обаче позволява да се оцени максимално възможната надеждност на определена конструкция и технология на МЕИ.

Значително по-реални стойности на интензивността на отказите се получават като се вземат под внимание реално съществуващите корелации между параметрите на отделните елементи на МЕИ, изразени чрез корелационна функция. Тя може да има стойности между 1 (при наличие на пълна функционална връзка) и 0 (при липса на такава връзка). Тази функция показва степента на еднородност на отказите на еднотипните елементи. При въвеждането на такава функция изразът (7.18) придобива вида:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{l=1}^{m_1} k_{I_l} \lambda_{I_l}(t) + \sum_{j=1}^{m_2} \left\{ \lambda_{2_j} + \sum_{i=1}^{k_{2_i}-1} \lambda_{2_i}(t) [1 - f(r_{r_j})] \right\}. \quad (7.19)$$

Модел на пълните функционални връзки. При пълна еднородност на показателите на градивните елементи, когато $f(r_{r_j}) = 1$, отказите на всички еднотипни елементи се изразяват едновременно и за този случай е в сила по-простото уравнение (7.16), представлящо този модел. Когато корелационната функция клони към 0 отказите на елементите ще бъдат независими и интензивността на отказите се отчита по модела на „слабото звено“ — израз (7.15).

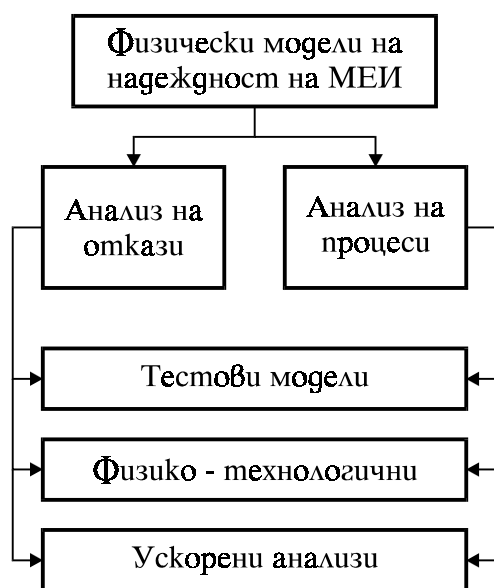
За полупроводниковите МЕИ са характерни тесни корелационни връзки, както между параметрите на еднотипни, така и на разнотипни градивни компоненти, което произлиза от характера на груповия технологичен процес. Интензивността на отказите на полупроводниковите ИС се изчислява чрез модела на реалните корелационни връзки [115]:

$$\begin{aligned} \lambda_{sIC} = & \lambda_c + \sum_{j=1}^{m_B} N_{B_j} \lambda_{B_j} + \sum_{j=1}^{m_{PN}} \left\{ \lambda_{PN_j} + (N_{PN_j} - 1) \lambda_{PN_j} [1 - f_{PN}(r_j)] \right\} + \\ & + \sum_{j=1}^{m_M} \left\{ \lambda_{M_j} + (N_{M_j} - 1) \lambda_{M_j} [1 - f_M(r_j)] \right\} + \\ & + \sum_{j=1}^{m_S} \left\{ \lambda_{S_j} + (N_{S_j} - 1) \lambda_{S_j} [1 - f_S(r_j)] \right\}, \end{aligned} \quad (7.20)$$

където λ_c е интензивността на отказите на корпуса; N_B, λ_B, m_B — съответно броя, интензивността на отказите и броя на контактните възли от j -тип; $N_{PN}, \lambda_{PN}, m_{PN}$ — съответно броя, интензивността на отказите и номенклатурата на p - n структури от j -тип; N_M, λ_M, m_M — съответно за условните участъци на j -слой на метализацията; N_S, λ_S, m_S — съответно за j -области в обема на подложката; $f_{PN}(r_j), f_M(r_j)$ и $f_S(r_j)$ — функциите на еднородност между електрическите параметри, респективно на PN структурите, метализираните области и областите в обема на подложката от j -тип. Номенклатурата на PN структурите се определя от функционалното им предназначение. Така към едно общо функционално предназначение могат да се включат PN структури работещи като диоди, транзистори, а към друго — такива използвани като кондензатори.

7.4. Физически модели на надеждност

На фиг. 7.5. е представена класификация на физическите модели на надеждност на МЕИ.



Фиг. 7.5. Видове физически (причинни) модели на надеждността на МЕИ.

Причините за поява на отказ в МЕИ се дължат на следните основни източника:

- подложка (чип) с изготвената структура;
- контактни съединения;
- корпус.

Тези източници могат да се деконструират на отделни операции, всяка от които има определена частична интензивност на отказите и определен тегловен коефициент. Редица от технологичните операции не са свързани пряко с броя на интегрираните елементи, а са част от общия групов технологичен процес (примерно дифузия, епитаксия, йон-

но внедряване, метализация и др.).

По такъв начин интензивността на отказите при този подход може да се изрази по следния начин:

$$\lambda = \sum_{j=1}^{d_0} h_j(N_{TC}) \lambda_j + \sum_{j=d_0+1}^z \lambda_j. \quad (7.21)$$

В случая $j = 1 \dots z$ е поредния номер на технологичните операции, всяка с частична интензивност на отказите λ_j и тегловен коефициент $h_j(N_{TC})$, зависещ от броя на технологично-конструктивните компоненти — N_{TC} : контакти, p - n преходи, транзистори и др. Първото събираемо изразява тези операции, които зависят от броя на интегрираните конструктивно-технологични типове компоненти N_{TC} а второто — от общите за груповия процес операции.

Физически тестови модел. За полупроводникова структура изработена по единна технология от определен производител частичните интензивности на отказите λ_{TS} , са еднакви както за една специално проектирана тестова структура, така и за цялото МЕИ или серия МЕИ. Това позволява да се екстраполират резултатите от данните за интензивността на отказите на тестова структура λ_{TS} върху цялото МЕИ, т.е. да се извърши технологично прогнозиране на надеждността.

