

**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА**

маг. инж. Тончо Христов Папанчев

**ИЗСЛЕДВАНЕ, АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА  
НАДЕЖНОСТТА НА ЕЛЕКТРОННИ ИЗДЕЛИЯ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**на дисертация за получаване на образователна и  
научна степен “Доктор”**

**Научен ръководител: доц. д-р инж. Антон Славчев Георгиев**

**Рецензенти:**

- 1.....
- 2.....

**Варна, 2015 г.**

**Дисертационният труд е обсъден на 07.04.2015 г. в катедра “Електронна техника и микроелектроника“ и насочен за защита.**

**Докторантът работи в катедра “Електронна техника и микроелектроника”.**

Автор: маг. инж. Тончо Христов Папанчев

Заглавие: **„Изследване, анализ и оценка на надеждността на електронни изделия“**

**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА**

маг. инж. Тончо Христов Папанчев

**ИЗСЛЕДВАНЕ, АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА  
НАДЕЖНОСТТА НА ЕЛЕКТРОННИ ИЗДЕЛИЯ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**на дисертация за получаване на образователна и  
научна степен “Доктор”**

**Варна, 2015 г.**

**Дисертационният труд съдържа 141 страници, включително 28 фигури, 23 таблици и 13 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 119 заглавия, от които 31 на кирилица и 88 на латиница.**

Означенията на фигурите и формулите в автореферата съвпадат с тези от дисертацията.

**Защитата на дисертационния труд ще се състои на .....Г. от ..... часа в.....на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №...../.....Г.**

**Материалите по защитата (дисертацията, рецензията и становищата) са на разположение на интересувашите се във ФД „Докторанти”, стая 318 НУК.**

## ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### Актуалност на проблема

Изследването на процесите, протичащи в съвременното индустриално общество, извежда на преден план една основна негова черта – нарастването на скоростта на създаване и предлагане на нови продукти, във всички области на човешкото битие. Това се дължи на няколко основни причини: все по-бързото развитие на технологиите; нарастващото очакване на потребителите по отношение на надеждността; глобалната конкуренция и др. Научно-изследователските лаборатории и производителите, работещи в сферата на електрониката, са водещ фактор и генератор на този процес през последните 50 години.

Проблемите, свързани с надеждността, са в пряка връзка с устойчивото развитие на световната и европейската икономика. Основната цел на Лисабонската стратегия за развитие на Европейския съюз за периода 2000-2010 [13] “предприемачество, новаторство и конкурентоспособност”, е неразделно свързана с изискване за високото качество и надеждност на създаваните продукти. Стратегията за развитие „Европа 2020“ [14] поставя целта да се постигне растеж, който е „устойчив, благодарение на решителното преминаване към нисковъглеродна икономика и конкурентоспособна промишленост“. Постигането на така поставената цел е тесно свързано с повишаването на качеството и надеждността на произвежданата продукция.

Динамиката на промените в областта на електрониката поставя като основна задача търсенето на начини за допълване на съществуващите научни разработки с нови алгоритми и подходи за оценка на надеждността. Очертава се необходимост от работа в областта на надеждността в две посоки: повишаване на възможностите за прогнозиране на надеждността още в първите стъпки при проектирането на електронни изделия и разширяване на инструментариума на конструкторите за оптимално планиране и провеждане на изпитвания на надеждност, съчетано с адекватен избор на методи за анализ на експериментални данни.

### Проблем

Направеният литературен обзор и проучвания водят до извод, че основен проблем при анализа на надеждността на електронните изделия е оценяването на показателите на надеждност в ранните етапи на създаването на изделията – проектиране и подготовка за серийно производство. Това се дължи, от една страна, на противоположните изисквания за повишаване надеждността и скъсяване на сроковете за пускане в експлоатация на електронни изделия от всякакъв тип - от дребна техника до сложни и скъпи системи за самолетостроенето и тежката промишленост, и от друга, на липсващата или ограничена емпирична база от регистрирани откази в реална експлоатационна среда.

### Цел и задачи на дисертационния труд

Да се предложат нови подходи или алгоритми, предназначени за:

- А) разширяване на информацията за показателите на надеждност на електронните изделия на етап проектиране;
- Б) обогатяване на инструментариума, използван за оценяване на показателите на надеждност на електронните изделия на база на данни от ускорени изпитвания;
- В) оптимизиране на процесите на провеждане на ускорени изпитвания.

### Във връзка с целта са формулирани следните задачи:

1. Да се разработи подход за определяне на допустимите граници на изменение на въздействащите фактори при предварително зададена пределна стойност на интензивността на отказите.
2. Да се състави алгоритъм за прогнозиране на надеждността, осигуряващ повишаването на точността на оценката на показателите на надеждност на електронните изделия чрез използване на възможностите за симулационен анализ, предлагани от съвременните автоматизирани системи за проектиране и симулации
3. Да се потърси начин за оценяване параметрите на закона на Вейбул при работа с групирани данни, предлагащ възможност за повишаване на точността на оценките при малко или нула регистрирани откази.

4. Да се предложат критерии за оценяване на методите за анализ на данни от ускорени изпитвания, базирани на симулационни изследвания, които да служат за допълнителна аргументация при избора на метод за анализ при реални изпитвания
5. Да се разработи изчислителен пакет за симулационни експерименти и обработка на реални данни за времената на възникване на откази, подчиняващи се на закона за разпределение на Вейбул.
6. Посредством симулационни експерименти да се изследват най-често използваните методи и подходи за оценка на параметрите на закона за разпределение на Вейбул при ускорени изпитвания с периодични проверки. Целта на изследването е установяването на нови заключения относно прилагането на методите при работа с групирани данни, подпомагащи оптималния избор на подход за анализ на надеждността.
7. Да се предложи алгоритъм за оптимизиране на изпитванията на надеждност в процеса на тяхното изпълнение, посредством оценка на информативността на отделните тестове в съответствие с получаваните резултати

### **Обект и предмет на изследването**

Обект на изследване е надеждността на градивни електронни елементи и електронна апаратура с последователна структурна схема по надеждност, без възстановяване.

Предмет на изследването са както средствата за прогнозиране на надеждността в етапа на проектиране на електронните изделия, така и методите за оценяване на тяхната надеждност посредством надеждностни изпитвания.

### **Методи на изследване**

Работата по изпълнението на поставените задачи съдържаше проучване, подлагане на оценка за адекватност и обосноваване избор на методологии за прогнозиране и методи за оценка на надеждността на електронни изделия, чрез използването им в реални или симулационни експерименти. Използвани са методи за анализ на надеждността, числени методи, методи за многофакторен регресионен анализ. Обработката и оценяването на изходните резултати от симулационните експерименти са извършени с помощта на методи на приложната статистика. Разработените алгоритми и подходи са обосновани чрез подробно описание и проверка за релевантност посредством използването им в симулационни и реални условия, и оценка на получаваните резултати, включително и чрез сравнителен анализ с близки по приложение методи.

### **Място на изследване**

Провежданите в дисертацията изследвания са теоретични и експериментални. Извършвани са в лабораториите на катедра „Електронна техника и микроелектроника“ на ТУ-Варна и на територията на фирма „Техносенс“ ООД - Варна.

### **Научна новост на изследването**

Научната новост на изследването се състои в следното:

- Формулиран е подход „Интервален Вейбейс“ за оценяване параметрите на закона на Вейбул при групирани данни, когато не са регистрирани откази или те са един или два. При изследването му и в сравнение със стандартно прилагания в такива случаи метод Вейбейс се установи, че в голяма част от проведените симулационни експерименти се получават оценки, близки до истинските стойности на параметрите и по-нечувствителни спрямо характеристиките на провежданите изпитвания. Особено забележимо е предимството му пред метода Вейбейс при извадки с малък обем, малка продължителност на изпитване и малък брой интервали.

- Разработен е и е изследван алгоритъм за оптимизация на изпитванията по време на провеждането им на база на текущите резултати, посредством оценка на информативността на отделните тестове по отношение на получаваните оценки на изследваните показатели на надеждност.

- Въз основа на резултати от проведени изследвания на основните методи за надеждностен анализ на интервални данни са установени нови факти, подпомагащи обосноваване избор на метод за анализ при обработката на данни от изпитвания с периодични проверки.

### **Практическа ценност на изследването**

Разработен е изчислителен пакет за симулационни експерименти и работа с реални данни. Той позволява генерирането на псевдослучайни реализации по закона на Вейбул от типа точни, ограничени отдясно или групирани, подготовка на данните за представянето им в графичен вид, получаване на параметрични оценки на показателите на закона на разпределение по няколко метода, и също така извличането на информация от базите данни. Цялата функционалност на пакета може да се използва при обработката и анализа на данни от реални изпитвания. Разработеният продукт осигурява възможността за анализиране резултатите от основните методи за оценка на параметрите на разпределението на Вейбул, с цел сравнителен анализ и избор на подходящия подход в конкретна реална обстановка. Пакетът може лесно да бъде разширяван с добавяне на нови модули за генериране на други типове данни и за техния анализ.

Предложени са критерии за оценяване на методите за анализ на данни от ускорени изпитвания, на база на събрани при симулационни изследвания данни, които да служат за допълнителна аргументация при избора на метод за анализ в реални изпитвания

Разработените в дисертацията подходи и алгоритми предлагат на инженерите по надеждност и проектантите на електронни изделия допълнителни средства за оптималния избор на схемотехническо решение и елементна база по отношение на търсената надеждност на създавания продукт.

### **Апробация на изследването**

Основните положения и резултати от дисертационния труд са докладвани и публикувани на следните места:

- Научна конференция „Науката в служба на обществото”, ТУ-Варна, 25.10.2013г., с публикация в списание „Известия“ на Съюза на учените - Варна, серия „Технически науки“ - 1 доклад;

- XX International Scientific Conference ELECTRONICS - ET2011, Sozopol, Bulgaria, 14-16.09.2011 - 2 доклада;

- Електронно списание „Компютърни науки и комуникации”, <http://ojs.bfu.bg/index.php/knk>, 2012, 2013 - 2 статии;

- Сборник доклади от докторантски семинар по проект “BG051PO001-3.3.06 -0005 - Развитие потенциала на докторанти, постдокторанти, млади учени и специализанти от инженерните науки в ТУ Варна и техния принос за развитие на икономика, базирана на знанието”, ТУ-Варна, 2013 - 1 доклад;

- XLVI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies - ICEST 2011, 29 to 1 July 2011, Nish, Serbia - 1 доклад;

- International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), March 2014; <http://ijeit.com/archivedescription.php?id=29>, ISRA Journal IF: 2.137 (dec. 2014) - 2 статии;

- Трети международен научен конгрес „50 години Технически Университет - Варна“, Варна, 04 - 06.10.2012 - 1 доклад.

- Част от резултатите от дисертационния труд са приложени успешно в решаването на възложена от фирма „ДИКС Интъртрейд“ ООД задача за надеждностен електронна с истема, за което е приложен отзив от ръководството на фирмата.

### **Публикации по дисертационния труд**

Направени са общо десет публикации по дисертацията. Две от тях са самостоятелни, останалите в съавторство. Две от статиите са публикувани в списание „International Journal of Engineering and Innovative Technology“ (IJEIT), с ISRA Journal Impact Factor 2,137.

# СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

## I. СЪВРЕМЕННО СЪСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМИ НА ИНЖЕНЕРНАТА НАДЕЖДНОСТ

### I.1. Съвременно състояние на теорията на надеждността

#### I.1.1. Обзор на методите за прогнозиране и моделиране на надеждността.

В книгата „Надеждност и сигурност на комуникациите“ [2] авторите Христов и Трифонов представят обобщена класификация на методите за моделиране на надеждността, групирайки ги в два основни дяла - теоретични и експериментални, всеки с по две подгрупи, съответно статистически и аналитични за първия дял, и лабораторни и експлоатационни, за втория дял. Филев обръща специално внимание на изпитванията на надеждност, разглеждайки ги подробно в [3]. В този труд изпитванията са класифицирани в три групи - научно-изследователски, определителни и контролни, с втора диференциация като физични изпитвания и изпитвания чрез моделиране. Двата труда формират ясна картина на методите, използвани при оценяването на надеждността, едновременно с това се открояват взаимните връзки и припокривания на методите по отношение на използвания математически апарат и събирането на изходните данни за анализ на надеждността.

В дисертационния труд е направен анализ на методите за оценка на надеждността от гледна точка на наличната информация, възможностите за събиране на информация и подходите за обработка на информацията. Терминът „информация“ се използва като обобщаващ за данни относно времето на възникване на откази, броя възникнали откази за единица време, видовете на отказите, данните за работната среда и натоварването и др. Фигура 1.2 представя класификация на методите за прогнозиране и моделиране на надеждността, направена от такъв дискурс.

#### I.1.1.1. Емпирични методи.

Емпиричните методи се базират на използването на налични данни за стойностите и тенденциите на изменение на показателите на надеждността на изделия, аналогични или близки на изследваните изделия по предназначение, принцип на действие, схемно-конструктивно изпълнение, елементна база, използвани материали, условия и режим на експлоатация, принципи и методи за управление на надеждността [39]. Тези методи са представени и систематизирани в различни методологии, предлагащи инструментариум за прогнозиране на надеждността [41],[42],[43],[44]. Бурното развитие на електрониката и навлизането на нови материали и технологии също поставя въпроси относно актуалността на данните и достоверността на получаваните оценки на показателите на надеждност. Другият проблеми, затрудняващ работата с емпиричните методи и поставящ въпрос за тяхната адекватност е значителната неопределеност на условията на експлоатация на електронните изделия (*mission profile*).

#### I.1.1.2. Изпитвания на надеждност

В показаната на фиг.1.2 класификация изпитванията на надеждност са групирани съгласно критерия „условия на провеждане на изпитванията“. Съобразно него изпитванията могат да бъдат разделени в три групи:

- Експлоатационни изпитвания, провеждащи се в условия, близки или идентични с най-често срещаните в реалната работна среда;
- Гранични изпитвания, провеждащи се в рамките на нормалните експлоатационни условия, но при условия близки до граничните допустими стойности на основните фактори, определящи условията на работа;
- Ускорени изпитвания, провеждащи се в условия, извън зададените нормални експлоатационни условия.

От икономическа гледна точка решаващо значение има времето, необходимо за събиране на необходимата информация, която предоставя данните за оценяването на надеждността на изделията. Това е причината по-долу да бъде разгледана подробно третата група от горната класификация – ускорените изпитвания.

В редица случаи ускорените изпитвания са единствения приложим подход за оценяване на надеждността. Те могат да служат за: а) оценка на надеждността на електронните изделия и на качеството на използваните материали; б) идентифициране на типовете откази,



локализирането им в модулите на електронната апаратура и вземане на мерки за тяхното предотвратяване; в) електротермична тренировка за отделяне на елементи със скрити дефекти (Burn-in); г) прогнозиране на експлоатационните качества на изделието в реални условия и на поведението му при екстремни външни въздействия и режими на натоварване.



Фиг.1.2. Класификация на методите за оценка на надеждността на електронните изделия

### 1.1.1.3. Структурни методи

Структурните методи се основават на представянето на изследвания обект във формата на логически структурно-функционални схеми, описващи зависимостта на състоянията и преходите от едно състояние в друго на обекта от състоянията и преходите на изграждащите го елементи, с отчитане на техните взаимодействия и изпълняваните функции. Така построената структурна схема се описва с подходящи математически модели. Надеждността на обекта се оценява по предварително известни показатели на надеждност на изграждащите го елементи.

Блоковите структурни схеми по надеждност представят въздействието, което оказват отказите в елементите и блоковете на дадена система върху нейната обща надеждност [17]. Те се разделят на последователни, паралелни, смесени и сложни структури. В повечето случаи функционирането на електронните изделия се описва с помощта на по-сложни техники за моделиране на надеждността от основните последователно-паралелни блокови схеми. Такива са методите за построяване на Дърво на отказите или на Дърво на безотказността. Развитието на горните методи води до модели, които се разработват последните няколко години, като Диаграма на двоичните решения BDD, BDD с множествени състояния [93], [2], Дърво на динамиката на отказите DFT [94] и др.

### 1.1.1.4. Комплексни методи

Като комплексни методи са разгледани методите „Анализ на типа на отказите и следствията от тях“ FMEA и „Анализ на типа на отказите, следствията и критичните състояния“ FMECA, имащи за цел описването и предвиждането на отказите, които могат да се изявят в една електронна система и смекчаване на негативните ефекти от тяхното възникване. Положителните резултати от провеждането на тези методи пряко зависими от ранното им изпълнение, за да се постигне икономическа ефективност на въвежданите промени.

Когато описанието на функционирането на една електронна система с оглед анализ на нейната надеждност представлява трудна за изпълнение задача, един от удобните варианти е да се пристъпи към провеждане на симулационни изследвания, наречени Монте Карло симулации. Все по-голямата производителност и обем на паметта на съвременните компютърни системи позволяват да се извършват голям брой симулационни цикли, изходните резултати от които се използват като експериментални данни за последващ анализ на надеждността и оценка на избраните показатели на надеждност. В случая е от особена важност точното описание на процесите в изследваното изделие. Полезни в това отношение могат да бъдат съвременните компютърни системи за автоматизирано проектиране.

Моделирането с помощта на Бейсовски подход се използват все повече в анализа на надеждността. Публикациите на Георгиев [97],[98] показват последователността на действия при прилагане на този начин на оценяване. Предимството на използването на Бейсовския подход е, че той позволява съществуващата предварително информация (прогнози, резултати от изпитвания, инженерен опит) да бъде комбинирана с актуалната, конкретна за дадените изделия информация, като например данни от изпитвания или от експлоатация, с цел да се стигне до прогнозна оценка на надеждността на базата на комбинация от всички налични данни.

### **I.1.2. Проблеми при оценяването на надеждността в различните етапи на жизнения цикъл на електронните изделия**

Надеждността на даден продукт е характеристика, която изразява идеята за доверие или отсъствието на отказ. Според IEC 60050-191 [33], надеждността на дадено изделие (система) е „вероятността този продукт (система) да изпълнява своето предназначение за определен период от време, при нормални (или установени) условия на работа“. В БДС 27.002-86 [18] определението за надеждност е съпроводено със забележката, че „надеждността е комплексно свойство, което в зависимост от предназначението на обекта и условията на експлоатацията му може да включва безотказност, ремонтпригодност, дълготрайност и съхраняемост поотделно или в съчетание на тези свойства“.

В своя труд „Изчислителна надеждност в радиоелектрониката“ [1], Гиндев представя три нива за осъществяването на надеждността като понятие:

1. Прогнозируема - на етапа на проектиране - конструкция, елементи и процеси. Надеждността се оценява: - на конструкцията - по постепенните откази; - на елементите - по внезапните откази; - на процесите - по отказите от дефекти, причинени от процесите на производство.

2. Техническа (номинална) - по данните от изпитването на серийните образци (нулева серия) в лабораторни условия, имитиращи експлоатационните.

3. Оперативна (експлоатационна) надеждност - по данни от реалната експлоатация на изделия от серийното производство.

При електронните изделия тези стъпала са в пряка корелация с основните етапи на жизнения цикъл - проектиране, производство и експлоатация.

Надеждността на изделията зависи от решенията, вземани през периодите на проектиране и производство. Затова може да се обобщи, че надеждността е свойство на продукта, което се моделира и вгражда в него, и изисква инвестиране на значителни средства и време. Така разгледан, процесът на „вграждане“ на надеждността очертава множество проблеми. По-долу са представени само два от тях и произтичащите от това конфликти:

Първи проблем - „Овеществяването“ на понятието „достатъчната надеждност“ за всеки конкретен продукт.

Втори проблем - Избор на начина за постигането на нивото „достатъчна надеждност“ при всеки произведен продукт.

Първи конфликт - Време: Нарастващата конкуренция съкращава като цяло продължителността на всички етапи от живота на изделията – проектиране - изпитване - производство - експлоатация - технологично остаряване - проектиране на качествено ново изделие или пускане на усъвършенствани варианти. Това естествено налага съкращаване и на времето, отделяно за изпитване и анализ на надеждността на изделията.

Втори конфликт - Цена: Голямото разнообразие от продукти с близки, даже еднакви,

характеристики налага търсене на решения, гарантиращи ниски цени на изходния продукт. Това рефлектира в съкращаване на разходите, планирани за изследванията на надеждността.

Погрешно взетите решения водят до по-големи загуби, изразяващи се не само в непредвидени разходи за гаранционно обслужване, но и в намалени продажби и приходи вследствие на негативното влияние на недоволството на клиентите, породено от възникващите откази. Ефектът се разпростира и в по-глобален план, влияейки отрицателно върху авторитета на производителя, поставяйки въпросителна пред оцеляването му в силно конкурентната среда на електронните продукти. За потребителя ниската надеждност в добрия случай означава повече периоди на неизползване, повече разходи на време и средства за поддръжката, което в индустриални условия оказва пряко влияние върху приходите на потребителя. При лош сценарий, обаче, последствията могат да се изразят в разрушаване на материална база, наранявания или загуба на човешки животи. В серия от публикации екип с ръководител Д. Мърти [33],[103],[104] анализира донякъде аспекти от горепосочените казуси. Няма обаче еднозначно решение на така поставените за решаване проблеми. За постигането на исканата надеждност на изделията е необходимо да се правят оценки на надеждността на всеки етап от жизнения цикъл на изделията.

## **I.2. Изводи, цел и задачи на дисертацията**

Прогнозното оценяване на показателите на надеждността и осигуряването на техните необходими и достатъчни стойности при електронните изделия е задача, която стои за решаване пред инженерите по надеждност и конструкторите във всеки един етап от жизнения цикъл на изделията. Решаващо и икономически най-изгодно условие за покриването на изискванията за надеждност е поставянето на стабилна основа, чрез анализ и прогностична оценка на показателите на надеждност в най-ранните етапи, когато изделието представлява чертеж на електрическа схема. Разработени са редица методологии за прогнозиране, които, при умелото им използване, могат да дадат достатъчно точна представа за качествата на конкретното схемно или конструктивно решение по отношение на надеждността. Редица специализирани софтуерни продукти, като ReliaSoft [116], Isograph [117], PTC Windchill Prediction [118] (предишно наименование Relex) и Item Software [119], са предназначени за извършване на анализ и оценка на различни показатели на надеждност на електронните изделия. Общ недостатък на тези продукти е, че не се предлага по-детайлен поглед върху връзката между факторите, влияещи на надеждността на изделието, и оценките на следените показатели на надеждност.

