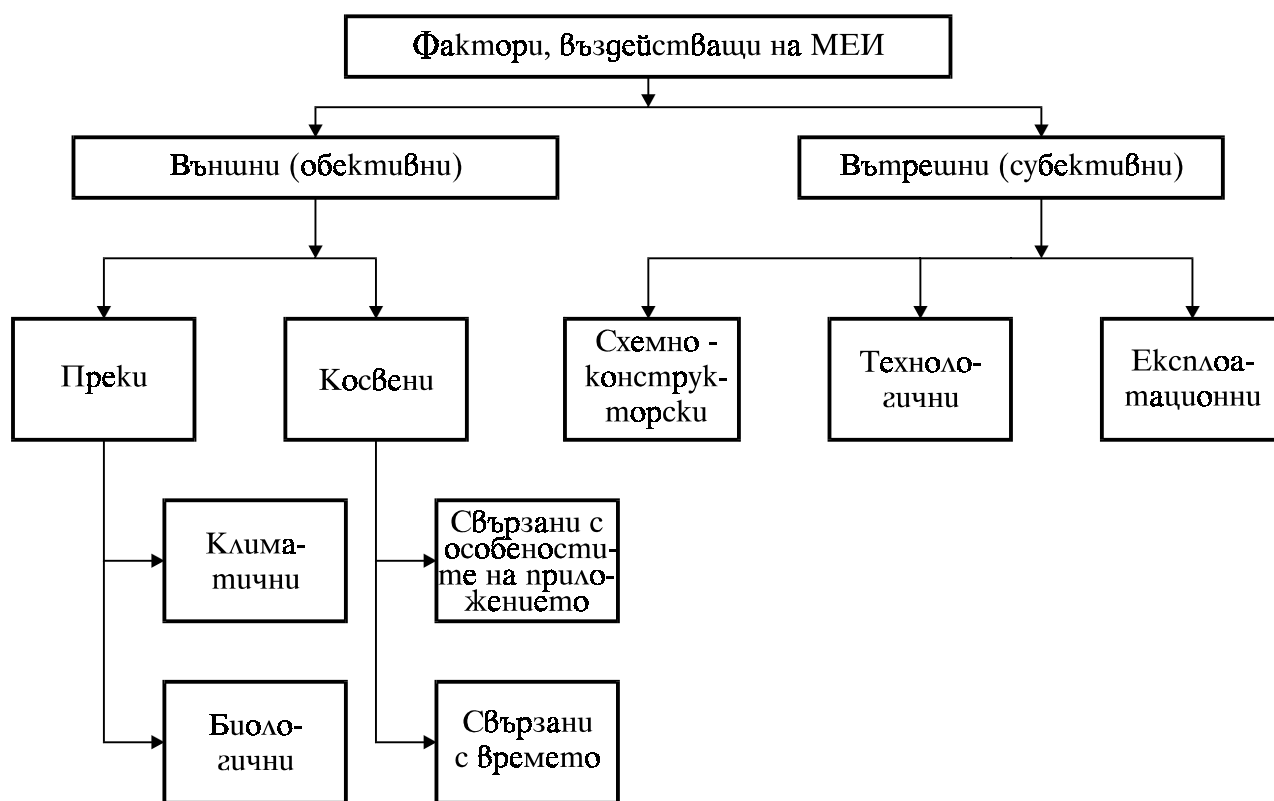


## 2. ТЕХНОЛОГИЧНИ И ЕКСПЛОАТАЦИОННИ ФАКТОРИ ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ НАДЕЖДНОСТТА НА МЕИ

### 2.1. Зависимост между показателите на надеждността и качеството на технологията на МЕИ

За да работят безотказно МЕИ трябва да издържат на измененията предизвикани от въздействието на разнообразни фактори, които е прието да се разделят на две групи: обективни или външни и субективни или вътрешни (фиг. 2.1). Влиянието на околната среда и условията на експлоатация се отнасят към външните фактори. Климатичните фактори включват явленията от въздействието на температурата, влагата, налягането на работната среда (въздух), радиация, прах. Биологичните фактори се обуславят от действието на гъби, микроорганизми, плесени.

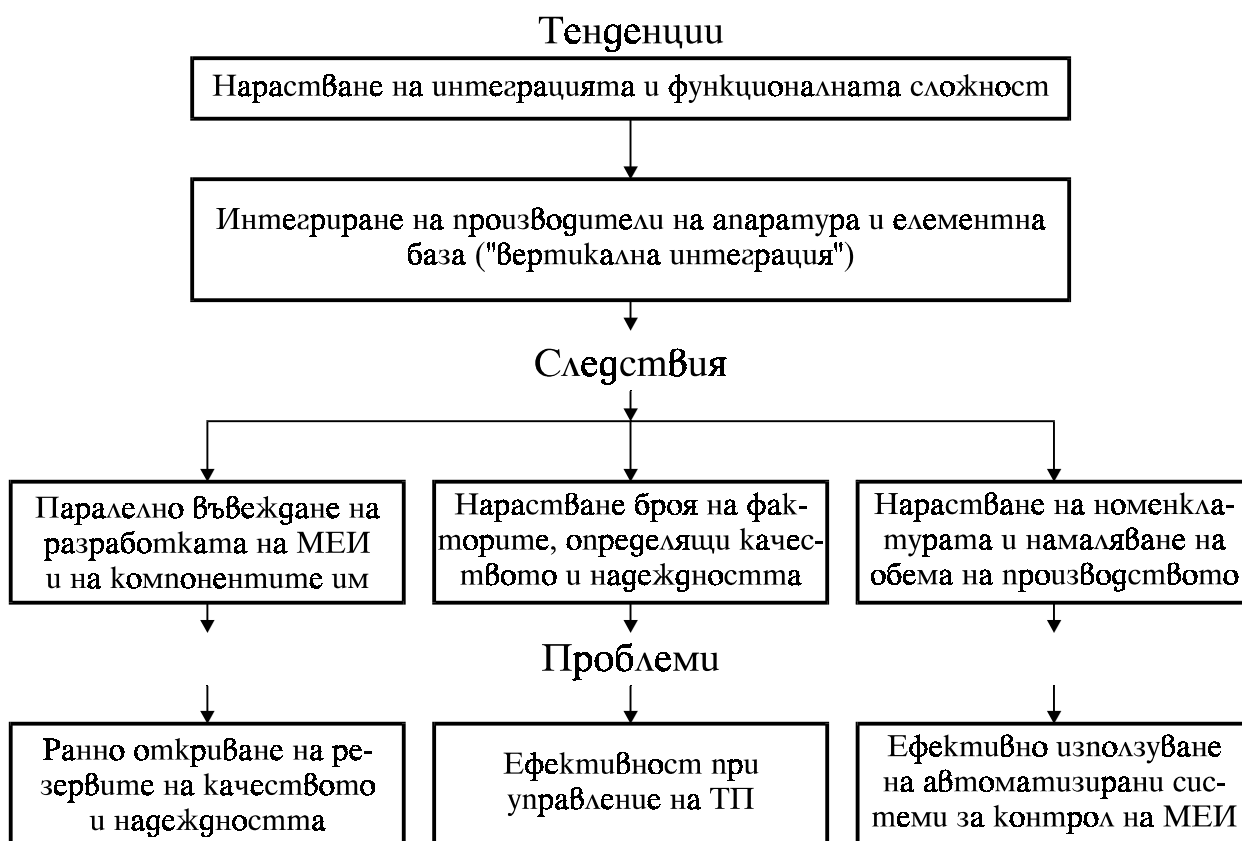


Фиг. 2.1. Видове фактори, въздействащи на надеждността на МЕИ.

Факторите свързани с особеностите на приложение се обуславят от въздействието на механичните натоварвания, температура, влага, радиация и въздействието на други изделия т.е. от условията зависещи

от обекта, в който се експлоатират МЕИ: автомобили, самолети, битова техника и т. н. Факторите свързани с времето са тези, които се отнасят до износване и стареене (например стареенето се форсира от въздействието на климатичните фактори). Субективните фактори са свързани с дейността на човека в процеса на проектиране, производство и експлоатация на МЕИ.

Надеждността на МЕИ зависи в голяма степен от точността, стабилността на технологичния процес и от ефективността на междооперационния контрол. Производството на МЕИ се базира на групови технологични операции, където бракът от някоя операция прави безполезни всички предшестващи я операции. Затова се поставят високи изисквания не само към материалите и оборудването за производство на МЕИ, но и технологията, за да се осигури възпроизводимост на всички режими на технологичните операции.