Нека за един по-опростен случай са известни частичните интензивности на отказите λ_i :

λ_S — за единица повърхност на подложката;

λ_C — на корпуса;

λ_{B1} — на вътрешните контакти N_{B1} на брой;

λ_{B2} — на външните контакти N_{B2} на брой.

За този случай интензивността на отказите за тестовите структури може да се изрази така:

$$\lambda_{TS} = \lambda_S A_{TS} + \lambda_C + \lambda_{B1} N_{B1} + \lambda_{B2} N_{B2}, \quad (7.22)$$

където A_{TS} е активната част на тестовата структура.

Ако отделните събираеми се представят в безразмерни единици

$$I = \frac{\lambda_S}{\lambda_{TS}} A_{TS} + \frac{\lambda_C}{\lambda_{TS}} + \frac{\lambda_{B1}}{\lambda_{TS}} N_{B1(TS)} + \frac{\lambda_{B2}}{\lambda_{TS}} N_{B2(TS)} \quad (7.23)$$

$$I = \varepsilon_{S0} + \varepsilon_C + \varepsilon_{B1} + \varepsilon_{B2}$$

и като се знае, че интензивността на отказите на цялото МЕИ може да се представи аналогично на израз (7.21),

$$\lambda = \lambda_S A_S + \lambda_C + \lambda_{B1} N_{B2} \quad (7.24)$$

лесно се вижда възможността за линейна екстраполация

$$\lambda = \lambda_{TS} \left(\varepsilon_{S0} \frac{A_S}{A_{TS}} + \varepsilon_C + \varepsilon_{B1} \frac{N_{B1}}{N_{B1(TS)}} + \varepsilon_{B2} \frac{N_{B2}}{N_{B2(TS)}} \right). \quad (7.25)$$

Този израз представлява математически прогностичен модел, използващ тестова структура с експериментално установена интензивност на отказите. Използваните данни за някои от частичните интензивности на отказите на отделните технологични операции са дадени на табл. 7.8.

На базата на тестовия модел са разработени опростени модели на някои биполярни ИС. Така за биполярна ИС с малка и средна степен на интеграция [15] може да се запише:

$$\lambda_{BIC} = \lambda_{TS}(4 + 0,1N_C + 0,01N_{Tr}), \quad (7.26)$$

където N_{Tr} е броя на интегрираните транзистори, а N_C — броя на изводите на ИС. За тестовата интензивност на отказите за биполярни ИС някои автори използват 1.10^8 $1/h$.

Табл. 7.8. Частични интензивности на отказите за физико-прогностичния модел на надежност на големи ИС.

Наименование на операцията или на компонента	Означенение	Стойност, $h^{-1}.mm^{-2}$	Дименсия
Окисни тънки покрития	λ_{OX}^I	1.10^8	$h^{-1}mm^{-2}$
Метализирани участъци	λ_{OM}^I	$3,4.10^{-9}$	$h^{-1}mm^{-2}$
Вътрешни контакти	λ_{DC}^I	4.10^{-10}	h^{-1}
Дифузия	λ_D^I	$4,2.10^{-10}$	h^{-1}
Повърхностни дефекти	λ_M^I	$3,7.10^{-10}$	$h^{-1}mm^{-2}$
Структурни дефекти	λ_{SS}^I	$5,7.10^{-10}$	$h^{-1}mm^{-2}$
Закрепване на чипа	λ_{SC}^I	6.10^{-9}	h^{-1}
Странични включвания в корпуса	λ_{CL}^I	$5,7.10^{-10}$	$h^{-1}mm^{-2}$
Термокомпресионни контакти	λ_B^I	$3,7.10^{-10}$	h^{-1}
(Метало-)керамичен корпус	λ_C^I	$1,5.10^{-9}$	h^{-1}
Пластмасов корпус	λ_S^I	8.10^{-9}	h^{-1}

В общия случай интензивността на отказите на МЕИ при тестови изпитвания се определя от изразите:

$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_{ib} k_i$$

$$\lambda_{ib} = \lambda_b \prod_{i=1}^m a_i, \quad (7.27)$$

$$k_i = \gamma \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

където λ_{ib} и λ_b са съответно интензивностите на отказите на i -еле-

мент на оценяваното МЕИ и на тестовата схема; m — брой на типовете елементи в МЕИ; a_i — коригиращ коефициент; k_i — коефициент на съответствие; $\gamma = S_i/S_{ib}$ или $\gamma = (S_i/S_{ib})(d_b/d_i)$ — коефициенти, отчитащи топологичните размери S и d на i -елемент; E_a — енергия на активация на i -елемент; k — константа на Болцман; T_b , T — температури съответно на тестовата схема и на оценяваното МЕИ.

Физико-технологичен модел. С увеличаване на степента на интеграция и с намаляване на линейните размери на конструктивните компоненти на МЕИ започват да влияят такива фактори, като вид на топологията, геометрични размери на елементите, режими на технологичния контрол, режими на експлоатация и др. Всички тези фактори не винаги могат да се отразят достатъчно пълно от тестовия модел.

Физико-технологичният модел на надеждността на ГИС е изграден на общите изисквания съгласно израз (7.21). Този модел обаче взема под внимание много по-задълбочено технологичните и режимни причини за отказ [31].

$$\lambda_{LIC} = (\lambda'_{OX} A_M + \lambda'_{SC} \alpha_{ex}) \alpha_M \alpha_T + (\lambda'_B N_B + \lambda'_M A_M) \alpha_M \alpha_T \alpha_{ex} + \lambda'_D N_D + \lambda'_{CL} \alpha_{ex} + \lambda'_{SS} A_S + (\lambda'_S A_S + \lambda'_{CL}) \alpha_T \quad (7.28)$$

В този израз означенията на частичните интензивности на отказите са показани в табл. 7.8. Освен това с A_S и A_M са означени площите на повърхността на чипа и на метализираните участъци, а с N_A и N_B съответно броя на високотемпературните процеси и броя на контактите. Коефициентите α_M , α_T и α_{ex} отчитат съответно влиянието на режима на контрол и измерване на параметрите, на температурните режими и на други условия на експлоатация.