Развитието и усъвършенстването на съвременните системи за автоматизирано проектиране на електронни изделия предлага допълнителни възможности, чрез разработването на нови и усъвършенстването на съществуващите модули за симулация и анализ. При направеното литературно проучване, не бяха открити източници, в които въпросите за включването на такива системи в процесите на анализ на надеждността и обосноваване на избор на конструктивни решения са разгледани и анализирани.

По отношение на работата с групирани данни от изпитвания, бе установена липса на специален подход за анализ на надеждността, отнасящ се за случаите на липса на регистрирани откази или малко такива. Не беше открит разработен инструмент за предварителна сравнителна оценка на различните методи за анализ по отношение на надеждността на такъв тип данни.

Въпреки многото изследвания и публикации относно оценяването на надеждността чрез ускорени изпитвания, при проучването на проблема се бяха намерени разработки, в които е изследвана възможността за динамично оптимизиране на провежданите изпитвания чрез текущо оценяване на информативността им.

По отношение на работата с групирани данни от изпитвания бе установена липсата на специален подход за анализ на надеждността, отнасящ се за случаите на липса на регистрирани откази или малко такива. Не беше открит разработен инструмент за предварителна сравнителна оценка на различните методи за анализ на надеждността въз основа на такъв тип данни.

Направеният литературен обзор и проучвания водят до извод, че основен проблем при анализа на надеждността на електронните изделия е оценяването на показателите на

надеждност в ранните етапи на създаването на изделията - проектиране и подготовка за серийно производство. Това се дължи, от една страна, на противоположните изисквания за повишаване надеждността и скъсяване на сроковете за пускане в експлоатация на електронни изделия от всякакъв тип - от дребна техника до сложни и скъпи системи за самолетостроенето и тежката промишленост, и от друга, на липсващата или ограничена база данни за регистрирани откази в реална експлоатационна среда.

Въз основа на направения анализ на съвременното състояние и проблеми на теорията и практиката на надеждността на електронните изделия са формулирани следните Цел и Задачи на настоящата дисертация:

**Цел на дисертацията** е да се предложат нови подходи или алгоритми, предназначени за:

А) разширяване на информацията за показателите на надеждност на електронните изделия на етап проектиране;

Б) обогатяване на инструментариума, използван за оценяване на показателите на надеждност на електронните изделия на база на данни от ускорени изпитвания;

В) оптимизиране на процесите по провеждане на ускорени изпитвания.

**Задачи за изпълнение:**

1. Да се разработи подход за определяне на допустимите граници на изменение на въздействащите фактори при предварително зададена пределна стойност на интензивността на отказите.

2. Да се състави алгоритъм за прогнозиране на надеждността, осигуряващ повишаването на точността на оценката на показателите на надеждност на електронните изделия чрез използване на възможностите за симулационен анализ, предлагани от съвременните автоматизирани системи за проектиране и симулации.

3. Да се потърси начин за оценяване параметрите на закона на Вейбул при работа с групирани данни, предлагащ възможност за по-вишаване на точността на оценките при малко или нула регистрирани откази.

4. Да се предложат критерии за оценяване на методите за анализ на данни от ускорени изпитвания, базирани на симулационни изследвания, които да служат за допълнителна аргументация при избора на метод за анализ при реални изпитвания.

5. Да се разработи изчислителен пакет за симулационни експерименти и обработка на реални данни за времената на възникване на откази, подчиняващи се на закона за разпределение на Вейбул.

6. Посредством симулационни експерименти да се изследват най-често използваните методи и подходи за оценка на параметрите на закона на Вейбул за разпределение при ускорени изпитвания с периодични проверки. Целта на изследването е установяването на нови заключения относно прилагането на методите при работа с групирани данни, подпомагащи оптималния избор на подход за анализ на надеждността.

7. Да се предложи алгоритъм за оптимизиране на изпитванията на надеждност в процеса на тяхното изпълнение, посредством оценка на информативността на отделните тестове в съответствие с получаваните резултати.

## **ГЛАВА II. Изследване, оценяване и избор на методологии за прогнозиране и методи за оценка на надеждността посредством изпитвания**

### **II.1. Методи за прогнозиране на надеждността в етапа на проектиране**

Анализът на надеждността на електронните изделия на етап "Проектиране" може да се представи в три стъпки:

1. Формулиране на изискванията по отношение на надеждността - Мърти [33];

2. Анализ на надеждността на ниво градивни елементи за осигуряване на поставените изисквания на първия етап и осигуряване на входни данни за структурния анализ на надеждността.

3. Структурен анализ на надеждността (блокова диаграма, дърво на отказите, анализ на типовете откази и последствия) - съставяне на структурната схема на изделието от гледна

точка на надеждността, описание на взаимовръзките между отделните блокове, достигане до ниво изграждащи елементи.

Независимо от сложността и обема на електронните системи, основен източник на информация за извършване на моделиране на надеждността и оценяване на показателите на надеждност са даните за показателите на надеждност на техните градивните елементи и елементарни функционални блокове, в които елементите са свързани последователно от гледна точка на надеждността. Това дава основание като обекти, чиято надеждност подлежи на изследване, да бъдат избрани градивни електронни елементи и електронна апаратура с „проста“ структура от гледна точка на надеждността, с последователна структурна схема по надеждност и без възможност за възстановяване.

### II.1.1. Анализ на излишъка по натоварване като средство за повишаване на надеждността

Според Мърти [103] възможностите за подобряване на надеждността са: в етапа на проектиране - чрез въвеждане на излишък и чрез конструктивни изменения; в етапа на експлоатация - чрез планиране на превантивна профилактика и чрез усъвършенстване на изделието. Излишъкът по натоварване води до повишаване на устойчивостта на елементите и устройствата по отношение на факторите, въздействащи на надеждността. Прилагането му води до увеличаване вероятността за безотказна работа, нарастване на средното време на работа до отказ и намаляване на интензивността на отказите. Излишъкът по натоварване се прилага най-вече на ниво елементи, като се осигурява работата им в недонатоварено състояние (по отношение на различни фактори - механични усилия, работна мощност, протичащ ток, обратно напрежение, работна температура и др.) [2].

Важността на излишъка по натоварване като най-приложим и повсеместно прилаган метод за повишаване на надеждността се изразява в следното:

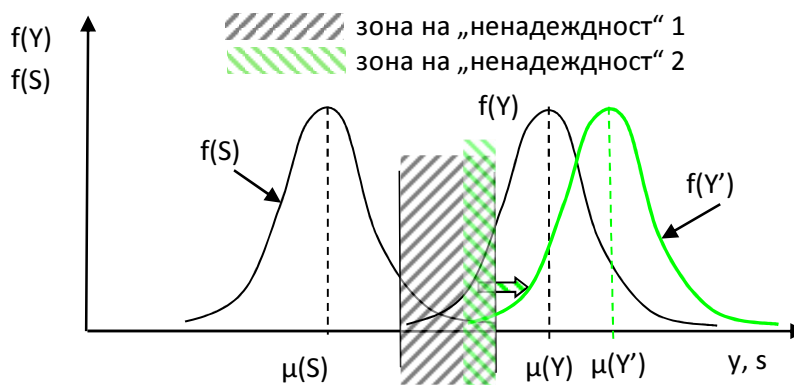
А. Осигурява по-бавно развитие на процесите на стареене и отдалечава момента на навлизане в зоната на параметричните откази.

Б. Дава възможност на елемента да издържа по-големи моментни натоварвания, съответно намалява вероятността за възникване на внезапни откази през периода на нормална експлоатация.

В. Той е непосредствено приложим в процеса на проектиране и е първо средство на избор за инженерите-конструктори.

Г. Помага за компенсирането на различията в градивните електронни елементи от един тип и с идентични номинални характеристики и параметри.

Стойностите на параметрите на един електронен елемент са случайни величини с нормално разпределение, групирани около тяхната номинална стойност. Нормално разпределение притежават и стойностите на натоварващите фактори. Нека параметърът  $Y$  описва издръжливостта на елемента спрямо натоварващия фактор  $S$ . Докато стойностите  $y$  на параметъра  $Y$  са по-големи от стойностите  $s$  на фактора  $S$ , елементът е в състояние на нормална работа. На фигура II.1. са представени плътностите на разпределение  $f(Y)$  и  $f(S)$  на двата параметъра, където ясно се вижда зоната на „ненадеждност“ 1, формирана от припокриването на двете разпределения.



Фиг. II.1. Разпределения на издръжливостта  $Y$  и натоварването  $S$ .

Представянето по този начин на отношенията между натоварването и издръжливостта указва четири начина за повишаване на надеждността:

- увеличаване на средната издръжливост, с използване на други материали (елементи) или друга конструкция (схемно решение);
- намаляване на дисперсията на издръжливостта, чрез ограничаване на дисперсията на материалите и производствените процеси;
- ограничаване на средното натоварване, чрез контрол на натоварването;
- намаляване на дисперсията на натоварването, чрез ограничаване на областта на приложение (среда, натоварване и др.)

Измествайки надясно кривата на разпределение на стойностите на параметъра  $Y$ , чрез въвеждане на подходящ излишък по натоварване, зоната на ненадеждност се стеснява (зона 2) и така се редуцира опасността от възникване на отказ.

### II.1.2. Сравнителен анализ на методологии за прогнозиране на надеждността

Съществуват няколко най-често използвани методологии за прогнозиране на надеждността - MIL-HDBK-217F, Bellcore/Telcordia SR 332, Fides 2009, IEC TR 62380. Те се прилагат за оценяване на интензивността на отказите на съставящите компоненти на електронните системи, а оттам и на системната интензивност на отказите, в периода на тяхната нормална експлоатация.

Проучени са специфичните черти на отделните методологии и процедурите, които следват за оценяване на показателите на надеждност. Таблица II.1 представя едно обобщено сравнение на цитираните методологии.

За да се сравнят разгледаните методологии, е извършено изчисление на интензивността на отказите на няколко електронни елемента по всяка от тях. В таблица II.2 и на фигура II.4 са представени интензивностите на отказите на пет елемента, като приемаме, че няма детайлна информация за профила на експлоатация на елементите.

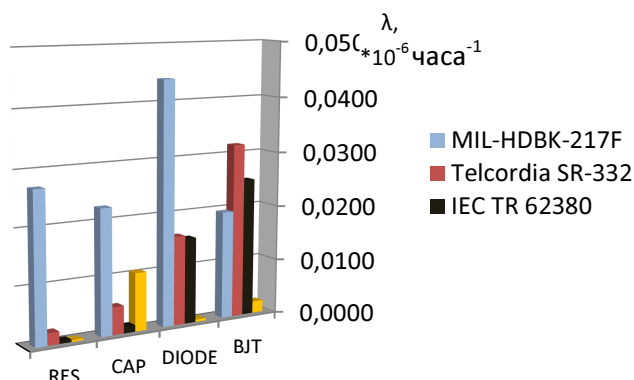
Получените резултати показват значителни разлики в оценките на интензивността на отказите. Причината може да се търси, от една страна, в липсата на подробна информация за експлоатационните условия на елементите, и от друга, в разликите в основните концепции на методологиите и базите от данни, които използват.