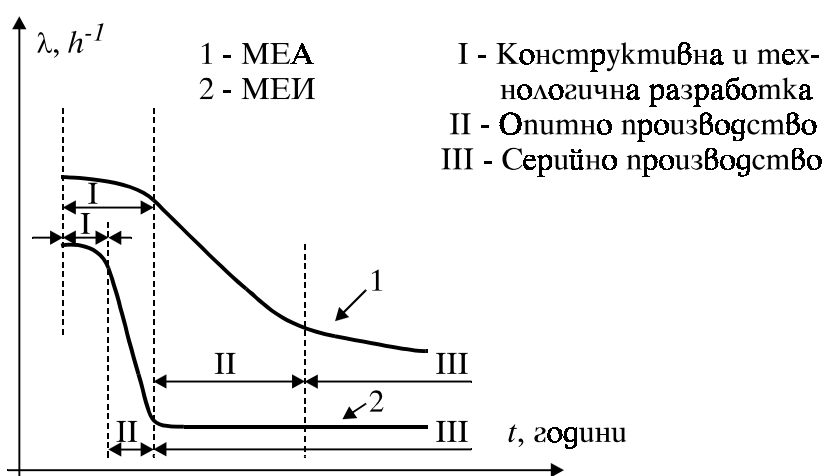
Фиг. 2.2. Основни тенденции и произтичащите от тях следствия и проблеми при осигуряване на качеството и надеждността на съвременните МЕИ.

Същевременно без информация за ролята на всяка операция във формиране на крайното ниво на качеството и надеждността на изделието не е възможно ефективно управление на технологичния процес (ТП).

Основните тенденции, произтичащите от тях следствия и проблеми при разработка и експлоатация на високонадеждни МЕИ са представени на фиг. 2.2. Тенденцията на „вертикална интеграция“ обективно повишава възможността за възникване на откази в МЕИ. Тя се изразява в паралелна работа по разработката на МЕИ и микроелектронната апаратура (МЕА), в която ще се използват.

Интензивността на откази на МЕИ (съответно на МЕА) зависи от етапа на усвояването им в производството фиг. 2.3. С най-висока интензивност на отказите са изделията, които не са преминали през етапа на опитно производство.

Необходимо е също да се отчита и взаимната връзка между надеждността на МЕИ, конструкцията и физическите им елементи. На първо място са нивото на интеграция и размерите на елементите.



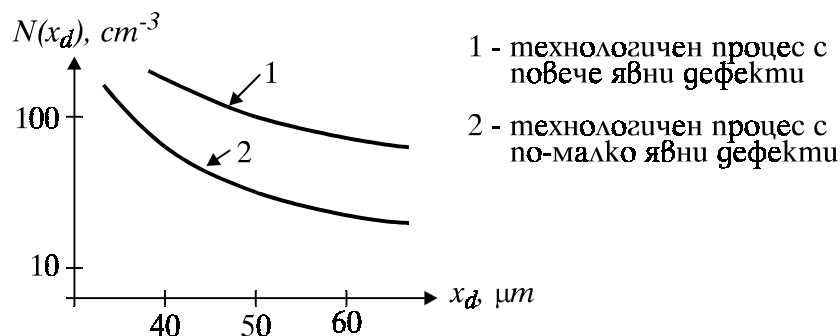
Фиг. 2.3. Зависимост на интензивността на отказите на МЕИ и МЕА от етапа на усвояване в производството.

Оценка на надеждността на МЕИ може да се извърши чрез контролиране качеството на технологичния процес. При такъв подход се оценяват показателите за безотказност чрез информативните показатели на качеството на технологията. Физическите причини, обуславящи съществуването на корелация

между показателите за безотказност и показателите на технологичните процеси при изготвяне на МЕИ са следните:

1. При достатъчно точен и стабилен технологичен процес както показателите за качеството на технологията (например рангемана), така и показателите за безотказност на елементите на МЕИ силно зависят от вида (повърхностни, структурни), размерите и плътността на дефектите в структурата на МЕИ [23]. Дефектите могат да бъдат явни, за които се предвиждат специални методи и средства за откриването им или пък скрити. Явните се откриват при контрол и определят технологичните загуби в производството. Докато скритите дефекти се проявяват по време на експлоатация и така характеризират показателите на надеждността на МЕИ.

2. Разделянето на дефектите на явни и скрити е условно. Изборът зависи от това какъв критерий за отказ на МЕИ ще се избере. Зависи също и от разрешаващата способност на използваните при контрола методи и технически средства.



Фиг. 2.4. Разпределение на плътността на повърхностните дефекти по техните размери в ИС при два еднотипни технологични процеса.

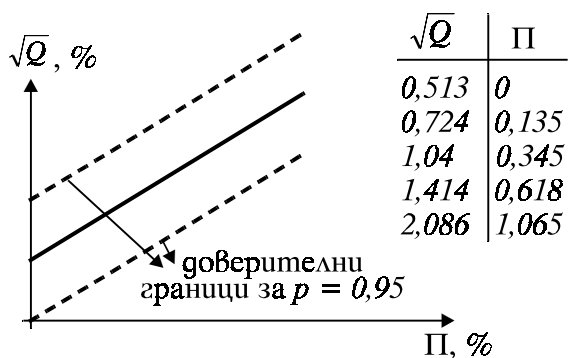
3. Между двата вида дефекти съществува тясна корелационна връзка, което е илюстрирано на фиг. 2.4. Например графика (1), която е за изделие с висока плътност на явните повърхностни дефекти има и висока плътност на скритите дефекти. Това естес-

твено води до намаляване на надеждността на елементите на МЕИ и до намаляване на корелацията на показателите им за безотказност.

При проведена експериментална проверка с тънкослойни резистивни матрици [32] е получено уравнение на регресия за статистическата вероятност за откази ( $Q$  %) и процента на технологичните загуби ( $\Pi$ ):

$$Q = (0,519 + 1,47\Pi)^2.$$

Тясната корелационна връзка между рангемана и надеждността е експериментално потвърдена като данните са показани на фиг. 2.5.



Фиг. 2.5. Регресионна зависимост на вероятността за откази  $Q$  на тънкослойни резистори от технологичните загуби  $\Pi$ .

Като се има пред вид нестационарността на технологичния процес и съществуването на субективна оценка на резултатите от качествения контрол този подход се реализира трудно. Той се оказва особено подходящ за приблизителна оперативна оценка в процеса на производство на надеждността на МЕИ с конкретно конструктивно-технологично изпълнение. По-перспективно е използването на априорен подход за оценка на показателите за безотказност на МЕИ чрез

показателите за качеството на технологичния процес и следваща ста-

мистическа оценка на надеждността.

При разработката на методика за оценка на показателите за надеждността на МЕИ се използват физически модели на реални тестови структури. Това се извършва след познаване и отчитане на информативните показатели на производствените процеси. Като информативни параметри се избират корелационни съотношения или коефициенти на корелация.

## 2.2. Класификация на въздействащите фактори в процеса на експлоатация

През етапа на експлоатация на МЕИ външните въздействия се проявяват в комплексен вид. Те могат да се разделят на две основни групи: въздействия, предизвикващи незабавна ответна реакция на МЕИ и въздействия, предизвикващи натрупваща се реакция на МЕИ. Класификация на външните въздействия, проявяващи се при експлоатацията на МЕИ е представена на фиг. 2.6. Към първата група външни въздействия се отнасят различните видове излъчвания, механичните, топлинните и електрическите натоварвания и др. Към втората група се отнасят въздействията на различните климатични фактори.

За оценка на способността на МЕИ да се противопоставя на външните въздействия се използват следните характеристики:

— *трайност* — способност на МЕИ да изпълнява своите функции и да запазва параметрите си в допустими граници след въздействие на един или повече външни фактори;

— *устойчивост* — способност на изделието да функционира и да запазва своите параметри по време на и след външно въздействие.

Примерни изисквания към интегрални схеми за устойчивост [32] са представени в табл. 2.1.