Обобщен физико-технологичен модел. Междy размерите на дефектите на повърхността на чип, подложка и работни слоеве съществува обратно пропорционална зависимост. Колкото по-малък е размерът на дефектите толкова по-голяма е плътността им. Последната може да бъде намалена чрез подобряване на качеството на материалите, на технологичното обзавеждане и на целия технологичен процес.

Обобщеният физико-технологичен модел предполага познаването на такива фактори като базовата интензивност на отказите на чипа за единица повърхност λ'_{s0} и условията за производство и експлоатация, изразени чрез съответните коефициенти. Интензивността на отказите на МЕИ в този модел в зависимост от сложността и степента на усвояването им в производството се определя от израза:

$$\lambda = A_s \lambda_{s0}' \alpha_q \alpha_b \alpha_t \alpha_e \alpha_p \alpha_c, \quad (7.29)$$

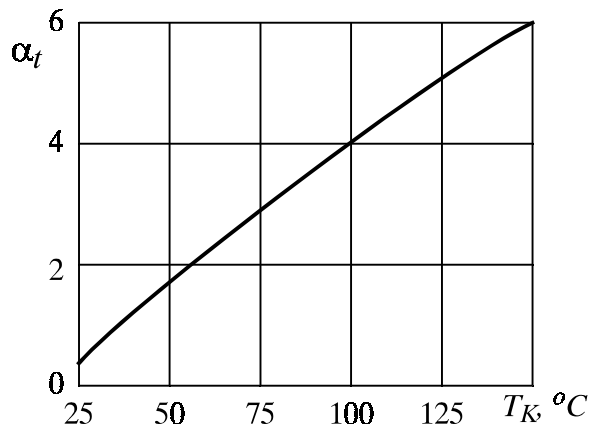
където A_s е площ на МЕИ. Съответните коефициенти са:

α_q — коефициент, зависещ от системата за контрол на качеството;

α_b — коефициент, характеризиращ ненадеждността на корпуса;

α_t — коефициент на температурно ускорение (фиг.7.6);

α_e — коефициент, отчитащ условията на експлоатация;



Фиг. 7.6. Зависимост на коефициента на температурно ускорение от температурата на чипа.

α_p — коефициент, характеризиращ степента на усвояване на МЕИ в производството;

α_c — коефициент, зависещ от сложността на МЕИ.

Определянето на частичните интензивности на отказите с технологичен характер е съществен проблем при всички физични модели. Трудността се дължи на различните конструктивно-технологични изпълнения, материали, технологична дисциплина. Както може да се види от табл. 7.9 относител-

ното влияние на отделните технологични компоненти може да бъде твърде различно за различни производители. Установяването на точни данни за различните коригиращи коефициенти във физическите модели изисква голяма по обем и задълбочена изследователска дейност.

Табл. 7.9. Относително влияние на отделните технологични компоненти върху надеждността на МЕИ за различни производители.

Причини за отказите на МЕИ	Данни от литература		
	[19]	[31]	[32]
Повърхностни дефекти	—	39	34,5
Дефекти на окисните слоеве	32	6,4	23
Дефекти на метализацията	12	6,6	28,8
Дефекти на контактни изводи	24	15,5	2,7
Обемни дефекти	7	6,6	5,3
Конструктивни дефекти	10	—	—
Корпусни дефекти	1	26	—
Пукнатини в подложката	12	—	5,8

Физико-технологичните модели се използват за бърза експресна информация за състоянието на производствената надеждност на МЕИ и прогнози в рамките на производството. Твърде рисковано обаче може да се окаже прогнозирането по този

метод за нови технологии и нови конструктивни решения.

7.5. Физико-статистически модели на надеждност

Същността на физико-статистическите методи се изразява в намиране на корелационни връзки между статистическите показатели на надеждност и явленията, локализиращи в различни конструктивно-технологични области на МЕИ. В този случай се създават модели при различни нива на натоварване и условия на експлоатация.

При изграждането на тези модели се извършва анализ на физико-химическите процеси в МЕИ, провеждат се специални изпитвания и се използват основни зависимости за показателите на надеждност. В основата на физико-статистическите модели лежат ускорените изпитвания на МЕИ.

Най-добре са изучени моделите, получени в резултат на ускорени изпитвания при термично натоварване. Протичащите под въздействието на термичното натоварване физико-химически процеси, обуславящи стареенето могат да се опишат с уравнението на Арениус:

$$\frac{dM}{dt} = C e^{-\frac{qE_a}{kT}}, \quad (7.30)$$

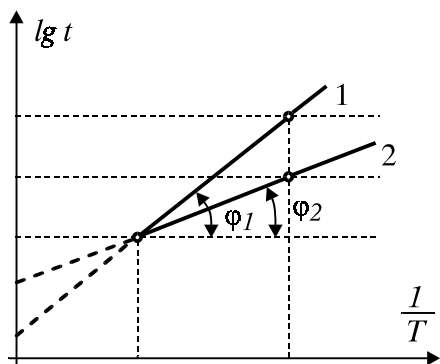
където dM/dt е скоростта на реакцията; C — константа. Това уравнение може да се преобразува в следния вид:

$$\lg t = \frac{C_1 E_a}{T} + \lg C_2, \quad (7.31)$$

$$C_1 = q/2,303k$$

Ако се построи зависимостта (7.31) се получава семейство прави, изобразени на фиг. 7.7. Тангенсът на ъгъла φ на наклона на тези прави е свързан с енергията на активация E_a чрез равенството:

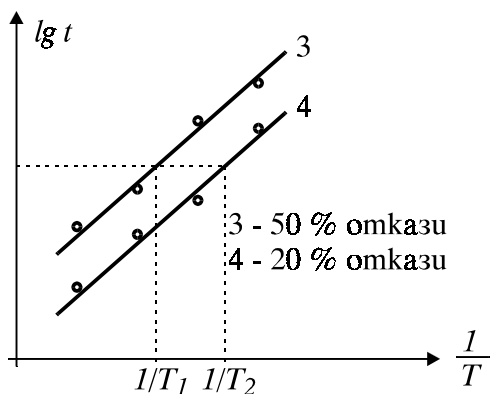
$$\operatorname{tg} \varphi = C_1 E_a. \quad (7.32)$$



Фиг. 7.7. Графично представяне на резултатите от високотемпературни изпитвания на две различни МЕИ.