Таблица II.1. Обобщено сравнение на разглежданите методологии.

	<b>MIL-HDBK-217F</b> <b>[41]</b>	<b>Telcordia SR 332</b> [43]	<b>IEC TR 62380</b> <b>[44]</b>	<b>FIDES 2009</b> <b>[42]</b>
<b>Предназначение</b>	военно и общо	телекомуникации	военно, телекомуникации, автомобилна индустрия	военно и самолетно
<b>Използвани данни</b>	изпитвания, експлоатация	експлоатация, бърнингване, изпитвания	експлоатация при четири типа среда	бази данни за механизмите на отказите, изпитвания
<b>Компоненти - специфики</b>	27 типа резистори, 28 типа кондензатори; без батерии, охладители, конвертори	подобно на MIL-HDBK; без печатни платки; хибридни модули са слабо отразени	детайлно разгледани интегрални схеми и и релета	детайлно описани хибридни и мултичип модули, HF и RF компоненти, COTS
<b>Среда на експлоатация</b>	14 от 4 основни - наземно, морско, въздушно и космическо	3 наземни, 1 въздушно, 1 космическо	12 от наземно, морско, въздушно, космическо	без базови формулировки, описание на "профила на мисията"
<b>Отчитане на цикличността</b>	не	не	да	да
<b>Степени на качество</b>	в зависимост от компонентите	четири	приема се, че компонентите притежават "достатъчна надеждност"	няма фиксирани; специален коефициент за качество и контрол.
<b>Изчисления</b>	песимистични; опростени; нужни са монго данни за елементите	оптимистични; по-малко параметри на компонентите	сложни, с подробно описание на "профила на мисията"	сложни, с подробно описание на "профила на мисията"
<b>Единици</b>	$*10^{-6}$ часа	$*10^{-9}$ часа (FIT)	$*10^{-9}$ часа (FIT)	$*10^{-9}$ часа (FIT)

Таблица II.2. Интензивност на отказите на изследваните елементи, оценена по различни методологии.

$\lambda$ , [часа <sup>-1</sup> ]	MIL-HDBK-217F	Telcordia SR 332	IEC TR 62380	FIDES 2009
Резистор металослоен RES	0,0271*10 <sup>-6</sup>	0,0022*10 <sup>-6</sup>	0,0004*10 <sup>-6</sup>	0,0003*10 <sup>-6</sup>
Кондензатор керамичен CAP	0,0226*10 <sup>-6</sup>	0,0050*10 <sup>-6</sup>	0,0012*10 <sup>-6</sup>	0,0105*10 <sup>-6</sup>
Изправителен диод DIODE	0,0441*10 <sup>-6</sup>	0,0162*10 <sup>-6</sup>	0,0155*10 <sup>-6</sup>	0,0004*10 <sup>-6</sup>
Биполярен транзистор BJT	0,0195*10 <sup>-6</sup>	0,0284*10 <sup>-6</sup>	0,0252*10 <sup>-6</sup>	0,0021*10 <sup>-6</sup>



Фиг. II.4. Графично представяне на данните от Таблица II.2.

Анализирайки гореизброените методологии, могат да се формулират следните изводи:

1. Методологиите FIDES 2009 и IEC TR 62380 намират приложение в случаите, когато е налична по-детайлна информация за изделията, обхващаща допълнително кръг от проблеми, които имат организационно-логистичен характер.

2. Методологиите MIL-HDBK-217F и TELCORDIA SR332 по своята същност са идентични, като TELCORDIA SR332 е основана в голяма степен върху данни от MIL-HDBK-217F.

3. MIL-HDBK-217F се характеризира като съдържаща основните черти на останалите разглеждани методики.

Вземайки предвид горепосочените изводи, и с цел получаване на резултати и формулировки с по-общ характер, методологията MIL-HDBK-217F е избрана за използване, с предлаганите от нея данни и математически апарат. Друга причина е удобството на работа с MIL-HDBK-217F в началния етап на проектирането на електронните изделия, при ограничена изходна информация и все още неизработени опитни образци или пробни серии. Не на последно място, методологията е избрана поради факта, че е най-често прилаганата в настоящия момент, присъстваща като първи избор в най-използваните софтуерни пакети за оценяване на надеждността [116], [117], [118], [119].

## II.2. Анализ на основните методи за оценка на параметрите на разпределението на Вейбул и приложимостта им при работа с групирани данни

Събраните данни от няколко последователни проверки представляват групирани данни [55], [105], [56]. В по-нататъшната работа са приети за достоверни следните допускания:

- всички изделия от една извадка започват изпитванията си в един и същ момент;
- всички изделия са работоспособни в началото на изпитванията;
- известни са моментите на проверка за възникване на откази и те са в сила за всички изделия от извадката.

Събраните данни представят броя на откази във всеки интервал и броят на неотказалите изделия след приключването на теста. Не са известни точните моменти на възникване на отказите, което въвежда допълнителна неопределеност в резултатите, за разлика от точните данни, особено при малки по обем извадки и малък брой откази в рамките на един интервал. Това налага търсенето и използването на такива методи за анализ, които дават достатъчно достоверни оценки на изследваните показатели.

Методите за оценка на параметрите на разпределение на Вейбул могат да се класифицират като графични и аналитични.

### II.2.1. Графични методи

Графичните методи се отличават от останалите методи по простотата на прилагането

им и възможността за визуална оценка на адекватността на приетия тип разпределение по отношение на истинските данни.

Уравнението на плътността на разпределение на вероятностите на при дупараметричния модел на Вейбул е:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, \beta > 0, \alpha > 0, \quad (\text{II.10})$$

където  $\beta$  е параметър на формата, а  $\alpha$  е мащабиращ параметър.

Кумулативната функция на разпределението на Вейбул се представя с формулата:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}. \quad (\text{II.11})$$

Когато променливата  $x$  има времеви характер, параметърът  $\alpha$  се нарича характеристично време, и представлява времето, при което  $F(x)$  придобива стойност 0,63.

След двойно логаритмуване на  $F(x)$  се получава следното уравнение:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right) = \beta \cdot \ln(x) - \beta \cdot \ln(\alpha), \quad (\text{II.12})$$

представляващо уравнение на права линия.

При използване на Вейбулова вероятностна графика, се изпълнява следната процедура:

1. Ранжират се в нарастващо времената на възникване на отказите  $x_i$ ,
2. Изчислява се оценката на  $F(x_i)$  за  $i$ -тия отказ. За  $n$  регистрирани откази, оценката на  $F(x_i)$  се извършва по някой от следните методи:

- Оценка по средна стойност:  $F(x_i) = \frac{i}{n+1}$ ;

- Оценка по уравнението на Бернард (оценка по медиана):  $F(x_i) = \frac{i-0,3}{n+0,4}$ ;

- Симетрична кумулативна функция на разпределение:  $F(x_i) = \frac{i-0,5}{n}$ .

3. Върху Вейбуловата вероятностна графика се нанасят оценките на  $F(x_i)$  към съответните стойности на  $x_i$ .

След разполагане на точките върху Вейбуловата вероятностна графика, веднага може да се оцени доколко Вейбуловия закон е подходящ за описване на истинския закон за разпределение на времената до отказ на изследвания елемент. Линеиният характер на разполагане на точките потвърждава Вейбуловия характер на разпределение на отказите, и обратно, отклонението на точките от линейно разполагане предполага търсене на по-подходящ закон за разпределение, или наличие на комбиниране на процеси, описвани с различни по характер или параметри закони за разпределение.

### II.2.2. Аналитични методи

Аналитичните методи, които се използват най-често в регресионния анализ на данни от изпитвания на надеждност, са методът на линейното преобразуване *MRR*, основаващ се на данните от графичните модели и даващ оценка на параметрите на Вейбул чрез регресионен анализ, методът на максималното правдоподобие *ML*, методът на най-малките квадрати, методът на моментите. Тези методи са обект на анализ на много изследователи в областта на приложната и теоретичната надеждност, като Нелсън [55], Абернети [105], Рине [61], Ескобар и Миикър [60], и др. Мохамад Ал-Фавзан подлага на сравнителен анализ методите на най-малките квадрати, на моментите и на максималното правдоподобие, по отношение на точността на получаваните оценки на параметрите на разпределението на Вейбул [106]. В горе цитираните литературни източници е доказано, че единствено методът на най-малките квадрати може да се ползва при интервални данни, давайки възможност да се преодолее неопределеността на информацията за моментите на възникване на отказите. Това е основанието като основен метод, използван по-нататък, да бъде избран именно метода на максималното правдоподобие.

Другият метод, който е избран за използване и подлагане на сравняване на резултатите с тези на *ML*, е методът *MRR*. При него се използва графичният метод като източник на данни, спрямо които се прилага регресионен анализ по метода на най-малките квадрати. Предимствата му са по-лекия математически апарат, и възможността на първи етап да се определи адекватността на приетия закон за разпределение по отношение на реалните данни.



В стандарта ИЕС 61649 [56] се препоръчва при възможност да се използват двата метода (*MRR* и *ML*), за съчетаване на възможностите за визуално представяне на единия метод с аналитичния характер и възможността да се обработват различни по тип или смесени данни на другия метод.

При липса на откази или малко регистрирани такива се прилага методът Вейбейс.

### II.2.2.1. Метод на максималното правдоподобие.

Оценяването на параметрите на разпределението на Вейбул по метода *ML* при работа с групирани и цензурирани данни е възможно след намиране на такава форма на функцията на правдоподобие  $L(t/\alpha, \beta)$ , която най-точно описва спецификите на проведените изпитвания и събраните данни. Когато се изследват групирани данни, функцията на правдоподобие  $L(t/\alpha, \beta)$  най-общо изглежда по следния начин [105]:

$$L(t | \alpha, \beta) = \prod_{i=1}^k (F_{iH} - F_{iL})^{n_i} = \prod_{i=1}^k \left[ \left( 1 - e^{-\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta} \right) - \left( 1 - e^{-\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta} \right) \right]^{n_i} = \prod_{i=1}^k \left[ e^{-\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta} - e^{-\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta} \right]^{n_i}, \quad (\text{II. 15})$$

където  $k$  е броят интервали на отчитане;  $n_i$  е броят регистрирани откази в  $i$ -тия интервал,  $\sum_{i=1}^k n_i = n$ ;  $n$  е общия брой регистрирани откази;  $F_{iH}$  и  $F_{iL}$  са стойностите на вероятността за възникване на отказ в горния, респективно долния край на  $i$ -тия интервал  $[t_{iL}, t_{iH})$ .

Нека броят на регистрираните откази в интервалите бъдат означени с  $n_i$ , а броят на оцелелите изделия след края на теста са  $r$ , като общият брой изпитвани изделия е  $r + \sum_{i=1}^k n_i = N$ .