МЕИ трябва също надеждно да работят:

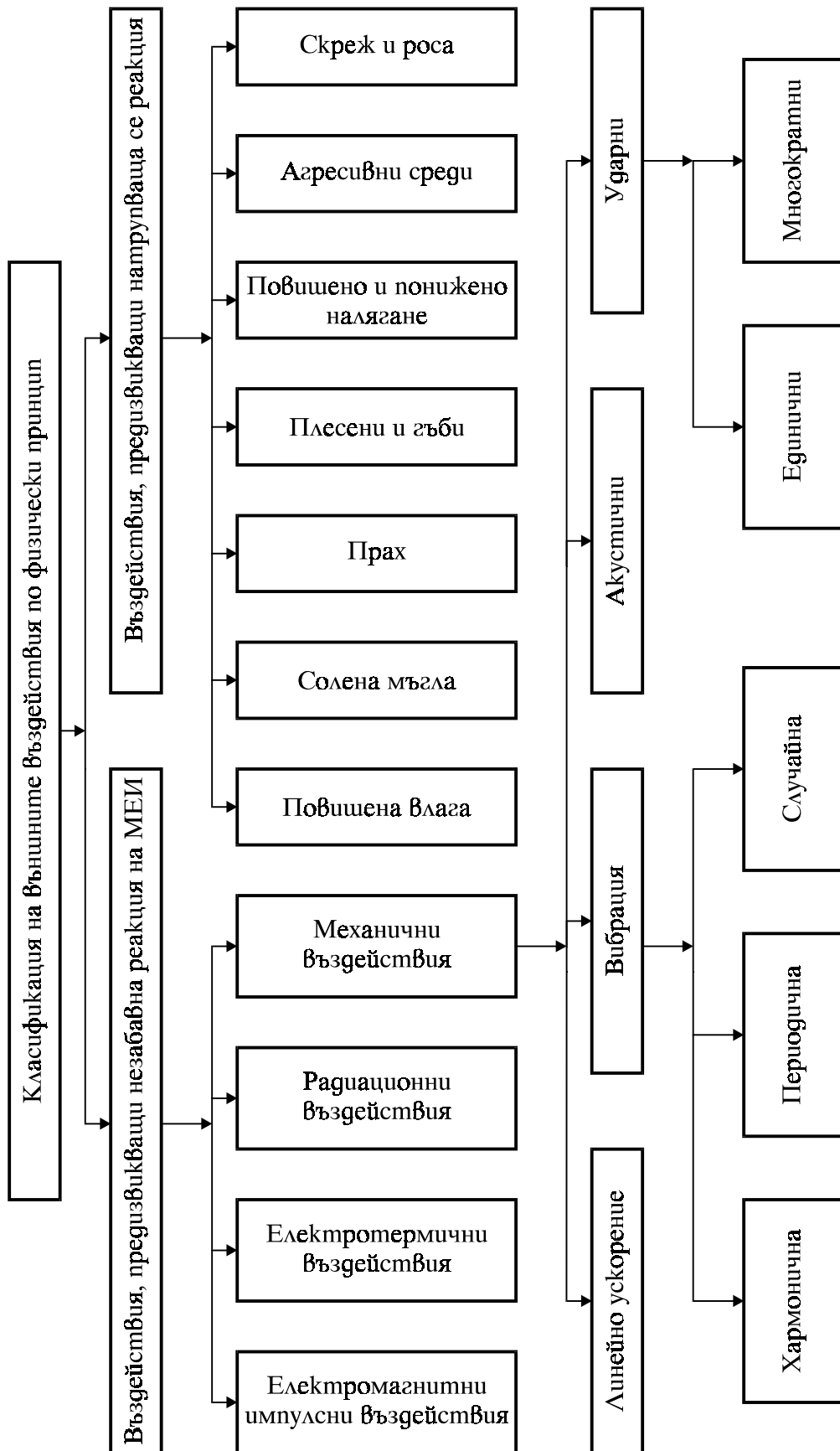
1) — в различни газове среди: инертни газове; смес в произволни съотношения на азот и въздух; газове смеси (кислород до 50%; хелий до 1%; азот до 40%; въглероден двуокис до 3% и др.);

2) — в условия на постоянни магнитни полета с напрегнатост до 8000,  $A.m^{-1}$ ;

3) — в импулсни магнитни полета с честота 50, 400, 500  $Hz$  и напрегнатост на магнитното поле 80  $A.m^{-1}$ ;

4) — при въздействие на електромагнитни импулси с напрегнатост на електрическото поле до 100  $kV.m^{-1}$ ;

5) — при въздействие на акустични шумове до 130 *dB* в обхват на честотите от 50 до 10 000 *Hz*.



Фиг. 2.6. Видове външни въздействия, проявяващи се при експлоатация на МЕИ.

Табл. 2.1. Изисквания за устойчивост на ИС при въздействие на различни механични и климатични експлоатационни фактори.

Изисквания за устойчивост на механични фактори	Групи на експлоатация	
	I	II
Синусоидална вибрация: — диапазон на честоти, $Hz$ — амплитуда на ускорение, $m.s^{-2}$	1 ... 3000 200	1 ... 5000 400
Механичен удар с многократно действие: — пиково ударно ускорение, $m.s^{-2}$ — продължителност на ударния импулс, $\mu s$	1500 1 ... 3	1500 1 ... 3
Механичен удар с еднократно действие: — пиково ударно ускорение, $m.s^{-2}$ — продължителност на ударния импулс, $\mu s$	10000 0,2 ... 1	10000 0,2 ... 1
Линейно ускорение, $m.s^{-2}$	2000	5000
Изисквания за устойчивост на климатични фактори	Групи на експлоатация	
	I	II
Температура на околната среда, $^{\circ}C$	-60 ... +125	-60 ... +125
Относителна влажност при $+35^{\circ}C$ без кондензация на влагата, %	98	98
Повишено налягане на околната среда, $kPa$	294	294
Понижено налягане на околната среда $10^{-4} Pa$	1,33	1,33

На фиг. 2.7 е дадена класификация на факторите, характеризиращи условията от външната среда за МЕИ. Те могат да се разделят на две групи. Първата група включва онези условия, характеристиките на които се определят от въздействието на естествени климатични и метеорологични фактори. Към втората група принадлежат условията, чиито характеристики са свързани с въздействието на изкуствени обстоятелства, предизвикани от действията на човека или влиянието на техническите устройства.

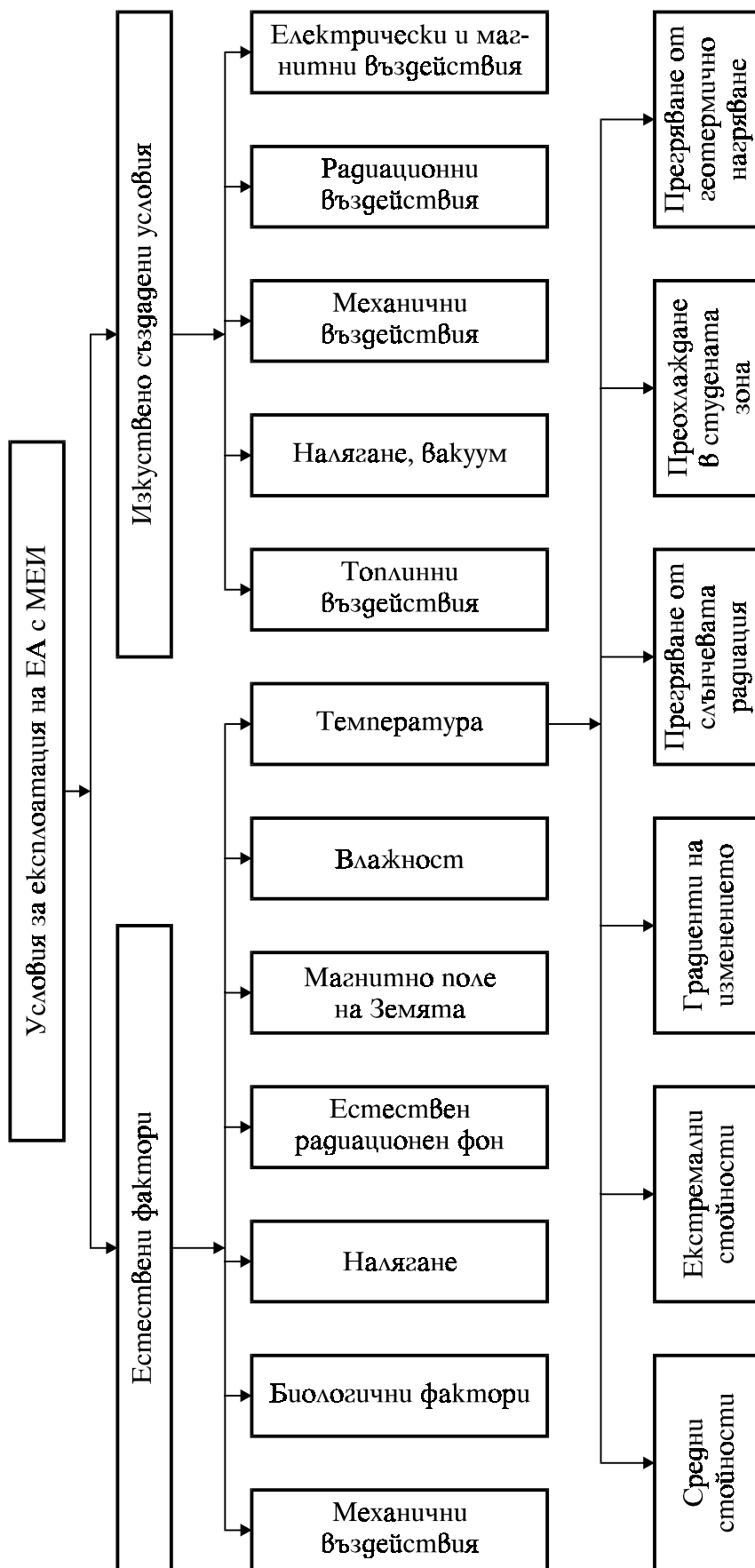
Такава класификация е удобна при уточняване на условията, в които трябва да бъде осигурена надеждността на МЕИ. Работоспособността на изделията може точно да се провери в конкретния район обикновено само при продължителни експлоатационни изпитвания.