Правите 1 и 2 характеризират две различни изделия подложени на едни и същи термични натоварвания. Вижда се, че изделието съответстващо на права 1 е по-надеждно. Така по ъгъла на наклона на правите може да се сравнява надеждността на различни типове изделия. Ако се сравняват различни модификации на едно и също МЕИ, то изменението на ъгъл φ_j характеризира само измененията на конструкцията му в по-добра или по-лоша насока. В същото време успоредното преместване на правите надясно или наляво характеризира технологичните изменения.

На практика се търси линейна зависимост между логаритъма от отношението на броя откази в извадката към нейния обем и големината на приложеното натоварване. Ако такава зависимост съществува, то стареенето на МЕИ също се описва с уравнението на Арениус. В този случай уравнение (7.31) се видоизменя. Енергията на активацията ще бъде пропорционална на $\text{ctg } \varphi$. Не бива автоматично в (7.31) да се заменя времето с натрупания процент на отказите.



Фиг. 7.8. Графики на Арениус за различен процент натрупани откази при високотемпературно изпитване на МЕИ.

При провеждане на експерименти може да се построят правите от уравнението на Арениус при различен процент на натрупаните откази (фиг. 7.8). Тези графики са построени за осем извадки от една и съща партида МЕИ, които са изпитавани при различни термични натоварвания. В процеса на изпитване са фиксирани времената, за които в първите четири извадки отказват 20% от изделията, а във вторите четири извадки — 50%. След като се свържат точките за един и същ процент на отказите се получават две успоредни прави, при условие че механизмите на отказите във

всички изпитвани МЕИ са еднакви. Ако се прекара перпендикуляр от коя да е точка на ординатата до пресичането му с прави 3 и 4, то проекциите на пресечните точки върху абцисата дават стойностите на натоварванията, съответстващи на две стойности на логаритъма на

натрупания процент отказу. Така могат да се получат две точки в координатната система на фиг. 7.9. Правата през тези точки ще се описва с уравнението на Арениус. За тази графика времето е постоянна величина. Изхождайки от модела на стареене на МЕИ може да се определи и коефициентът на ускорение F :

$$F = \frac{t}{t'}, \quad (7.33)$$

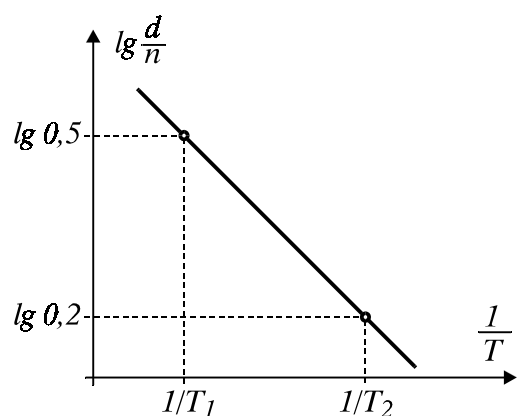
където t — време на изпитване при нормално натоварване; t' — време на изпитване във форсиран ускорен режим.

При допускане, че механизмът на отказите е неизменен, т. е. че E_a е постоянна, тогава за коефициента на ускорение може да се запише:

$$F = e^{-\frac{qE_a}{k} \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T} \right)}, \quad (7.34)$$

където температурата на форсирания режим T' е по-висока от тази на нормалния режим — T .

Така по резултатите от изпитването във форсиран режим за време T' може да се съди за времето на изпитване на МЕИ при нормално натоварване $T = F T'$.



Фиг. 7.9. Зависимост между отношението на броя откази d към обема на извадката и натоварването при високотемпературно изпитване на МЕИ.

От фиг. 7.7 се забелязва, че за високонадеждните МЕИ коефициентът на ускорение ще бъде по нисък, отколкото за по-ненадеждните изделия.

Ускорените изпитвания могат да се използват за създаване на физико-статистически модели само тогава, когато коефициентът на ускорение остава постоянен в процеса на производство на изделието. В противен случай коефициентът на ускорение трябва да се проверява и отново оценява при всяко изменение на технологичния процес.

За да се екстраполират резултатите от ускорените изпитвания е необходимо да се познава разпределението

на обработката до отказ на изпитваното МЕИ.

В зависимост от начина на прилагане на натоварването ускорените изпитвания се класифицират на:

- изпитвания при фиксирано натоварване;
- изпитвания при променливо натоварване.

В първия случай, за да се екстраполират получените резултати към нормални условия трябва да се изпитват няколко извадки при различни нива на натоварване.

При стъпково увеличаване на натоварването първоначално се контролират избраните параметри на критерия за годността на МЕИ. Изделията се подлагат на действието на натоварване, след което се снимат от изпитване и отново се контролират параметрите, за да се регистрират възникналите откази. След това отново се натоварват, но с по-висока от предишната стойност и така докато се достигне определен процент откази. При такова изпитване са необходими по-малък брой МЕИ и по-късо време за получаване на необходимата информация. Най-трудната задача при това изпитване е свързана с избора на степента на увеличаване на натоварването и на продължителността му на действие.

7.6. Термодинамични модели

С увеличаването сложността на МЕИ се увеличават трудностите свързани с разделяне на физическите, технологичните, функционалните и надеждностните свойства.

Взаимната връзка между термодинамиката и теорията на надеждността е естествена. В основата им лежи най-общото и системно свойство — свойството за изменение на състоянието на обектите. От термодинамична гледна точка всяко МЕИ може да се представи като физическа система, притежаваща в общия случай всички възможни форми на движение (процеси) и съответни свойства — механични, електромагнитни, топлинни, химически. Макроскопичното обединяване във физическа система се основава на аксиомата за непрекъснатост на всички форми на движение. Всяка реална физическа система се намира в непрекъснато взаимодействие със средата. Вследствие на това се променя състоянието и. Механизмите на изменение на който и да е макроскопичен параметър u са два: за сметка на взаимодействие на системата с външната среда $d_e u$ и за сметка на вътрешни процеси в системата $d_i u$. Тогава уравнението на баланса дава математически запис на пълното изменение на параметъра u :

$$du = d_e u + d_i u. \quad (7.35)$$

Това уравнение отразява взаимодействието на системата със средата.