Тогава функцията на правдоподобие придобива крайния си вид:

$$L(t | \alpha, \beta) = \left[ 1 - e^{-\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)^\beta} \right]^{n_1} \cdot \left[ e^{-\left(\frac{t_{k+1L}}{\alpha}\right)^\beta} \right]^r \cdot \prod_{i=2}^k \left[ e^{-\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta} - e^{-\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta} \right]^{n_i}. \quad (\text{II. 18})$$

За удобство при по-нататъшната математическа обработка се преминава към логаритмичната форма [55] на функцията на правдоподобие  $\ell(t/\alpha, \beta)$ :

$$\ell(t | \alpha, \beta) = \ln(L(t | \alpha, \beta)) = n_1 \cdot \ln \left[ 1 - e^{-\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)^\beta} \right] + r \cdot \ln \left[ e^{-\left(\frac{t_{k+1L}}{\alpha}\right)^\beta} \right] + \sum_{i=2}^k n_i \cdot \ln \left[ e^{-\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta} - e^{-\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta} \right]. \quad (\text{II. 19})$$

За оценка на стойностите на параметрите на разпределението на Вейбул се съставят система частни диференциални уравнения на функцията на правдоподобие по  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\frac{\partial \ell}{\partial \alpha} = \varphi_1 = -n_1 \cdot \left[ \frac{\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \beta \cdot e^{-\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)^\beta}}{\alpha \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)^\beta}\right)} \right] + r \cdot \left[ \frac{\left(\frac{t_{k+1L}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \beta}{\alpha} \right] + \sum_{i=2}^k n_i \cdot \left[ \frac{\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \beta \cdot e^{-\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta} - \left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \beta \cdot e^{-\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta}}{\alpha \cdot \left( e^{-\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta} - e^{-\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta} \right)} \right], \quad (\text{II. 20})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ell}{\partial \beta} = \varphi_2 = n_1 \cdot & \left[ \frac{\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)^\beta}}{1 - e^{-\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)^\beta}} \right] - r \cdot \left[ \left(\frac{t_{k+1L}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{k+1L}}{\alpha}\right) \right] + \\ & + \sum_{i=2}^k n_i \cdot \left[ \frac{-\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta} + \left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta}}{e^{-\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta} - e^{-\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta}} \right]. \quad (\text{II. 21}) \end{aligned}$$

След извършване на някои опростявания, се достига до крайния вид на уравненията:

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_1 &= n_1 \cdot \frac{t_{1H}^\beta}{B_1 - 1} - \sum_{i=2}^{k+1} n_i t_{iL}^\beta + \sum_{i=2}^k n_i \cdot \frac{t_{iH}^\beta - t_{iL}^\beta}{A_i - 1} = 0 \\ \varphi_2 &= n_1 \cdot \frac{t_{1H}^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)}{B - 1} - \sum_{i=2}^{k+1} n_i t_{iL}^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right) + \sum_{i=2}^k n_i \cdot \frac{C_i}{A_i - 1} = 0 \end{aligned} \right. , n_{k+1} = r. \quad (\text{II. 28})$$

Опростиането на записа и подготовката на математическия апарат за записването му в модул за машинно изчисляване се постига, като някои пвтарящи се части от изразите са изведени за самостоятелно пресмятане:

$$A_i = e^{-\left[ \left( \frac{t_{iH}}{\alpha} \right)^\beta - \left( \frac{t_{iL}}{\alpha} \right)^\beta \right]}, \quad (\text{II. 29})$$

$$B_1 = e^{\left( \frac{t_{1H}}{\alpha} \right)^\beta}, \quad (\text{II. 30})$$

$$C_i = \left[ t_{iH}^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right) - t_{iL}^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right) \right]. \quad (\text{II.31})$$

Извеждат се изрази за частните производни на двете функции  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  по двата параметъра:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha} = \frac{\beta}{\alpha^{1+\beta}} \cdot \left( n_1 \cdot B_1 \left( \frac{t_{1H}^\beta}{B_1 - 1} \right)^2 + \sum_{i=2}^k n_i \cdot A_i \cdot \left( \frac{t_{iH}^\beta - t_{iL}^\beta}{A_i - 1} \right)^2 \right), \quad (\text{II. 31})$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial \beta} = \frac{n_1 t_{1H}^\beta}{B_1 - 1} \cdot \left[ \ln(t_{1H}) - \frac{\left( \frac{t_{1H}}{\alpha} \right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right) \cdot B_1}{B_1 - 1} \right] - \sum_{i=2}^{k+1} n_i t_{iL}^\beta \cdot \ln(t_{iL}) + \quad (\text{II. 32})$$

$$+ \sum_{i=2}^k \frac{n_i}{A_i - 1} \cdot \left[ t_{iH}^\beta \cdot \ln(t_{iH}) - t_{iL}^\beta \cdot \ln(t_{iL}) - \frac{(t_{iH}^\beta - t_{iL}^\beta) \cdot D_i \cdot A_i}{A_i - 1} \right]$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} = -\frac{1}{\alpha} \cdot \left( \frac{n_1 t_{1H}^\beta}{B_1 - 1} \cdot \left[ 1 - \frac{\left( \frac{t_{1H}}{\alpha} \right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right) \cdot \beta \cdot B_1}{B_1 - 1} \right] + \sum_{i=2}^{k+1} n_i t_{iL}^\beta + \sum_{i=2}^k \frac{n_i}{A_i - 1} \cdot \left[ t_{iL}^\beta - t_{iH}^\beta - \frac{C_i \cdot \beta \cdot \left( \left( \frac{t_{iL}}{\alpha} \right)^\beta - \left( \frac{t_{iH}}{\alpha} \right)^\beta \right)}{A_i - 1} \cdot A_i \right] \right), \quad (\text{II. 33})$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial \beta} = \frac{n_1 t_{1H}^\beta}{B_1 - 1} \cdot \ln\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right) \cdot \left[ \ln(t_{1H}) - \frac{\left( \frac{t_{1H}}{\alpha} \right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right) \cdot B_1}{B_1 - 1} \right] - \sum_{i=2}^{k+1} n_i t_{iL}^\beta \cdot \ln(t_{iL}) \cdot \ln\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right) + \quad (\text{II. 34})$$

$$+ \sum_{i=2}^k \frac{n_i}{A_i - 1} \cdot \left[ t_{iH}^\beta \cdot \ln(t_{iH}) \cdot \ln\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right) - t_{iL}^\beta \cdot \ln(t_{iL}) \cdot \ln\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right) - \frac{C_i \cdot D_i \cdot A_i}{A_i - 1} \right]$$

където

$$D_i = \left( \frac{t_{iH}}{\alpha} \right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right) - \left( \frac{t_{iL}}{\alpha} \right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right). \quad (\text{II.35})$$

### II.2.2.2. Метод на линейното преобразуване MRR.

Получените по гореописания графичен метод данни, нанесени върху Вейбулова вероятностна графика, могат да бъдат апроксимирани с права линия. Определянето на коефициентите на уравнението, описващо тази линия, се извършва чрез регресионен анализ на основата на метода на най-малките квадрати. Най-често, при този подход, се използва оценката на  $F(x_i)$  по формулата на Бернард (оценка по медианата), затова методът получава наименованието Median Rank Regression *MRR* по отношение на  $x$ , се получава линейния израз

Преобразувайки (II.12) по отношение на  $x$ , получаваме линейния израз

$$\gamma = \mu + \sigma \cdot v(p), \quad (\text{II.32})$$

където  $\mu$  и  $\sigma$  представляват Вейбуловите параметри  $\alpha$  и  $\beta$  чрез зависимостите:

$$\mu = \ln(\alpha), \quad \sigma = 1/\beta, \quad (\text{II.33})$$

а  $\gamma$  и  $v$  представят съответно натуралния логаритъм на Вейбуловия  $p$ -квантил  $x$  и двойния логаритъм по отношение на  $p$ :

$$\gamma = \ln(x), \quad v = \ln(\ln(1/(1-p))), \quad p = F(x). \quad (\text{II.34})$$

Събраните данни от изпитвания или други източници представляват наредени двойки числа  $(x, p)$ , които след преобразуване формират точките за разполагане върху Вейбуловата координатна система с координати  $(\gamma_i, v_i)$ . При Вейбулов закон за разпределение, разположението на точките върху координатната система може да се апроксимира с права линия, съгласно израз (II.32). Прилагането на регресионен анализ, по метода на най-малките квадрати, представя оценка стойностите на коефициентите  $\mu$  и  $\sigma$ , а оттам и стойности на Вейбуловите параметри  $\alpha$  и  $\beta$ .

### II.2.2.3. Метод Вейбейс.

Методът, наречен Вейбейс (Weibayes), представлява подход за оценка на параметрите на разпределението на Вейбул при липса на регистрирани откази, или наличие на един или два отказа. В такива условия другите методи не са приложими или резултатите им са с голяма неопределеност. Самото име на метода издава неговата специфика - използването на априорни данни, като исторически данни, инженерен опит, познания за естеството на отказите, за формиране на обосновано предположение за стойността на параметъра на формата  $\beta$ . Използвана е предложената в [56] формула за изчисляване на характеристичното време  $\alpha$ :

$$\hat{\alpha} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\beta}} + (N-n)T^{\hat{\beta}}}{n} \right]^{\frac{1}{\hat{\beta}}}, \quad (\text{II.38})$$

където  $n$  е броят регистрирани откази,  $N$  е общият брой изпитвани изделия,  $T$  е продължителността на изпитванията, а  $t_i$  е времето до отказ на  $i$ -тия елемент,  $i=1, n$ . Получената стойност  $\hat{\alpha}$  представлява оценка на истинското характеристично време  $\alpha$ , получена по метода *ML*.

Когато предмет на анализ са изпитвания с малък брой регистрирани откази, е напълно резонно възникването на проблема с липсата на откази в периода на изпитвания. За такива случаи методът Вейбейс въвежда допълнително допускане, а именно приема се граничната хипотеза за възникване на един отказ в момента след приключване на изпитванията, или  $n=1$ . Тогава оценката придобива вида

$$\hat{\alpha} = \left[ \frac{NT^{\hat{\beta}}}{n} \right]^{\frac{1}{\hat{\beta}}}. \quad (\text{II.39})$$

Методът дава една консервативна оценка на характеристичното време  $\hat{\alpha}$ , задаваща левия край на едностранен доверителен интервал с вероятност 63,2%. С увеличаването на  $n$  нараства доверителната вероятност на твърдението, че истинската стойност на параметъра  $\alpha$  да се намира отдясно на получената по оценка, като при стойност на  $n=2,3$  тя е 90%, а при  $n=4,6$  е 99% [56].

За метода Вейбейс е в сила ограничението за използване само с точни данни за моментите на възникване на откази. Направените проучвания показаха липсата на инструмент, който да е предназначен за използване при изпитвания с периодични проверки и ограничен брой регистрирани откази, или липса на такива.

### II.2.3. Модифициран подход за оценка на групирани данни при Вейбулово разпределение и малко регистрирани откази.

В областта на малките извадки и малък брой откази - от 0 до 7, при групирани данни, е

разработен следният подход, комбиниращ идеите на стандартния метод Вейбейс и метода на максималното правдоподобие ML за групирани данни. Стойността на параметъра на формата  $\beta$  се приема за известна, а оценката на характеристичното време  $\alpha$  се изчислява чрез функцията на правдоподобие от метода на максималното правдоподобие ML за групирани данни.