Възможни са различни начини за задаване условията на работа при разработка на МЕИ.

Може да се задава разпределението на характеристиките на тези фактори по продължителност на тяхното въздействие или да се уговаря само възможната продължителност на въздействие на някои техни фиксирани стойности или техните интервали за всеки от режимите на експлоатация. Различията в начина на задаване условията на работа може съществено да повлияят върху избора на конструкция, парамет-



ри и характеристики на разработваните МЕИ.



Фиг. 2.7. Класификация на въздействащите фактори от външната среда за МЕИ.

Комплексът от въздействащи фактори, определящ условията на експлоатация на МЕИ има различна физико-химична природа, изменя се в широки граници и по различен начин влияе върху работоспособността и надеждността им.

## 2.3. Основни характеристики на експлоатационните въздействащи фактори върху работоспособността на МЕИ

### 2.3.1. Влияние на електрическите фактори

Всички основни параметри на МЕИ зависят от температурата, която оказва влияние на надеждностните характеристики. За осигуряване на висока надеждност е необходимо внимателно да се избират режимите на работа на МЕИ. Чрез рационалното разполагане на МЕИ в ЕА може да се предотврати нарушаване на топлоотвеждането.

Табл. 2.2. Стойности на потенциалите от натрупване на статично електричество в различен тип МЕИ.

Място на натрупване на статичен заряд и тип на МЕИ	Потенциал, от статичен заряд, $kV$	Критична потенциална разлика, $V$
Оператор върху дървен пог	0,8	—
Оператор върху пог с емайлирани плочи	25	—
МЕИ в пластмасов корпус	4 ... 20	—
МЕИ в апаратура без екран	6 ... 20	—
MOS ИС	—	10 ... 200
CMOS ИС	—	250 ... 2000
TTL ИС с ШД	—	250 ... 300
ECL ИС	—	500
Биполярен транзистор	—	250 ... 300
Тиристор	—	700 ... 1000

Значение за надеждната работа на МЕИ имат мерките за стабилизиране на захранващото напрежение. ИС изградени на MOS - структури са особено чувствителни към въздействието на статичното електричество. Независимо от неговия характер голяма част от конструктивните елементи на МЕИ са чувствителни към разсейваната мощност, свързана с протичането на разряден ток от статично електричество. За тези елементи е съществена продължителността, амплитудата и формата на импулса на разрядния ток, при определено съчетание на които се получава електрически пробив. В табл. 2.2 са дадени обобщени данни за стойностите на потенциалите, образувани в резултат на на-

трупване на статично електричество и критичната разлика в потенциалите на изводите на МЕИ с различна конструкция.

За осигуряване на висока надеждност е необходимо внимателно да се избират режимите, изключващи претоварване на отделните области на МЕИ.

### 2.3.2. Въздействия на климатичните фактори

Възможните резултати от въздействието на климатичните фактори при експлоатация на МЕИ [15] са показани в табл. 2.3.

Табл. 2.3. Възможни резултати от въздействието на някои климатични фактори при експлоатация на МЕИ.

Климатично въздействие	Възможни резултати от въздействието
Висока температура	Деградация и нестабилност на електрическите параметри; възникване на топлинен пробив в диелектрични области или в PN-преходи; разхерметизирване; изменение на механичните характеристики.
Висока влажност	Деградация и нестабилност на електрическите параметри; к.с. или прекъсване на метализацията; пробив в диелектрика на тънкослойни кондензатори; корозия на изводите и проводящите шини; нарушаване на защитни покрития.
Ниска температура	Деградация на електрическите параметри: к.с. и прекъсване; нарушаване на механичните характеристики.
Резки колебания на температурата	Деградация и нестабилност на електрическите параметри; к.с. и прекъсване на съединенията; загуба на херметичност; изменение на механичните характеристики.
Ниско или високо атмосферно налягане	Влошаване на топлообмена; поява на пълзящ разряд; пробиви на изолацията; нарушаване на херметичността; разрушаване на корпуса от механично въздействие.
Плесени и гъби	Корозия на изводите и на корпуса; загуба на херметичност; влошаване на електрическите параметри.

Нормалните климатични условия, които често се отъждествяват с лабораторни и са стандартизирани, са със следните параметри:

- температура  $(+25 \pm 10) \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- относителна влажност  $(65 \pm 10) \%$ ;
- атмосферно налягане  $(96 \pm 10) \text{ kPa}$ .

При установяване на изискванията към МЕИ за работа при топлинни въздействия се употребява термина *работна температура*. Това е температурата, която не трябва да предизвиква излизане на основни-

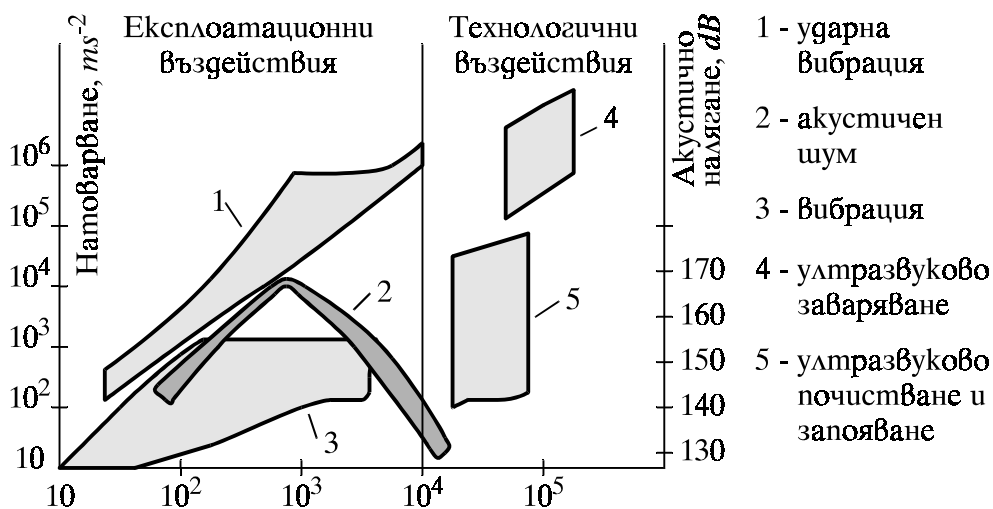
те параметри на изделието от допустимите граници. За топлинни пресмятания се работи с най-големите стойности на работния диапазон.

### 2.3.3. Механични въздействия върху МЕИ

При експлоатацията и транспортиране на ЕА и МЕИ последните се подлагат на динамични въздействия: вибрации, ударни, линейни и акустични претоварвания, честотните и амплитудните диапазони на които са твърде широки. Тези въздействия водят до нарушаване на режимите на работа и до механични повреди на МЕИ. Например мощността на акустични шумове от съвременен авиационен двигател с тяга от около  $6 \div 10$  тона е в границите на  $180 \div 220 \text{ kW}$ . Тези мощни колебания могат да предизвикат разрушаване на конструкцията и поява на откази в МЕИ.

Към МЕИ се поставят нови повишени изисквания, като устойчивост на хаотични вибрации и виброударни, удароустойчивост при нива на ускорение до  $80000 \div 120000 \text{ ms}^{-2}$ , устойчивост към въздействие на ултразвук.

На фиг. 2.8 в обобщен вид е представен диапазонът на ударните, вибрационните и акустичните въздействия, на които се подлагат МЕИ в състава на съвременната апаратура с различно предназначение.



Фиг. 2.8. Вибрационни и акустични въздействия на МЕИ при експлоатацията и производството им.

Нормативно-техническата документация съдържа изисквания по следните видове механични натоварвания: вибрация, удар, линейни натоварвания, акустични шумове.

Изделията с голяма повърхност, относително малка маса и слабо амортизирана конструкция са чувствителни към механични шумове. Примери за това са елементите с високи резонансни честоти като електронни лампи, вълноводи, магнетрони, кварцови резонатори, релета, мембранни МЕИ и др.

Реакциите на МЕИ към механични въздействия могат да се разглеждат като реакции на отделните им конструктивни елементи.

*Реакцията на корпуса* — обуславя деформация, вследствие вибрации или акустични въздействия и се проявява във вид на:

- механични напрежения с променлив знак в елементите на корпуса;
- изменение на диелектричните свойства и специфичното съпротивление на материала, натрупване на статичен заряд на изолационните елементи на корпуса;
- деградация на конструкцията на корпуса;
- деформации съгласувани с корпуса на елементите на вътрешната арматура и ПП чип.

*Реакцията на вътрешната арматура* се обуславя от деформацията на корпуса на МЕИ и се проявява във вид на:

- механични напрежения с променлив знак в елементите;
- механични колебания на елементите;
- деформация на ПП чип в местата на свързването му с елементите на вътрешната арматура;
- деградация на конструкцията на вътрешната арматура.