Централна роля в термодинамиката и в теорията на надеждността играе функцията на състоянието на системата, наречено ентропия

(S). От микроскопична (молекулярно-кинетична гледна точка) ентропията е вероятностна мярка на макроскопичните състояния на системата. Ентропията отразява цялото многообразие от обратими и необратими изменения и превръщания на системата. За обратими процеси $d_i S = 0$, а за необратими — $d_i S > 0$.

Само в процеса на взаимодействие със средата се проявява състоянието на системата, което се характеризира с параметрите на взаимодействие. Така функцията на състоянието на системата се определя от два класа параметри на системата. Първият клас са интензивните или локални параметри X_j , които съществуват за всяка локална точка на системата (например температура, плътност, налягане) и имат смисъл на термодинамични сили. Другият клас параметри са екстензивните или интегралните параметри y_j , които принадлежат на системата като цяло (например маса, обем, ентропия) и за които е в сила свойството адитивност. Тогава всичките възможни взаимодействия на системата се представят с уравнението на Гибс:

$$dU = \sum_j X_j dy_j. \quad (7.36)$$

На всяко взаимодействие съответства съгласувана двойка параметри — екстензивен и интензивен. От всяка двойка само един параметър е независим. Основните видове взаимодействия и съответните съгласувани параметри са показани на табл. 7.10.

Табл. 7.10. Видове взаимодействия и параметри на взаимодействието на микроелектронната физическа система с околната среда.

Взаимодействие на физическата система със средата	Параметри на взаимодействието	
	екстензивен	интензивен
механично	обем	налягане
топлинно	ентропия	температура
електрическо	електрически заряд	напрегнатост на електрическото поле
магнитно	магнитен момент	напрегнатост на магнитно поле
химическо	маса	химически потенциал

МЕИ се характеризират с принципно неравновесни състояния и съответно необратими процеси. Неравновесните състояния и необратимите процеси обуславят вътрешните механизми на изменение на състоянието на физическата система d_i и по-точно $d_i S$. От своя страна неравновесното състояние се определя от вътрешните нееднороднос-

ти на параметрите на системата (плътност, температура и т.н.).

Функцията $d_i S/dt$ добива вида:

$$\delta(S) = (1/T) \sum_j X_j^{(i)} J_j^{(i)}, \quad (7.37)$$

където $X_j^{(i)} = \text{grad} x_j$ и $J_j^{(i)} = dy/dt$. $J_j^{(i)}$ е скоростта на необратимите процеси, определяни от изменението във времето на екстензивните параметри, а $X_j^{(i)}$ е съгласувания параметър, даващ градиента на интензивните параметри.

Протичането на необратими процеси се съпровожда с производството на ентропия, в резултат на разсейване на енергия:

$$E = \sum_j X_j^{(i)} J_j^{(i)}. \quad (7.38)$$

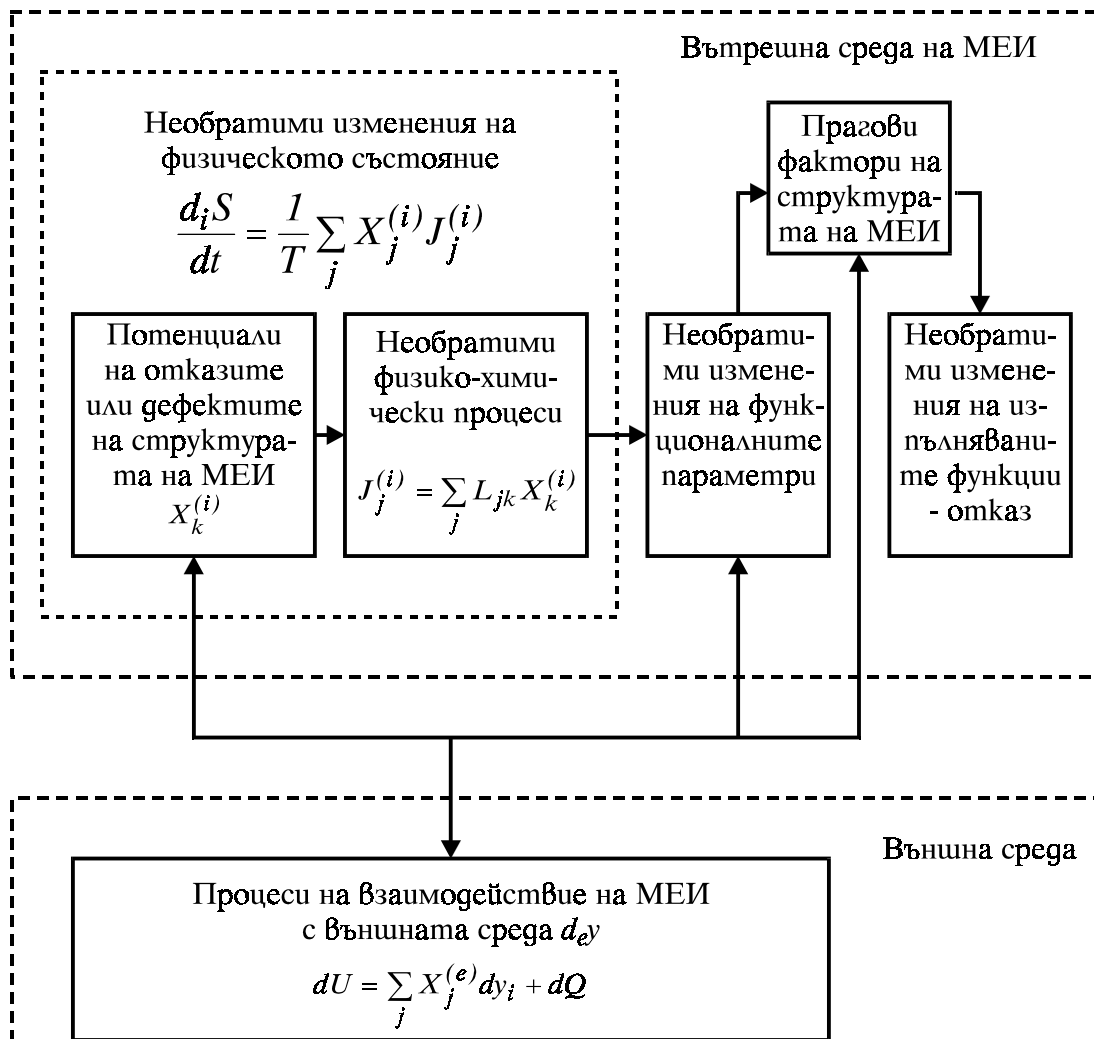
Параметрите в (7.38) и (7.37) са вътрешни параметри на системата за разлика от съответните параметри в (7.36), макар съдържанието и формалните изрази да са еднакви.