В предложения подход е използвана получената при математическите преобразувания опростена система от уравнения - израз (II.28). Вследствие на приемането за известна предварително стойност на  $\beta$ , в системата остава неизвестно само характеристичното време  $\alpha$ . След обединяване на двете уравнения на системата, резултатът е уравнение с едно неизвестно от вида:

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \frac{n_1 \cdot t_{1H}^\beta}{B_1 - 1} \left( 1 + \ln \left( \frac{t_{1H}}{\alpha} \right) \right) - \sum_{i=2}^{k+1} n_i \cdot t_{iL}^\beta \left( 1 + \ln \left( \frac{t_{iL}}{\alpha} \right) \right) + \sum_{i=2}^k \frac{n_i}{A_i - 1} (t_{iH}^\beta - t_{iL}^\beta + C_i) = 0, \quad (\text{II.40})$$

където  $A_i$ ,  $B_i$  и  $C_i$  имат вида, представен съответно с изрази (II.29), (II.30) и (II.31).

Когато липсва регистриран отказ за целия период на изпитванията, по аналогия с метода Вейбейс, изчисленията се извършват след приемането на граничната възможност „възникване на един отказ в последния интервал на изпитванията“. Тогава изразът (II.38) придобива вида:

$$\varphi_1 + \varphi_2 = -t_{kL}^\beta \left( 1 + \ln \left( \frac{t_{kL}}{\alpha} \right) \right) + \frac{(t_{kH}^\beta - t_{kL}^\beta + C_k)}{A_k - 1} = 0, \quad (\text{II.41})$$

Условно този подход е наречен “Интервален Вейбейс”.

### II.3. Числени методи за получаване на стойностите на параметрите на Вейбуловото разпределение

Решаването на гореописаните уравнения се извършва с помощта на числени методи за решаване на диференциални уравнения. Избран е методът Нютон-Рафсън (Н-Р) [107] за нелинейни системи, при който с прилагане на итеративен изчислителен алгоритъм се достига до оценка на параметрите  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i - \frac{\varphi_{1,i} \cdot \frac{\partial \varphi_{2,i}}{\partial \beta} - \varphi_{2,i} \cdot \frac{\partial \varphi_{1,i}}{\partial \beta}}{\frac{\partial \varphi_{1,i}}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \varphi_{2,i}}{\partial \beta} - \frac{\partial \varphi_{1,i}}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial \varphi_{2,i}}{\partial \beta}}, \quad (\text{II.42})$$

$$\beta_{i+1} = \beta_i - \frac{\varphi_{2,i} \cdot \frac{\partial \varphi_{1,i}}{\partial \alpha} - \varphi_{1,i} \cdot \frac{\partial \varphi_{2,i}}{\partial \alpha}}{\frac{\partial \varphi_{1,i}}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \varphi_{2,i}}{\partial \beta} - \frac{\partial \varphi_{1,i}}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial \varphi_{2,i}}{\partial \beta}}, \quad (\text{II.43})$$

където знаменателят представлява детерминантата на матрицата на Якоби за системата нелинейни уравнения  $[\varphi_1, \varphi_2]$ .

За решаването на системата от уравнения (II.28) на метода ML се извеждат изрази за частните производни на двете функции  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  по  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha} = \frac{\beta}{\alpha^{1+\beta}} \left( n_1 \cdot B_1 \left( \frac{t_{1H}^\beta}{B_1 - 1} \right)^2 + \sum_{i=2}^k n_i \cdot A_i \cdot \left( \frac{t_{iH}^\beta - t_{iL}^\beta}{A_i - 1} \right)^2 \right), \quad (\text{II.44})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_1}{\partial \beta} &= \frac{n_1 \cdot t_{1H}^\beta}{B_1 - 1} \left[ \ln(t_{1H}) - \frac{\left( \frac{t_{1H}}{\alpha} \right)^\beta \cdot \ln \left( \frac{t_{1H}}{\alpha} \right) \cdot B_1}{B_1 - 1} \right] - \sum_{i=2}^{k+1} n_i \cdot t_{iL}^\beta \cdot \ln(t_{iL}) + \\ &+ \sum_{i=2}^k \frac{n_i}{A_i - 1} \left[ t_{iH}^\beta \cdot \ln(t_{iH}) - t_{iL}^\beta \cdot \ln(t_{iL}) - \frac{(t_{iH}^\beta - t_{iL}^\beta) D_i \cdot A_i}{A_i - 1} \right] \end{aligned} \quad (\text{II.45})$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} = -\frac{1}{\alpha} \left( \frac{n_1 t_{1H}^\beta}{B_1 - 1} \left( 1 - \frac{\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right) \cdot \beta \cdot B_1}{B_1 - 1} \right) + \sum_{i=2}^{k+1} n_i t_{iL}^\beta + \sum_{i=2}^k \frac{n_i}{A_i - 1} \left( t_{iL}^\beta - t_{iH}^\beta - \frac{C_i \cdot \beta \cdot \left( \left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta - \left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta \right)}{A_i - 1} \cdot A_i \right) \right), \quad (\text{II.46})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_2}{\partial \beta} &= \frac{n_1 t_{1H}^\beta}{B_1 - 1} \cdot \ln\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right) \left( \ln(t_{1H}) - \frac{\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right) \cdot B_1}{B_1 - 1} \right) - \sum_{i=2}^{k+1} n_i t_{iL}^\beta \cdot \ln(t_{iL}) \cdot \ln\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right) + \\ &+ \sum_{i=2}^k \frac{n_i}{A_i - 1} \left[ t_{iH}^\beta \cdot \ln(t_{iH}) \cdot \ln\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right) - t_{iL}^\beta \cdot \ln(t_{iL}) \cdot \ln\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right) - \frac{C_i \cdot D_i \cdot A_i}{A_i - 1} \right] \end{aligned}, \quad (\text{II.47})$$

където

$$D_i = \left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{iH}}{\alpha}\right) - \left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right)^\beta \cdot \ln\left(\frac{t_{iL}}{\alpha}\right). \quad (\text{II.48})$$

Понеже извеждането на частните производни при нелинейни функции създава затруднения, за нуждите на инженерния анализ на надеждността решаването на системата уравнения (II.28) може да се извърши чрез представяне на частните производни по модифициран метод на секущите, описан от Чапра в [107]:

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \alpha} = \frac{\varphi_i(\alpha + \delta\alpha, \beta) - \varphi_i(\alpha, \beta)}{\delta\alpha}, \quad i=1,2, \quad (\text{II.49})$$

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \beta} = \frac{\varphi_i(\alpha, \beta + \delta\beta) - \varphi_i(\alpha, \beta)}{\delta\beta}, \quad i=1,2, \quad (\text{II.50})$$

където  $\delta$  е коефициент на изменение.

Изразът за получаване на оценка на параметъра на формата  $\beta$  по (II.13) за точни и ограничени отъясно данни изглежда по следния начин

$$\beta_{i+1} = \beta_i - \frac{\xi_i}{\frac{\partial \xi_i}{\partial \beta}}, \quad (\text{II.51})$$

а производната на  $\xi$  по отношение на  $\beta$  има вида

$$\frac{\partial \xi}{\partial \beta} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^\beta \cdot \ln(t_i)^2}{\sum_{i=1}^n t_i^\beta} - \frac{\left( \sum_{i=1}^n t_i^\beta \cdot \ln(t_i) \right)^2}{\left( \sum_{i=1}^n t_i^\beta \right)^2} + \frac{1}{\hat{\beta}^2}, \quad (\text{II.52})$$

С така получената оценка на  $\beta$  се изчислява характеристикното време  $\alpha$  по уравнение (II.14).

В случая също може да се опрости изчислителната процедура с прилагане на модифицирания метод на секущите:

$$\beta_{i+1} = \beta_i - \frac{\delta \beta_i \cdot f_i(\beta)}{f(\beta_i + \delta \beta_i) - f(\beta_i)}. \quad (\text{II.53})$$

За решаването на уравнението (II.40) на предложения модифициран подход „Интервален Вейбейс“ по избрания числен метод Нютон-Рафсън е изведена производната на  $(\varphi_1 + \varphi_2)$  по  $\alpha$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\varphi_1 + \varphi_2)}{\partial \alpha} &= \frac{n_1 t_{1H}^\beta}{\alpha \cdot (B_1 - 1)} \cdot \left( \frac{\left( 1 + \ln\left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right) \right) \cdot \beta \cdot \left(\frac{t_{1H}}{\alpha}\right)^\beta \cdot B_1}{B_1 - 1} - 1 \right) + \sum_{i=2}^{k+1} \frac{n_i t_{iL}^\beta}{\alpha} + \\ &+ \sum_{i=2}^k \frac{n_i \cdot (t_{iH}^\beta - t_{iL}^\beta)}{\alpha \cdot (A_i - 1)} \cdot \left( \frac{(t_{iH}^\beta - t_{iL}^\beta + C_i) \cdot \beta \cdot A_i}{\alpha^\beta \cdot (A_i - 1)} + 1 \right) \end{aligned} \quad (\text{II.54})$$

Производната по  $\alpha$  в случая на липсващи откази се получава в следния вид, изведена от (II.41):

$$\frac{\partial(\varphi_1 + \varphi_2)}{\partial\alpha} = \frac{1}{\alpha} \left[ t_{kL}^\beta + \frac{\beta \cdot (t_{kH}^\beta - t_{kL}^\beta + C_k) \left( \left( \frac{t_{kH}}{\alpha} \right)^\beta + \left( \frac{t_{kL}}{\alpha} \right)^\beta \right) \cdot A_k}{(A_k - 1)^2} \right]. \quad (\text{II.55})$$

#### **II.4. Критерии за оценяване на приложимостта на методите за анализ на данни от ускорени изпитвания**

Методите за анализ на надеждността по данни от ускорени изпитвания са обект на изследване на редица учени - Филев [3], Нелсън [55], Елсайед [80], Абернети [105] и др. Описани са преимуществата и недостатъците им по отношение на: видовете анализирани данни; законите на разпределение на изследваните случайни величини; спецификите на извършваните изпитвания - брой на изпитваните изделия, брой и начин на прилагане на въздействащите фактори; брой на регистрирани откази и др.

Достиженията в тази посока могат да бъдат допълнени и обогатени чрез изследването на методите посредством „Монте Карло“ симулации. Генерират се голям брой псевдослучайни поредици от числа, симулиращи моменти на възникване на откази с характер на точни, групирани или цензурирани данни, подчиняващи се на даден закон на разпределение с известни параметри. С помощта на изследвания метод се получават оценки на параметрите на закона за разпределение.

Възможностите на статистическата обработка и анализ на данни от „Монте Карло“ симулации са предпоставка да бъдат формулирани и предложени следните допълнителни критерии за избор на метод за анализ в реални изпитвания:

а) отношението на броя получени „възможни“ оценки на изследваните параметри към общия брой проведени изследвания, като под „възможни“ оценки се разбира „стойности, имащи физически смисъл и в предварително приет диапазон на отклонение от истинските стойности на параметрите“;

б) отношението на броя получени „грешни“ резултати към общия брой проведени изследвания, като под „грешни“ резултати се разбира „стойности, които нямат физически смисъл или са извън предварително приет диапазон на отклонение от истинските стойности на параметрите“;

в) статистически параметри на получаваните „възможни“ оценки - средна стойност, дисперсия и др.;

г) процентно разпределение и средна стойност на получените „възможни“ резултати според броя на регистрираните откази;

е) разпределение на „възможните“ резултати в различни диапазони на точност спрямо истинските стойности на параметрите, а ако са повече от един - изследвани за едновременно им удовлетворяване на зададените изисквания;

ж) големина на получаваните интервални оценки на изследваните параметри, при приета предварително доверителна вероятност.