*Реакцията на активния елемент*, която се обуславя от корпуса на МЕИ и елементите на вътрешната арматура, се проявява във вид на:

- механични напрежения с различен знак на елементите на структурата на *p-n* прехода и полупроводниковия чип;
- деформация на проводящите елементи на повърхността на чипа, отслояване и прекъсване на проводящи слоеве;
- деформация на преходния слой между активния елемент и основата, отделяне на чипа от кристалогържателя;
- деградация на активния елемент на МЕИ, разцепване и разрушаване на кристала.

Едновременно с реакцията, имаща механичен характер е възможно да настъпи нарастване на нивото на електрическите шумове за сметка на токовете на клатещите се елементи и „размити“ волт-амперни характеристики на *p-n* преходите, поради тензочувствителност на полупроводниковия кристал.

#### *2.3.4. Влияние на радиационните въздействия*

Радиационните въздействия предизвикват както мигновени така и натрупващи се реакции в МЕИ. Сред съществуващите различни видове излъчвания най-голяма опасност за МЕИ представляват мощните електромагнитни излъчвания (спектъра им обхваща дължина на вълната от десетки хиляди метри до хилядни части от нанометъра) и частиците с висока енергия [16, 18]. Особено силно въздействие на МЕИ оказва рентгеновото излъчване и гама-лъчите. За количествено описание на последните две се използват физическите величини погълната доза лъчение  $D$  (в системата  $Si$  —  $J/kg$  или  $1rad = 0,01 J/kg$ ) и мощност на погълната доза  $PD_D$  (в  $Si$  —  $W/kg$  или  $1rad/s = 0,01 W/kg$ ).

Табл. 2.4. Погълната доза лъчение от една частица при различни компоненти на лъчението, попадащи на повърхността на силициево МЕИ.

Източник на въздействие	Енергия, $MeV$	Йонизиращо силиция лъчение ( $D [J/kg]$ )
Електрони	1	$3,8 \cdot 10^{-10}$
Неутрони	1	$2 \cdot 10^{-13}$
$\gamma$ -лъчи	1	$5 \cdot 10^{-12}$
Протони	10	$5 \cdot 10^{-9}$
$\beta$ -лъчи	14	$7,9 \cdot 10^{-12}$

Ефективно въздействие на МЕИ оказват заредените частици, такива като  $\alpha$ -частици (ядра на хелия), протони (ядра на водорода),  $\beta$ -частици (електрони) с енергия над  $10 keV$ , а също и неутрални частици — неутрони (бавни с енергия около  $0,025 keV$  и бързи —  $10 keV$ ), притежаващи висока проникваща способност. В табл. 2.4 са представени данни за погълнати дози от попадане на една частица на повърхността на МЕИ. Предполага се, че това е дозата, предизвикваща йонизиращо въздействие. Параметрите на ПП МЕИ (биполярни и MOS) започват да се изменят при погълнати дози около  $10^2 J/kg$ . За количествено описание на високоенергийните частици се използват такива физични величини като поток (в  $Si$  единицата е  $s^{-1}$ ) и плътност на потока на йонизиращите частици (в  $Si$  единицата е  $s^{-1}m^{-2}$ ).

Количественото описание на радиоактивното излъчване се изразява с физически единици, характеризиращи радиоактивността. Условно те се разделят на две групи: 1 — физически параметри на полето на радиоактивното излъчване и неговото въздействие върху веществото и 2 — физически параметри за оценка на количественото съдържание на радиоактивното вещество в материалите. Основните характеристики на

излъчването и техните дименсии са дадени в табл. 2.5. С горен индекс е означена принадлежността на всеки параметър към дадена група.

Табл. 2.5. Основни характеристики на радиоактивното излъчване, въздействащо върху МЕИ.

Характеристика	Формула	Означение
Поток на йонизиращи частици или кванти <sup>1</sup>	$\Phi = \frac{n}{S}$ [m <sup>-2</sup> ]	<i>n</i> — брой частици, кванти <i>S</i> — повърхност, m <sup>2</sup> ;
Плътност на потока частици или кванти <sup>1</sup>	$\varphi = \frac{\Phi}{t \cdot S}$ [s <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ]	<i>t</i> — време, <i>s</i>
Кинетична енергия на радиоактивно излъчване <sup>1</sup>	$E_D = q \cdot U$ [eV]	<i>q</i> — заряд на частицата, <i>C</i> <i>U</i> — потенциална разлика, <i>V</i>
Погълната доза лъчение <sup>2</sup>	$D = \frac{E_D}{m}$ 1 rad = 0,1 J/kg	<i>m</i> — маса на облъчваното вещество, <i>kg</i>
Мощност на погълнатата доза лъчение <sup>2</sup>	$P_D = \frac{\Delta D}{\Delta t}$ 1 rad/s = 0,01 W/kg	$\Delta D$ — увеличение на погълнатата доза за време <i>t</i>
Експозиция на рентгеново и $\gamma$ -лъчение <sup>1</sup>	$X = \frac{Q}{m}$ 1 R = 2,58·10 <sup>-4</sup> C/kg	<i>m</i> — маса на обема въздух на елемента, <i>kg</i> <i>Q</i> — сума на йоните с еднакъв знак, произведени във въздуха, когато всички електрони, освободени от лъчението в обема на елемента са спрени, <i>C</i>
Мощност на експозицията на рентгеново и $\gamma$ -лъчение <sup>1</sup>	$P_X = \frac{\Delta X}{\Delta t}$ 1 R/s = 2,58·10 <sup>-4</sup> A/kg	$\Delta X$ — увеличаване на експозицията за време $\Delta t$
Активност на радиоактивен нуклид	$A = \frac{N}{t}$ 1 Ci = 3,7·10 <sup>10</sup> s <sup>-1</sup>	<i>N</i> — брой на частиците от даден вид, излъчени от източника за време <i>t</i>

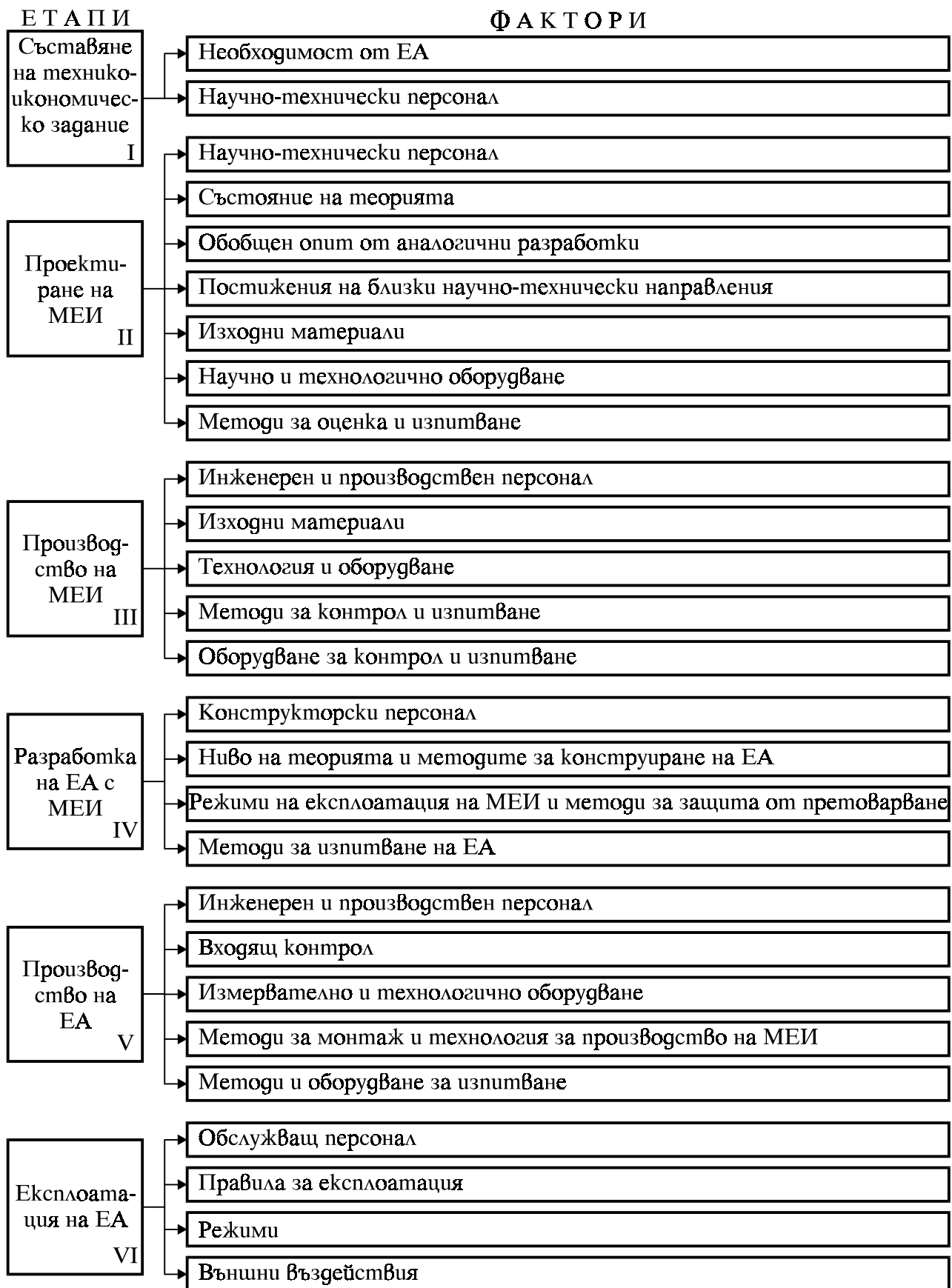
## 2.4. Влияние на конструктивно-технологичните фактори върху структурата на надеждността на МЕИ

Систематизирането на отделните въздействащи фактори, позволява да се схванат основните тенденции на влиянието им върху параметрите и надеждностните характеристики на МЕИ — фиг. 2.9.