Съгласно втория закон на термодинамиката $\delta(S) \geq 0$. Близко до състоянието на равновесие зависимостта между потоците и силите е линейна:

$$J_j^{(i)} = \sum_k L_{jk} X_k^{(i)}, \quad (7.39)$$

където L_{jk} — линейни феноменологични коефициенти.

Кинетичното уравнение (7.48) се конкретизира в задачите от локален тип. Например при анализ на причините и механизмите на отказите и във физико-статистическите модели на надеждност. В този случай се използват конкретни кинетични уравнения от типа уравнения на химически реакции, дифузии и допълнителни уравнения от типа уравнението на Арениус.



Фиг. 7.10. Термодинамичен модел на формиране на откази в МЕИ.

В качеството си на основна причина за необратимите процеси $J_j^{(i)}$ или за изменение на състоянието $d_j y$, величината $X_k^{(i)}$ образува в общия смисъл дефектите на структурата на МЕИ. Те могат да бъдат определени като обобщени потенциали на отказите, ако се приеме потенциала като движеща сила на някакъв физически процес. Тогава общият термодинамичен модел на МЕИ може да се представи във вид на схеми за формиране на отказите или модели на вътрешните процеси, взаимодействащи с външната среда (фиг. 7.10).

Разбира се, не всеки потенциал на конкретния обект в определени условия ще се прояви непосредствено във формата на отказ. В този смисъл потенциалите на отказите характеризират потенциалната ненадеждност на МЕИ. Потенциалите на отказите имат двойствен характер. Първо това са непосредствено нееднородностите на структурата и второ това са нееднородностите, възникващи в структурата

на обекта в резултат на външно въздействие или в процеса на функциониране.

Целесъобразни начини за представяне на термодинамичните модели за такава сложна система каквато е МЕИ са локалните и интегралните представяния. Всички физико-технически методи за неразрушаващ контрол или локална диагностика използват локални модели и се основават на оценка на интензивните термодинамични параметри от различна физическа природа (структурни, топлинни). Интегралните термодинамични модели включват представяне на съвкупност физически характеристики за потенциалната ненадеждност по видове дефекти.

Универсалният характер на термодинамичните модели дава принципни възможности за практическото им прилагане в диагностиката и надеждността на широк клас промишлени изделия.

7.7. Прогнозиране на надеждността в различни етапи на времето на живот на МЕИ

Методите за прогнозиране на надеждността зависят от разглеждания етап на времето на живот на МЕИ, обема на изходната информация и ефективността на модела на надеждност. Прието е прогнозирането на надеждността да се прилага за етапите на проектиране, производство и експлоатация на МЕИ.

Отделно взети методи за прогнозиране не могат да решат целия проблем на оценката и осигуряването на надеждността, свързана с времето на живот на МЕИ. Затова изследванията са в посока на създаване на комплекс от методи, които да отразяват спецификата и задачите на прогнозирането през всеки етап. Изборът на конкретен метод от табл. 7.11 зависи от характера на изходните данни, изпитвателното и измервателното оборудване и от наличието на необходимите ЕИМ.

Целта при определянето на надеждността на етапа на проектиране е да се оцени възможността да се удовлетворят изискванията по надеждност на разработваното МЕИ и да се избере конструктивно-технологично и схемотехническо решение за изготвянето му.

Табл. 7.11. Методи за прогнозиране на надеждност на МЕИ.

Метод за прогнозиране	Изходни данни за прогнозиране	Прогнозиран показател на надеждност
-----------------------	-------------------------------	-------------------------------------

АНАЛИТИЧНО ПРОГНОЗИРАНЕ

Напълно нарушена работоспособност на елементите на МЕИ	$\lambda(t)$ на елементите и надеждностен модел на МЕИ	$P(t)$ и T_{cp}
По изменението на параметрите на елементите на МЕИ	$F(x)$ на електрическите параметри на елементите и зависимостта между изходните параметри на МЕИ и елементите им	Вероятност изходните електрически параметри на МЕИ да са в зададени граници при експлоатация
По физическия модел на надеждност на елементите на МЕИ	$F(x)$ на електрофизическите параметри на елементите на МЕИ и зависимостта между T_{cp} и електрофизическите параметри	T_{cp} на елементите и T_{cp} на МЕИ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО - СТАТИСТИЧЕСКО ПРОГНОЗИРАНЕ

Изпитване на готови МЕИ в условия, близки до експлоатационните	Очаквана $P(t)$, T_{cp} експлоатационни дестабилизиращи фактори	$P(t)$ на МЕИ, T_{cp} или $\lambda(t)$
Ускорени изпитвания на МЕИ: - за количествена оценка на надеждността	Очаквана $P(t)$, T_{cp} или $\lambda(t)$; ускоряващи фактори; коефициент на ускорение	$P(t)$, T_{cp} или (t)
- за сравнителна оценка на надеждността	$P(t)$, T_{cp} и дестабилизиращи фактори, определящи надеждността на еталонно МЕИ, с което се сравнява изпитваното изделие	Сравнителна стойност на $P(t)$, T_{cp} или $\lambda(t)$
- за оценка на надеждността по деградацията на информативните параметри на МЕИ	Информативни параметри и функционалното им разпределение; дестабилизиращи фактори; характерна деградация на параметрите и брой дефектни МЕИ	Вероятност за намиране на изходните електрофизични параметри на МЕИ в зададени граници през време на експлоатация