#### **II.5. Изводи и заключения**

В настоящата глава е извършено изследване и анализ на методологии за прогнозиране на надеждността и на методи за оценка на данни от изпитвания по надеждност. Разгледани са основните използвани в момента методологии за прогнозиране по надеждност на етап Проектиране на електронни изделия. Направено е описание на тяхната идеология. Таблица II.1 представя обобщено сравнение на изследваните методологии. Обоснован е изборът на използваната по-нататък методология.

Проучени са основните методи за анализ на надеждността въз основа на данни от ускорени изпитвания. Избрани са методите, подходящи за използване при налични групирани данни. Разгледан е методът Вейбейс, приложим в случаи на малко регистрирани откази и известна стойност на параметъра на формата  $\beta$ . По същността си методът е предназначен за работа с точни или цензурирани данни, поради което възниква необходимост да се потърси

подобно решение за групирани данни. В тази връзка е разработен и предложен подход, базиращ се на приемането за известна стойността на параметъра  $\beta$  и използващ математическия апарат на метода на максималното правдоподобие ML, с работно наименование „Интервален Вейбейс“. За целта на следващите изследвания на избраните методи и предлагания подход, са изведени необходимите изрази и са направени преобразувания и опростявания на прилагания математически апарат.

Предложени са критерии за оценяване на данните от извършвани симулационни изследвания, резултатите от които могат да се използват при обосноваването на избор на метод за анализ на данни от ускорени изпитвания. Тези критерии са използвани в глава IV на дисертацията по отношение на избраните методи за анализ на групирани данни, подчиняващи се на Вейбуловия закон за разпределение на случайни величини. Критериите имат общ характер и могат да се използват за изучаването на свойствата на други методи, за различни закони за разпределение и вид на данните - точни, цензурирани или групира ни.

### **ГЛАВА III. Способи и предложения за решаването на някои проблеми при прогнозирането на надеждността на електронни изделия**

#### **III.1. Практически подход за определяне на допустимите граници на изменение на въздействащите фактори при зададена допустима стойност на интензивността на отказите**

Съвременните продукти за анализ на надеждността [116],[117],[118],[119] предлагат информация само за граничните значения на въздействащите фактори при зададена допустима стойност на интензивността на отказите. Тази информация, на пръв поглед достатъчна, представя ограничен поглед към многомерното пространство на стойностите на интензивността на отказите, определено от множеството фактори, въздействащи върху надеждността на електронните изделия. За разширяване на обхвата на резултатите при определяне на допустимите граници на изменение на въздействащите фактори при зададена максимална стойност на интензивността на отказите, е разработен подход, който предлага по-широк поглед върху възможностите за оптимизиране на създаваното изделие. Резултатът от прилагането на подхода не е само единична оценка на надеждността, а набор от стойности на интензивността на отказите и конкретните значения на определящите ги фактори. Подходът е разработен на база на избраната в глава II методология MIL-HDBK-217F.

##### **III.1.1. Математически апарат**

За представяне на разработения подход в най-общия случай е прието, че се изследва елемент с базова интензивност на отказите  $\lambda_b$  и  $m$  на брой въздействащи фактори. С  $X_i$  е обозначен векторът на стойностите на въздействие на  $i$ -тия фактор, съставен от краен брой  $u(i)$  стойности.  $\Pi_i$  представлява вектора със съответните стойности на коефициентите на въздействие на  $i$ -тия фактор, получени чрез функцията  $\psi_i(x_i)$ , описваща влиянието на  $i$ -тия фактор. Формули (III.1), (III.2) и (III.3) представят в математическа форма горните разсъждения:

$$X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iu(i)}\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (III.1)$$

$$\Pi_i = \{\pi_{i1}, \pi_{i2}, \dots, \pi_{iu(i)}\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (III.2)$$

и

$$\pi_{ij} = \psi_i(x_{ij}), \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, u(i)}. \quad (III.3)$$

Факторите  $X_i$  могат да приемат стойности от числов или лингвистичен тип, докато коефициентите им на въздействие  $\pi_i$  са само от числов тип.

Извършвайки изчисления съобразно израз (II.8) по всички комбинации от приетите стойности на всички фактори, се достига до  $(m \prod_i u(i))$  броя стойности за интензивността на отказите на елемента, формиращи област на интензивността на отказите в  $m$ -мерното пространство на въздействащите фактори. Колкото  $u(i)$  са по-големи числа, толкова по-пълно е описанието на областта на интензивността на отказите.

Най-общо горните действия представяме с изказа:

$$A = \lambda_b \times (\Pi_1 \times \Pi_2 \times \Pi_3 \times \dots \times \Pi_m), \quad (III.4)$$

където  $A$  е  $m$ -мерна матрица на стойностите на интензивността на отказите.

За по-нагледно представяне се процедира по следния начин:

Нека първите два фактора се изменят в целия наблюдаван диапазон, а другите се приемат за фиксирани. Нека всички коефициенти на въздействие без първите два приемат първите си стойности, а първите два да се изменят по целия си диапазон. Тогава може да се създаде матрица  $\Lambda_I^{(1,2)}$  с размерност  $u^{(1)} \times u^{(2)}$  на стойностите на интензивността на отказите по следния начин:

$$\Lambda_1^{(12)} = (\lambda_b \cdot \pi_{31} \cdot \pi_{41} \cdot \dots \cdot \pi_{m1}) \cdot \|\Pi\|. \quad (III.5)$$

Фигура III.2 представя матрицата  $\Lambda_I^{(1,2)}$ .

Извършвайки последователно умножение с всички комбинации от стойности на коефициентите на влияние  $X_3 \div X_m$ , се получава масив от  $p$  броя двумерни матрици, описващи стойностите на интензивността на отказите в  $m$ -мерната област, определена от отчитаните фактори на влияние:

$\Lambda_1^{(12)}$	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	----	$x_{2u(2)}$
$x_{11}$	$\lambda_{11}^{(12)}$	$\lambda_{12}^{(12)}$	$\lambda_{13}^{(12)}$	----	$\lambda_{1u(2)}^{(12)}$
	$\lambda_{21}^{(12)}$	$\lambda_{22}^{(12)}$	$\lambda_{23}^{(12)}$	----	$\lambda_{2u(2)}^{(12)}$
$x_{13}$	$\lambda_{31}^{(12)}$	$\lambda_{32}^{(12)}$	$\lambda_{33}^{(12)}$	----	$\lambda_{3u(2)}^{(12)}$
----	----	----	----	----	----
$x_{1u(1)}$	$\lambda_{u(1)1}^{(12)}$	$\lambda_{u(1)2}^{(12)}$	$\lambda_{u(1)3}^{(12)}$	----	$\lambda_{u(1)u(2)}^{(12)}$

Фиг. III.2. Матрица на интензивностите на отказите по фактори 1 и 2.

$$\Lambda_i^{(12)} = (\lambda_b \cdot \pi_{3j} \cdot \pi_{4k} \cdot \dots \cdot \pi_{mr}) \cdot \|\Pi_1' \times \Pi_2\|, i = \overline{1, p}, \quad (III.6)$$

където  $p = \prod_{i=3}^m u_i$ , а на всяко  $i$  съответства наредена група числа, представляващи индексите на коефициентите на въздействие, например на  $i=1$  съответства наредената  $(m-2)$ -ка единици  $\{1,1,1,1,\dots,1\}$ , за  $i=2$  -  $\{2,1,1,1,\dots,1,\dots,1\}$ , и т.н. Добавяйки към индекса  $i$  индексите на съответните коефициенти за първия и втория фактор, всяка точка от областта на интензивността на отказите, представляваща изчислената стойност за съответна комбинация от коефициенти на въздействие, има за координати комбинацията от индексите на коефициентите на въздействие, чрез които е изчислена.

Получените резултати могат да се ползват за определяне на допустимите граници на изменение на въздействащите фактори при зададена максимална стойност на интензивността на откази:

$$\lambda(x_{1j(1)}, x_{2j(2)}, x_{3j(3)}, \dots, x_{mj(m)}) < \lambda_i, \quad (III.7)$$

където  $\lambda(x_{1j(1)}, x_{2j(2)}, x_{3j(3)}, \dots, x_{mj(m)})$  - интензивност на отказите при определената комбинация от стойности на въздействащите фактори  $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_m\}$ .

Това представлява решаване на следния въпрос, възникващ в процеса на прогнозирането на надеждността и оптимизиране на конкретното схемотехническо решение, а именно - при зададена гранична стойност на интензивност на отказите да се определят допустимите диапазони на изменение на въздействащите фактори.

От всички изчислени стойности на интензивността на отказите се избират най-близките и по-малки от зададената гранична стойност. По техните координати се определят стойностите на коефициентите на съответните фактор, а чрез обратната функция на  $\psi_i(x_i)$  се определят стойностите на фактора:

$$x_{ij} = \Psi_i(\pi_{ij}), \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, u(i)}, \quad \Psi_i = \psi_i^{-1}. \quad (III.8)$$

По този начин се формира описание на областта от пространството на факторите, осигуряваща интензивност на отказите в зададените граници.



Получената информация може да послужи като база за избор на най-оптималния вариант на подходящи елементи и условия на работа, при който се комбинират едновременно допустима стойност на интензивността на отказите, възможни за практическо изпълнение параметри на наблюдаваните фактори, и приемливи технико-икономически показатели.

В практиката обикновено голямата част от факторите са недостъпни за изменение за проектантите. Затова обикновено задачата се свежда до определяне на обективните стойности на тези фактори и подлагане на анализ варирането на един или два фактора. Тогава резултатите могат да се представят в графичен вид, с криви, свързващи точките с еднаква интензивност на отказите.

Процесът на анализ в софтуерните продукти за прогнозиране е насочен към даване на оценка на надеждността, след като са определени и въведени всички параметри на въздействащите фактори и са избрани конкретни елементи с техните специфични характеристики. Предложеният подход предлага по-широк поглед върху възможностите за оптимизиране на създаваното изделие. Резултатът от прилагането на подхода не е само единична оценка на надеждността, а показва на инженер-конструктора широка област от допустими стойности и му дава възможност да се ориентира по-цялостно и да избере най-доброто конкретно решение, включващо не само избор на подходящите елементи, но и оптималното подбиране на факторите на въздействие.

### III.1.2. Приложение на разработения подход.

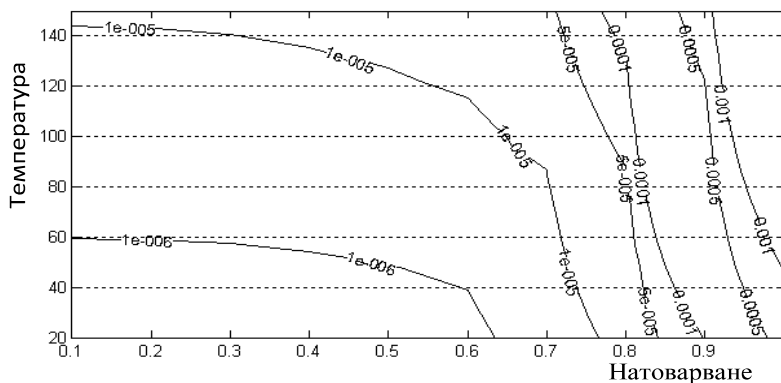
Изследвана е надеждността на няколко типа кондензатори с два свободно изменящи се фактора на въздействие. В практиката част от факторите са предварително познати, и в по-голяма или по-малка степен недостъпни за управление. Случаят с два свободни за изменение фактори може да се приеме за най-често срещан и достатъчно представителен, което дава основание да бъде използван в настоящия пример.