МЕИ започва своето съществуване от момента на съставяне на техническите изисквания за него. Определящите фактори през този етап са: необходимостта от усъвършенстване на електронната апаратура; компетентността на специалистите, които я експлоатират и



разработват, правилната им оценка за необходимостта от създаване на ново МЕИ.



Фиг. 2.9. Въздействащи фактори през съответните етапи на времето на живот, характеризиращи надеждността на МЕИ.

Най-важен е обаче етапът на проектиране на МЕИ. През този отговорен етап се залагат освен физическите и електрическите параметри на МЕИ и надеждностните му характеристики, които определят по-нататъшното му приложение. През следващите етапи на времето на живот е вече невъзможно да се предприемат действия, подобряващи заложените при разработката му надеждностни характеристики. Следващи коригиращи конструктивни въздействия по същество са нова разработка, предизвикана от това, че някои от факторите на този етап не са били реализирани в пълен обем.

Най-високото постижение през етапа на производство на МЕИ е реализирането на всички заложи при разработката параметри и надеждностни характеристики.

Безотказната работа на МЕИ през време на тяхната експлоатация в значителна степен зависи от етапа на разработка на електронната апаратура. От правилния избор на МЕИ, режимите им на работа, методите за защита от всевъзможни претоварвания зависи успешното функциониране на ЕА и безотказността на използваните в конструкцията им МЕИ.

В най-добрия случай през етапа на производство на ЕА се реализират заложените надеждностни характеристики на МЕИ.

Изразходването на ресурса на МЕИ започва с провеждането на входящ контрол от потребителя им, с термо- и електротренировките, с монтажните операции и изпитванията на ЕА. Тук поради неправилно използване на МЕИ може в тях да възникнат откази или което е най-опасно да се формират скрити дефекти, които е възможно да се проявят като откази през следващи етапи.

Експлоатацията на МЕИ в състава на ЕА представлява заключителният и главен етап през времето на живот. Сега МЕИ изпълняват основните функции по своето предназначение. Сега определящи са спазването на съответните правила за експлоатация и режимите на работа. Ако предишните етапи са преминали при оптимални условия, режимите на експлоатация са такива, че ресурса на МЕИ да се изразходва икономично, а експлоатационните правила осигуряват висока надеждност при функциониране на МЕИ.

За обединяване на всичките тези етапи, които са свързани с проектирането, производството, изпитването, съхраняването и експлоатацията на едно МЕИ се въвежда условното понятие *време на живот*.

Системата вероятностни критерии, изложени в раздел 1.3, широко се използват за измерване на надеждността през отделните етапи от времето за живот на МЕИ. Такава една оценка не изисква анализ на

причините за възникване на откази и предизвиканите от тях последици.

За да се отчете природата на отказите и да се определят конструктивно-технологичните пътища за достигане на висока надеждност се предлагат други оценъчни критерии. Те се основават на прецизно изучаване на основните технически показатели на МЕИ, на анализа на схемните и конструктурските решения, изучаване режимите им на работа и най-важното на априорното изучаване на физиката на възможните откази. Изхождайки от това може да се приеме разширена класификация на отказите според причините за възникването им [11]:

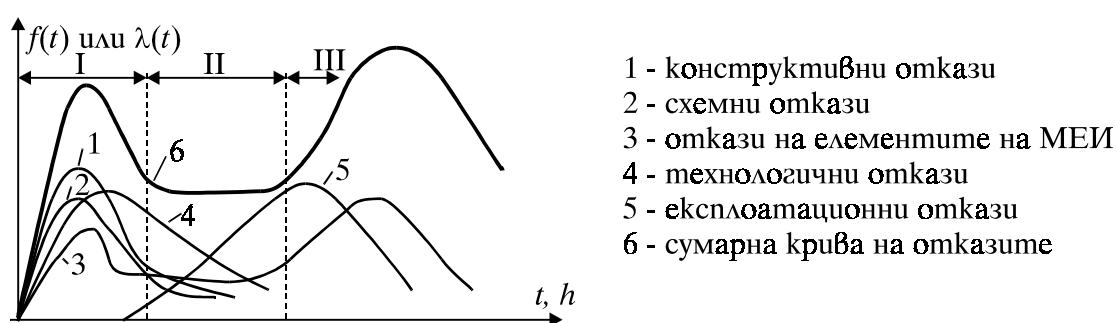
1. *Конструктивни откази* — възникващи поради несъвършенство на приетите конструкторски методи или в резултат на конструкторски грешки;

2. *Схемни откази* — обусловени от неправилно съставена структурна и функционална схема на МЕИ. Обикновено възникват поради грешка на проектанта или поради несъвършенство на използваните схемни решения.

3. *Откази на елементите на физическата структура* на МЕИ — дължащи се на недостатъчната надеждност на тези елементи или неправилния им избор в структурата на МЕИ.

4. *Технологични (производствени) откази* — възникват поради грешка при изготвянето на МЕИ, вследствие нарушение на установен технологичен процес или поради несъвършенство на приетата технология.

5. *Експлоатационни откази* — свързани са с невъзможността за правилно използване и обслужване на МЕИ по време на нормална работа, транспорт и съхранение.



Фиг. 2.10. Динамика на възникване на откази при експлоатация на МЕИ.

Динамиката на възникване на откази при експлоатация на МЕИ е показана на фиг. 2.10. Ясно се разграничават три фази в структурата на надеждността на МЕИ:

1. Надеждност на МЕИ през етапа на проектиране или *теоретична надеждност*. Тази фаза се обуславя от следните съставлящи: надеждност на конструкцията, на схемата и на физическите елементи в структурата на МЕИ и затова при експлоатация се проявява чрез първите три групи откази. Тя се определя в етапа на проектиране с помощта на математически модели (структурни или функционални) и аналитично или цифрово моделиране.

$$R(t)_{теор} = R(t)_k \cap R(t)_{сх} \cap R(t)_{ел} \quad (2.1)$$

2. Надеждност на изделията през етапа на производство или *техническа надеждност* — проявява се при експлоатация чрез технологичните откази.