СТАТИСТИЧЕСКО ПРОГНОЗИРАНЕ НА МЕИ С ЕИМ

Метод Монте-Карло: - по изходни параметри на МЕИ и механизмите на отказ на елементите	Функционална връзка между отработките до отказ и електрофизическите параметри; $F(x)$ на същите параметри; механизми на отказите	Отработка до отказ или $\lambda(t)$
- по изходни електрически параметри на МЕИ	Функционална връзка между изходните електрически параметри на МЕИ и $F(x)$ на електрическите параметри	Вероятност изходните електрически параметри на МЕИ да се намират в зададени граници при експлоатация

Разпознаване на образи по изходни електрически параметри на МЕИ	на елементите на МЕИ Генерална съвкупност образци, съответстващи на експерименталните стойности на времето за безотказна работа	плоатация Отработка го отказ; $P(t)$
ПРОГНОЗИРАНЕ ПРИ ИЗПОЛЗУВАНЕ НА ТЕСТОВИ СТРУКТУРИ (ТС) ИЛИ ТЕСТОВИ МЕИ		
Аналитично прогнозиране на надеждност	Надеждностен модел на МЕИ; показатели на надеждност на ТС [$P(t)$ или $\lambda(t)$]	$\lambda(t)$, $P(t)$, отработка го отказ
Експериментално прогнозиране на надеждност по ТС	Модел на надеждност на МЕИ; очаквано ниво на надеждност на МЕИ; функционална връзка между отработките го отказ на ТС и дестабилизиращите експлоатационни фактори	Отработка го отказ или $P(t)$
Експериментално прогнозиране на надеждността на тестовите структури	Състав и функционална сложност на МЕИ; очаквана прогнозирана надеждност; експлоатационни дестабилизиращи фактори	$P(t)$, $\lambda(t)$, отработка го отказ
ПРОГНОЗИРАНЕ ЧРЕЗ КОНТРОЛ НА ТЕХНОЛОГИЧНИЯ ПРОЦЕС		
Контрол на стабилността на технологичния процес	Прогнозирано ниво на надеждност; видове и механизми на дефектите на операционния контрол, определящи надеждността; статистика на разпределението на дефектите; запас на устойчивост на елементите на МЕИ към експлоатационните и технологичните дестабилизиращи фактори	Вероятност за безотказна работа по известни механизми на отказите; $\lambda(t)$
Контрол на рангемана от основните технологични операции	Прогнозирано ниво на надеждност; зависимост на рангемана от контролираните параметри при операционен контрол; експериментални данни за надеждността на МЕИ, корелирани с рангемана	$P(t)$ и $\lambda(t)$
Непрекъснат контрол на качеството на технологичния процес	Прогнозирано ниво на надеждност; показатели на качеството на технологичния про-	$P(t)$, $\lambda(t)$ по известни контролируеми механизми на дефекти

Оценките на надеждността носят предварителен характер с редица допускания и принципно могат да бъдат отнесени към аналитичните методи за оценка на надеждността по пълни откази, при които се използва априорна информация за интензивностите на отказите на елементите на МЕИ и на физическите модели за надеждност.

Уравнението на проектната интензивност на отказите λ_p , отчитащо всички фактори и елементи на ненадеждност има вида:

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^k \lambda_{ci} \alpha_c D_c + \sum_{j=1}^n \lambda_j \xi_j D_j, \quad (7.40)$$

където λ_{ci} е интензивността на отказите на корпуса на МЕИ при i -режим на изпитване (експлоатация); k — брой на режимите на изпитване (експлоатация); α_k — коефициент, който зависи от външния въздействащ върху корпуса фактор; λ_j — интензивност на отказите на j -елемент на ненадеждност на МЕИ; j — номер на елемента на ненадеждност; n — брой на елементите на ненадеждност; ξ_j — коригиращ коефициент на качеството, отчитащ контролируемостта на j -елемент на ненадеждност на МЕИ; α_j — коефициент, който отчита външните въздействия върху j -елемент на ненадеждност; D_k, D_j — прогнозираните коефициенти, които отчитат динамиката на повишаване на надеждността на корпуса и съответно на надеждността на j -елемент. Последните коефициенти се определят в резултат на анализа на априорните данни в производството от предшестващи години.

При предварителното определяне на надеждността е необходимо да се отчитат всички елементи на конструкцията и технологията като елементи на ненадеждност. Тези елементи се разглеждат като последователно свързани, така че отказът на всеки един от тях води до отказ на МЕИ. Тогава прогнозираната интензивност на отказите за k на брой елементи на ненадеждност на МЕИ ще бъде:

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^k \lambda_i. \quad (7.41)$$

Ако за дадения етап са напълно известни принципната схема, топологията и всички конструктивно-технологични решения, определянето на надеждността може да се осъществи по внезапни и по параметрични (плавни) откази.

При съставяне на модела за надеждност на МЕИ по внезапни отка-

зи трябва да се анализира свързването на всички елементи на МЕИ в схемата на надеждност: последователно, паралелно или паралелно-последователно свързване.

$$P_s(t) = \prod_{i=1}^k P_{i_s}(t) \text{ — за последователно свързване;} \quad (7.42)$$

$$P_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_{i_p}(t)] \text{ — за паралелно свързване;} \quad (7.43)$$

$$\left. \begin{aligned} P_s(t) &= \sum_{j=1}^m P_{i_s}(t), \\ P_{ps}(t) &= P_p(t)P_s(t) \end{aligned} \right\} \text{ — за паралелно-последователно свързване.} \quad (7.44)$$

След това се извършва оценка на вероятността за безотказна работа на МЕИ:

$$P(t) = \prod_{\varphi=1}^l P_{\varphi_{ps}}(t), \quad (7.45)$$

където l е броя на схемите с паралелно-последователно свързване на елементите на ненадеждност в МЕИ; $P_{\varphi_{ps}}(t)$ — вероятността за безотказна работа на j -схема с паралелно-последователно свързване на елементите на ненадеждност.