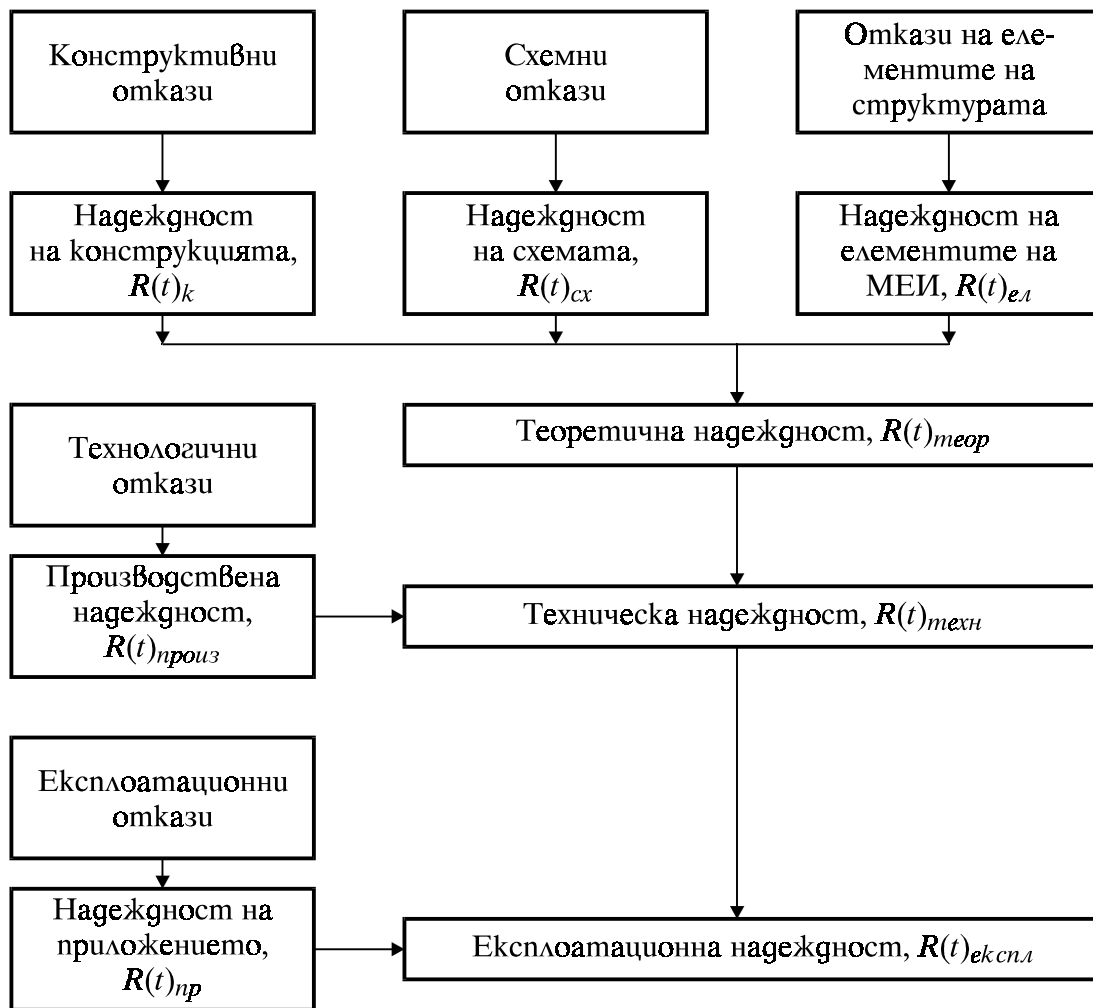
$$R(t)_{техн} = R(t)_{теор} \cap R(t)_{произ} \quad (2.2)$$

3. Надеждност на МЕИ през етапа на експлоатация или *експлоатационна надеждност*, проявяваща се чрез последната група от откази.

$$R(t)_{експл} = R(t)_{техн} \cap R(t)_{пр} \quad (2.3)$$

Очевидно е, че

$$R(t)_{експл} < R(t)_{техн} \neq R(t)_{теор}. \quad (2.4)$$



Фиг. 2.11. Структура на надежността на МЕИ.

Структурата на надежността на МЕИ в зависимост от различните етапи на съществуване на изделието е показана на фиг. 2.11, а зависимостта на съставките на надежността от времето за експлоатация на графиката — от фиг. 2.12.

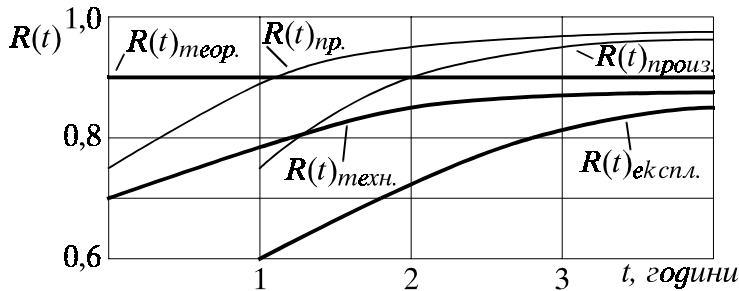
Ако се разгледа сумарната крива от фиг. 2.10, илюстрираща зависимостта на честотата на отказите от времето на отработка на МЕИ, се забелязват три явно изразени области в нея. Поради пряката връзка между показателите честота и интензивност на отказите графичната зависимост на  $\lambda(t)$  има същата форма. Формата на тази графика практически не зависи от критериите за работоспособност и от размера на изпитваната партида от изделия. Така времето за експлоатация на изделията се характеризира с три области:

I област — начална област наричана „детство“, през която се проявяват скритите производствени дефекти. Тази област е с различна продължителност (до 1000 часа) дори и за едни и същи МЕИ, различаващи се единствено по производител. За практиката е особено важно да

се определи нейната продължителност. Разпределението на отказите в повечето случаи за тази област добре се съгласува със закона на Поасон.

$$f(t)_I = \frac{1}{t} \theta^t \exp(-t), \quad (2.5)$$

където  $t$  е поредния номер на безразмерен временен интервал, а  $\theta$  е параметър на разпределението.



Фиг. 2.12. Зависимост на отделните съставлящи на надеждността на МЕИ от времето на експлоатация.

II област — характеризира се с най-ниска и постоянна плътност на вероятността за появата на отказ и се нарича област на *нормална експлоатация*. Тя характеризира дълготрайността и срока на експлоатация. Законът на разпределение на отказите добре се

съгласува с експоненциалното разпределение:

$$f(t)_{II} = \frac{1}{\theta} \exp\left[-\frac{t}{\theta}\right], \quad (2.6)$$

където  $\theta = M[t]$  е параметър на разпределението.

III област — наречена област на износване и стареене на МЕИ, когато отказите започват да се увеличават за сметка на стареенето на материалите и конструктивните елементи. Кривата, която в началото на тази област започва силно да расте и след това пада до нула означава, че след внезапните откази започват да се проявяват и постепенни откази. Законът на разпределение на отказите в най-общия случай е нормален:

$$f(t)_{III} = \frac{1}{\theta_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \theta_1)^2}{2\theta_2^2}\right], \quad (2.7)$$

където  $\theta_2 = \sigma[t]$  и  $\theta_1 = M[t]$ ,  $\theta_1$  и  $\theta_2$  са параметри на разпределението.

## 2.5. Влияние на обслужващия персонал върху показателите на надеждността на МЕИ

Всичките етапи от времето на живот на МЕИ в различна степен

са свързани с дейността на човека. Във връзка с това субективният фактор оказва съществено влияние при осигуряване на надеждността на изделията.

В днешно време, поради широката автоматизация на процесите на проектиране и производство на МЕИ се проявява тенденция към съществено намаляване на субективния фактор. Усъвършенстването на математическите и физическите модели и програмното осигуряване за САД системите води наред с намаляването на сроковете за проектиране и до съществено намаляване на броя на грешките при проектиране. В резултат на това се повишават качеството и надеждността на разработваните МЕИ.

В областта на производството на МЕИ автоматизацията на технологичните процеси също намалява отрицателното въздействие на персонала.

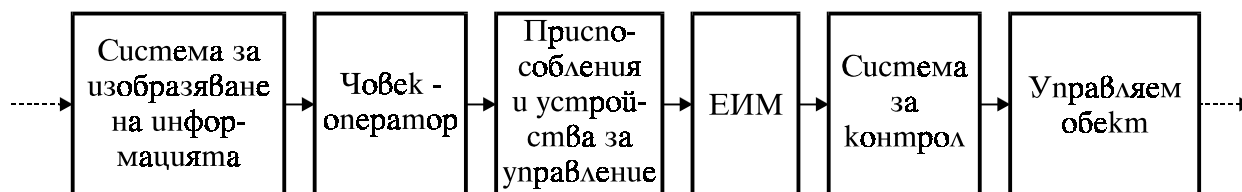
В областта на разработка, производство и експлоатация на ЕА са автоматизирани отделни процеси и въздействието на персонала остава съществен фактор при осигуряването на надеждната работа на МЕИ в апаратурата.

При отчитане на влиянието на човека-оператор върху надеждността на технологичната система и в резултат на надеждността на МЕИ са се наложили два подхода. При първия понятията и методите от теорията на надеждността на технологичните обекти се прилагат към човека-оператор като отделен елемент на системата „човек-техника“, аналогично на техническите елементи. Показателите за надеждността на човека-оператор вследствие на горното предположение са: интензивност на отказите, интензивност на възстановяване, коефициент на готовност и др. Показателите за надеждността на човека-оператор се отчитат в логически модели за безотказната работа на системата „човек-машина“ (фиг. 2.13). Например, вероятността за безотказна работа на системата  $p_c(t)$  е:

$$p_c(t) = p_1(t)p_2(t) , \quad (2.8)$$

където  $p_1(t)$  е вероятността за безотказна работа на техническия обект за време  $t$ ;  $p_2(t)$  — вероятност за безотказна работа на човека-оператор за време  $t$ .





Фиг. 2.13. Примерна логическа схема за определяне на надеждността на системата човек — машина.

Такива модели са много груби, не отчитат активната роля на човека-оператор в системата и другите принципни разлики на човека.

При втория подход се отчитат особените свойства на човека-оператор като активен елемент на ергодична система. В общ вид тези свойства са описани в [11]. За конкретния случай е достатъчно да се споменат такива като адаптивност, способност към умора, почивка, емоционални реакции, способност да извършва и поправя грешки, индивидуалност и др. Поради динамичността и стохастичността на свойствата на човека не е целесъобразно да му се приписват показатели на надеждност аналогични на тези за технически обекти.

При идеални условия на работа добре обучените оператори правят средно не по-малко от една грешка на 1000 операции; при стресови ситуации — средно една грешка на 10 операции. В качеството на безгрешна работа на оператора се приема честотата (вероятността) за поява на грешка. Статистическата стойност на честотата на грешките в  $i$ -тия опит е

$$q_i = m_i/n_i, \quad (2.9)$$

където  $n_i$  — е броя на подадените от оператора сигнали в  $i$ -тия опит;  $m_i$  — брой на грешките на оператора в този опит.

Различават се две групи методи за борба с грешките на операторите: методи за намаляване на броя на грешките и методи за защита от грешки. Към най-често използваните методи за намаляване на броя на грешките на операторите се отнасят: блокиране на нежеланите действия, резервиране на действията, контрол на състоянието на оператора, организационни и психологически мероприятия.

Качеството на изпълнение на задачите свързани с надеждността и скоростта на решаването им с технически средства е по-високо, отколкото от човека. Както времето така и точността на решаване на конкретната задача са показатели на ефективността на функциониране на системата „човек-машина“. За оценка на надеждността на системата „човек-машина“ може да се използва показателят (коэффициент на съхранение на ефективността)  $P_c$ :

$$P_c = p_m p_0 + q_m p_0 \alpha_m + p_m q_0 \alpha_0 + q_m q_0 \alpha_{m0}, \quad (2.10)$$

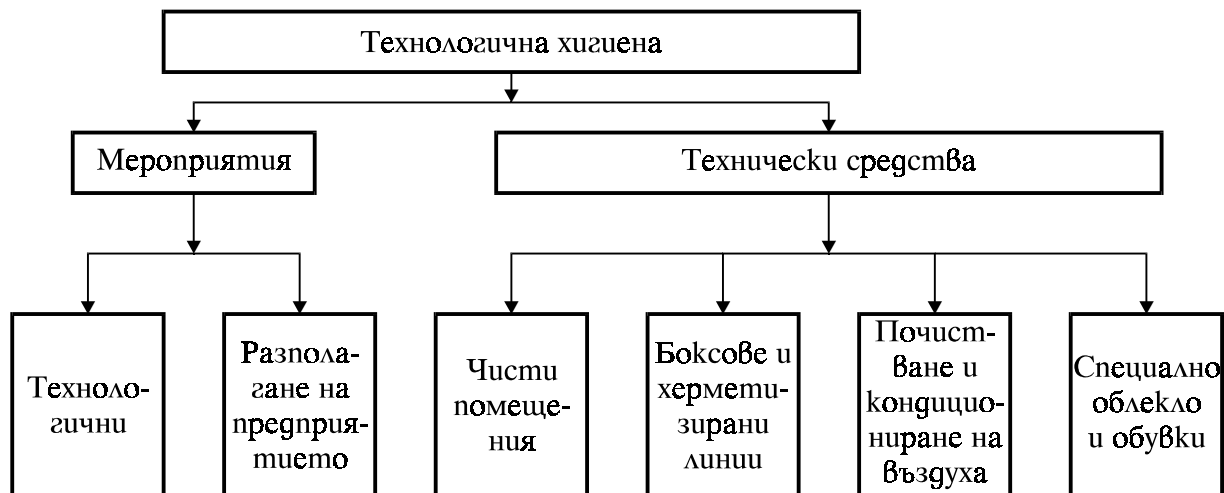
където  $p_m$  е вероятността при изпълнение на задачата да не възникне отказ на техническите средства;  $q_m$  — вероятност за възникване на отказ в техническите средства при изпълнение на задачата;  $p_0$  — вероятност за безотказно функциониране на човека;  $q_0$  — вероятност за нарушаване на работоспособността на човека при изпълнение на задачата;  $\alpha_0$  — показател на относителната ефективност на състоянието на системата, когато оператора е неработоспособен;  $\alpha_{m0}$  — показател на относителната ефективност на състоянието на системата, когато са неработоспособни и оператора и техническите средства.

Очевидно е, че операторът е сложна система с множество състояния на работоспособност, на всяко от които съответства определена ефективност на функциониране. Важен показател на ефективността на функциониране на системата човек-машина е времето за решаване на поставената задача.

## 2.6. Технологична хигиена при осигуряване на производството на високонадеждни МЕИ

*Технологичната хигиена* е система от мероприятия, осигуряващи условия за висока производствена чистота и загадени параметри на производствения микроклимат: температура, влага, подвижност на въздуха. Освен това, технологичната хигиена осигурява: очисване на технологичните газове, вода, реактиви, постъпващи материали, детайли и инструменти; отстраняване на замърсявания, възникващи при изпълнение на технологичните процеси.

Замърсяванията на повърхностите на МЕИ с прах, водни пари, кислород и други подобни фактори на производствената среда са причина за откази на изделията в процеса на тяхната експлоатация. Затова при създаването на високонадеждни МЕИ се поставят строги изисквания и се организират мероприятия за осигуряване на определени параметри на производствената среда. Тези мероприятия са представени във вид на схема на фиг. 2.14.



Фиг. 2.14. Технически средства и мероприятия по осигуряване на технологичната хигиена за повишаване на надеждността на МЕИ.

*Технологични мероприятия:* При разработката на технологичния процес е необходимо да се осигуряват условия, при които на различни етапи от производството на МЕИ да се използват минимално замърсени детайли, полуфабрикати и изделия в цяло. За осигуряване на технологична хигиена трябва МЕИ да се съхраняват и транспортират в специални пластмасови тари, специални вакуумни шкафове, чиято вътрешна повърхност се промива с инертни газове. Най-перспективни са мероприятията, насочени към отстраняване на необходимостта от съприкосновение на МЕИ с човека и околната производствена среда, което се постига с херметизация на автоматичните производствени процеси. Автоматизацията осигурява необходимата технологична чистота, надеждност на МЕИ и висока производителност на труда.

*Разполагане на предприятието:* Върху качеството и надеждността на МЕИ решаващо влияние оказва замърсяването на въздуха: концентрацията на праха, размера на прашинките и техните свойства да се преместват във въздуха. Характеристика на замърсеността на въздуха в градските и селските райони и в механичен цех за един от заводите в САЩ са показани в табл. 2.6 [17].

*Чисти помещения:* Външните замърсявания, които са най-често прах от различен произход попадат в помещенията през вентилационните системи и врати. Вътрешните замърсявания се образуват от разрушения по помещенията, оборудването, мебелите и се пренасят с облеклото и обувките на хората. Най-голяма опасност за производството на високонадеждни МЕИ представляват вътрешните замърсявания, които зависят от материалите, конструкцията и характера на помещението, от броя на работещите в него и от степента им на ак-

тивност. Затова наред с другите мерноприятия се създават чисти помещения, където се поддържа стерилна чистота и определен режим на температура, влага и налягане, повишено в сравнение със свързващите го помещения. В полупроводниковата промишленост са установени следните класове на чистота на въздушната среда, определяни от максималната концентрация на аерозоли в работните обеми: 0; 5; 35; 350; 1000; 3500; 10000; 35000 частици в литър въздух. Температурата на въздуха трябва да бъде 20-25 °C при относителна влажност 40-60 %.

Табл. 2.6. Нива на замърсеност на въздуха.

Размери на частиците, $\mu m$	Брой на частиците, $хил./m^2$		
	град	село	механичен цех
0,7 - 1,4	46400	1300	74450
1,4 - 2,8	4300	470	4000
2,8 - 5,6	1400	160	180
5,6 - 11,2	120	40	60
11,2 - 22,4	20	5	15
Общо	52240	1975	78705

*Боксове и херметизирани линии.* Те могат да бъдат открити и закрити. Откритите боксове представляват кръгли или правоъгълни шкаfoве с откритата или не напълно закритата прозрачна предна стена. Температурата и влагата на въздуха са като на въздуха в помещението. Закри-

тите боксове са напълно херметизирани шкаfoве с прозрачна предна стена. МЕИ попадат в бокса през специален шлюз, а операторът работи в бокса, подавайки ръце в специални ръкавици, които са херметично свързани със стените на бокса. Херметизираните линии са изградени от закрити боксове, които са свързани с преходни камери.

*Почистване и кондициониране на въздуха:* Оборудването за кондициониране на въздуха подава въздух със загадени стабилни параметри: чистота, температура и влага.

*Хигиена на персонала:* Производствената хигиена на работещия персонал започва при входа в чистото помещение. Осигуряват я: въздушното обдухване на входа, замяната на обувките, облеклото и спазването на специални правила в чистото помещение.

Основната цел на мероприятията по технологичната хигиена е осигуряването на производството на максимално надеждни МЕИ от висококачествен изходен материал.