Следващо уточняване на оценката за надеждността се провежда, когато е избран типа на корпуса, метода за закрепване на чипа към корпуса, режимите и условията на работа на елементите в състава на МЕИ. При това уточняване се използват редица коригиращи коефициенти за отчитане на: електрическото натоварване, механичните натоварвания, температурата на околната среда, други външни въздействия, нивото на качеството и др.

Определянето на параметричната надеждност е целесъобразно да се извършва на етапа на техническо проектиране (с изчислителни методи) и на етапа на производство (с експериментални методи).

В общ вид методите за определяне на параметричната надеждност се базират на теорията на допуските [9]. Същността им се свежда до установяване на допуски на елементите и компонентите на МЕИ, които осигуряват зададена точност на изходните електрически параметри. Такава задача се решава като се прави математическо описание на точността на изходния параметър на МЕИ, съгласно което уравнението на грешката за изходния електрически параметър U има вида:

$$\Delta U/U_0 = \sum_{i=1}^n A_i \Delta U_i/U_{i0}, \quad (7.46)$$

където U_0 и U_{i0} са изчисляваните „номинални“ стойности на изходния електрически параметър на МЕИ и елементите му; $\Delta U/U_0$, $\Delta U_i/U_{i0}$ — съответно относителните отклонения от номиналите на изходния електрически параметър на МЕИ и i -параметър на елемента; n — брой на схемните и топологичните елементи на МЕИ; A_i — коефициент, който отчита влиянието на i -параметър на МЕИ. Посоченото уравнение се решава за всички изходни електрически параметри на микроелектронните изделия.

Прогнозирането на експлоатационните допуски се извършва чрез сумиране поотделно на положителните и отрицателните средни стойности $M_{N_{\pm}}$ на температурните допуски и допуските за стареене и влага спрямо средната стойност на производствения допуск $M_{N_{np}}$. Отначало се определя средната стойност на полето на разсейване на грешките:

$$M_{N_{\pm}} = M_{N_{np}} \pm \sum_{i=1}^n M_{N_{i\pm}}. \quad (7.47)$$

После чрез квадратично сумиране на случайните грешки, които представляват половината от полето на допуск се намира сумарното поле на разсейване на грешките:

$$\delta_N = \left(\sum_{i=1}^n \delta^2_{N_i} \right)^{1/2}. \quad (7.48)$$

Накрая се определя сумарното поле на разсейване на грешките:

$$\omega = \Delta = v \left[\left(M_{N_+} + \delta_N \right) \dots \left(M_{N_-} - \delta_N \right) \right], \quad (7.49)$$

където v е коефициент на запас за параметрите, които се променят под въздействието на дестабилизиращите фактори. На практика $v = 1,05 \div 1,2$; M_{N_+} , M_{N_-} — съответно сумите на положителните и отрицателните средни стойности. Според прогнозираното сумарно поле на разсейване се определят експлоатационните допуски на параметрите на МЕИ.

Прогнозирането на надеждността в условията на производство трябва да предвиди гаранции, че технологичният процес няма да внесе допълнителни потенциални дефекти, които да намалят проектното ниво на надеждността. Тук задачата се свежда (с преки или косвени методи) до оценка на проектната надеждност.

Класическите статистически методи за изпитване нямат практическа стойност при оценка на надеждността на ГИС при производст-

во. Това е така, защото изпитвателното и измервателното оборудване е твърде сложно и надеждността му е съизмерима и дори по-ниска от надеждността на изпитваните ГИС. Така достоверността на резултатите от изпитванията може да се окаже много ниска.

Известно е, че

$$\lambda_{изп} = \lambda_{ИС} + \lambda_{об}, \quad (7.50)$$

където $\lambda_{изп}$ е интензивността на отказите, получена при изпитването на интегралните схеми; $\lambda_{ис}$ — изследваната интензивност на отказите на схемите; $\lambda_{об}$ — интензивност на отказите на изпитвателното и контролно-измервателното оборудване.

Ако $\lambda_{об} \ll \lambda_{ис}$ то може да се приеме, че $\lambda_{ис} \approx \lambda_{изп}$, а при $\lambda_{об} \geq \lambda_{ис}$ изпитването губи смисъл.

Показаните в табл. 7.11 методи за прогнозиране на надеждността имат своите преимущества и недостатъци. Най-перспективни за целта са:

— методите за индивидуално прогнозиране чрез непрекъснат контрол на видовете и на механизмите на дефектите;

— физико-техническите методи, усъвършенствани по отношение на чувствителност, точност и автоматизация на измерванията и обработката на резултатите;

— изчислителните методи за прогнозиране, основани на анализа на информативните параметри;

— методите за моделиране и стимулиране развитието на механизмите и видовете дефекти (откази);

— методите, основани на деградацията на електрофизическите параметри на структурата на МЕИ и изходните му електрически параметри с прилагане на тестови структури и схеми;

— методите за разпознаване на образи (основани на анализа на комплекс от информативни параметри).

Резултатите от прогнозирането на надеждността от етапа на експлоатация се използват за нови аналогични разработки на МЕИ, за коригиране на документацията за експлоатацията и за подготовка на справочни данни за надеждността. По наблюдавани откази за всеки j -режим на експлоатация (или съхраняване) може да се определи статистическата стойност на средната отработката до отказ по следната формула:

$$\bar{t}_j = \left(1/N_j\right) \sum_{i=1}^{N_i} t_{ij}, \quad (7.51)$$

където N_j е броя на изделията, които са отказали при j -режим на експлоатация; t_{ij} — продължителност на работа на i -изделие при j -режим на експлоатация.

Средната отработка до отказ е:

$$\bar{t} = (1/k) \sum_{j=1}^k \bar{t}_j, \quad (7.52)$$

където k — брой на разновидностите на режимите на експлоатация.

Тук основната задача е да се разработват надеждни МЕИ от елементи с ограничена надеждност. Основните насоки при проектиране на подобни МЕИ са:

- въвеждане на функционално и структурно резервиране;
- използване на самокоригиращи се кодове на Хеминг при обработка на дискретна информация;
- използване на принципно нов подход при приемане, предаване, съхраняване, преобразуване и логическа обработка на информацията (аналогично на живите системи) при автоматично регенериране на отказалите части на системата.