Приложена е предлаганата в MIL-HDBK-217 [41] методика за изследване на влиянието на излишъка по натоварване върху кондензатори от различен тип и предназначение, показани в таблица III.1. Данните в таблицата са взети от MIL-HDBK-217 и представляват стойностите на базовите интензивности на отказите  $\lambda_b$ , коефициентите на въздействие на факторите качество  $\pi_Q$ , среда на експлоатация  $\pi_E$ , стойност на капацитета  $\pi_C$ , и вариантите  $k$  и  $l$  на изчисление съответно на въздействието на температурата  $\pi_t$  и на приложеното напрежение  $\pi_v$ ,  $k=\{1,2\}$   $l=\{1,5\}$ .

Таблица III.1.Изследвани елементи

	Тип и стойност	$\lambda_b$ , [часа <sup>-1</sup> ]	$\pi_Q$	$\pi_E$	$\pi_C$	$k$ , вариант на $\pi_t$	$l$ , вариант на $\pi_v$
$A_l$	Електролитен $Al_2O_3$ , 220 $\mu F$	$0.00012 \cdot 10^{-6}$	3	10	3.46	2	1
$C$	Керамичен, 100 nF	$0.00099 \cdot 10^{-6}$	3	10	.81	2	3
$T$	Електролитен танталов, 10 $\mu F$	$0.00040 \cdot 10^{-6}$	3	10	1.7	1	4
$CC$	Многослоен керамичен, чип, 100 nF	$0.0020 \cdot 10^{-6}$	3	10	.81	2	3
$TC$	Електролитен танталов, чип, 4.7 $\mu F$	$0.00005 \cdot 10^{-6}$	3	10	1.43	1	4

Описаният по-горе начин е използван за оценяване на системната интензивност на отказите на електронна схема с последователна структурна диаграма по надеждност във функция от две свободни променливи - стойностите на двата фактора на въздействие - температура и натоварване. Получената номограма на стойностите на интензивността на отказите, показана на фигура III.7, дава възможност да се определи най-подходящото и



Фиг. III.7. Номограма на интензивността на отказите

конструктивно оптимално решение по отношение на условията на работа и електрическото натоварване на елементите. След това се пристъпва към избора на най-подходящите по параметри елементи за вграждане.

Друг възможен начин на представяне на данните е табличния. При зададена допустима стойност на интензивността на отказите  $\lambda_{дон}=5*10^{-6}$  [часа<sup>-1</sup>], се извършва сравняване на изчислените стойности на интензивността на отказите за различни комбинации от стойност на въздействащите фактори температура и натоварване. Таблица III.2 съдържа всички точки от изследваната област на изменение на интензивността на отказите, които удовлетворяват изискването  $\lambda_i < \lambda_{дон}$ . Фигура III.7 представя резултатите от таблица III.2 в графичен вид.

Таблица III.2. Таблично представяне на областта на допустимите стойности на интензивността на отказите.

Интензивност на отказите, [часа <sup>-1</sup> ]	Наговарване	Температура, [°C]	Интензивност на отказите, [часа <sup>-1</sup> ]	Наговарване	Температура, [°C]	Интензивност на отказите, [часа <sup>-1</sup> ]	Наговарване	Температура [°C]	Интензивност на отказите, [часа <sup>-1</sup> ]	Наговарване	Температура, [°C]
0,25*10 <sup>-6</sup>	0,1	20	0,27*10 <sup>-6</sup>	0,3	20	0,34*10 <sup>-6</sup>	0,5	20	1,92*10 <sup>-6</sup>	0,7	20
0,35*10 <sup>-6</sup>	0,1	29	0,38*10 <sup>-6</sup>	0,3	29	0,48*10 <sup>-6</sup>	0,5	29	2,45*10 <sup>-6</sup>	0,7	29
0,49*10 <sup>-6</sup>	0,1	39	0,52*10 <sup>-6</sup>	0,3	39	0,68*10 <sup>-6</sup>	0,5	39	3,10*10 <sup>-6</sup>	0,7	39
0,68*10 <sup>-6</sup>	0,1	48	0,72*10 <sup>-6</sup>	0,3	48	0,94*10 <sup>-6</sup>	0,5	48	3,92*10 <sup>-6</sup>	0,7	48
0,92*10 <sup>-6</sup>	0,1	57	0,99*10 <sup>-6</sup>	0,3	57	1,30*10 <sup>-6</sup>	0,5	57	4,93*10 <sup>-6</sup>	0,7	57
1,24*10 <sup>-6</sup>	0,1	66	1,33*10 <sup>-6</sup>	0,3	66	1,77*10 <sup>-6</sup>	0,5	66			
1,65*10 <sup>-6</sup>	0,1	76	1,78*10 <sup>-6</sup>	0,3	76	2,38*10 <sup>-6</sup>	0,5	76			
2,18*10 <sup>-6</sup>	0,1	85	2,35*10 <sup>-6</sup>	0,3	85	3,16*10 <sup>-6</sup>	0,5	85			
2,84*10 <sup>-6</sup>	0,1	94	3,07*10 <sup>-6</sup>	0,3	94	4,15*10 <sup>-6</sup>	0,5	94			
3,67*10 <sup>-6</sup>	0,1	104	3,97*10 <sup>-6</sup>	0,3	104	0,51*10 <sup>-6</sup>	0,6	20			
4,69*10 <sup>-6</sup>	0,1	113	0,29*10 <sup>-6</sup>	0,4	20	0,71*10 <sup>-6</sup>	0,6	29			
0,26*10 <sup>-6</sup>	0,2	20	0,41*10 <sup>-6</sup>	0,4	29	0,98*10 <sup>-6</sup>	0,6	39			
0,36*10 <sup>-6</sup>	0,2	29	0,57*10 <sup>-6</sup>	0,4	39	1,35*10 <sup>-6</sup>	0,6	48			
0,50*10 <sup>-6</sup>	0,2	39	0,80*10 <sup>-6</sup>	0,4	48	1,84*10 <sup>-6</sup>	0,6	57			
0,69*10 <sup>-6</sup>	0,2	48	1,09*10 <sup>-6</sup>	0,4	57	2,47*10 <sup>-6</sup>	0,6	66			
0,94*10 <sup>-6</sup>	0,2	57	1,48*10 <sup>-6</sup>	0,4	66	3,30*10 <sup>-6</sup>	0,6	76			
1,26*10 <sup>-6</sup>	0,2	66	1,98*10 <sup>-6</sup>	0,4	76	4,34*10 <sup>-6</sup>	0,6	85			
1,68*10 <sup>-6</sup>	0,2	76	2,63*10 <sup>-6</sup>	0,4	85						
2,22*10 <sup>-6</sup>	0,2	85	3,44*10 <sup>-6</sup>	0,4	94						
2,90*10 <sup>-6</sup>	0,2	94	4,45*10 <sup>-6</sup>	0,4	104						
3,74*10 <sup>-6</sup>	0,2	104									
4,78*10 <sup>-6</sup>	0,2	113									

За реализиране на предложения алгоритъм е необходимо да се изследват и уточнят прецизно граничните стойности на параметрите и комбинацията от тях, при която електронната система все още остава в работоспособно състояние. Следващият раздел е посветен на решаването на този казус.

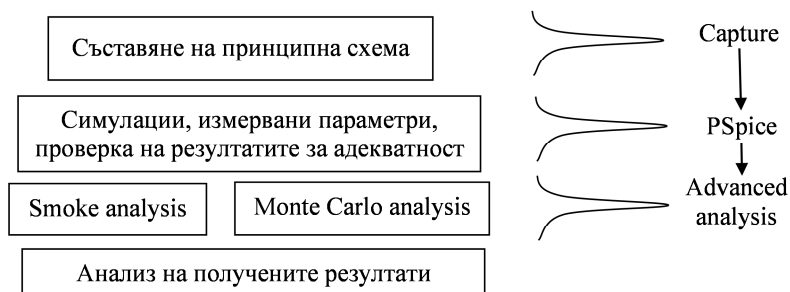
### III.2. Оценяване на въздействието на производствените толеранси върху надеждността на електронните системи. Разработване на алгоритъм за прогнозна оценка на интензивността на отказите с отчитане на толерансите на елементите

Доколкото електрическите изчисления на схемите се правят за номинален режим на работа, тези изчисления не дават пълна представа за възможните гранични състояния, породени от толерансите в стойностите на параметрите на отделните елементи, изграждащи схемата, флукуациите на входните сигнали и захранващото напрежение. На етапа на проектиране толерансите се вземат под внимание най-вече при оценяване на грешката при измервателната електроника [25], и отклоненията в основните изходни показатели на устройствата. Изменението на работните електрически натоварвания, породено от различните съчетания на стойности на елементите, могат да доведат до промяна на режима на работата им и оттам да се влошат показателите на надеждност на устройството като цяло. Целесъобразно е, за да се повиши ефективността на извършвания анализ на надеждността, да се планират симулационни процедури, даващи оценка на съвместното въздействие на отклоненията от номиналните стойности на параметрите, още преди изработването на прототипи на изделията.

#### III.2.1. Анализ на възможностите за използване на някои модули за симулация при прогнозирането на надеждността

Средата за автоматично проектиране *OrCAD 16.0* е сред най-предпочитаните за проектиране на електронни устройства. Това е причината да бъдат разгледани предлаганите от този продукт средства за симулация и статистическа обработка на натрупаната информация за повишаване на надеждността и оптималния избор на елементна база.

Модулите за симулации в *OrCAD 16.0* дават възможност за пълен електрически анализ на работата на изследваната схема. Могат да се изчислят стойностите на електрическите величини, които определят пряко или индиректно електрическото или термичното натоварване на компонентите [79], [108]. Фигура III.10 представя последователността на работа в средата на *OrCAD* и модулите, които могат да бъдат използвани при оценка на надеждността на изделията.



Фиг. III.10. Обобщена схема на работа в среда OrCAD

Изследвани са два от модулите на OrCAD - “*Smoke*” и “*Monte Carlo Advanced*”. “*Smoke*” анализът има задачата да даде оценка на степента на натоварване на елементите по отношение на някои решаващи за надеждната им работа показатели - разсейвана мощност, температура на прехода, допустими стойности на протичащия ток или приложеното напрежение. Анализът “*Monte Carlo Advanced*”(MCA) се използва за статистически анализ на поведението на електронната схема при изменение на стойностите на параметрите на съставлящите я елементи в рамките на техните толеранси.

#### III.2.2. Алгоритъм за оценка на надеждността на изделията с отчитане на толерансите на елементите.

Разработен е алгоритъм, с прилагането на който се постига по-широкообхватното оценяване на надеждността на изделията, позволявайки да се ограничи неопределеността по отношение на въздействието на толерансите на изграждащите една система елементи.

Алгоритъмът включва следните стъпки:

1. Съставяне на симулационни модели на съставлящите компоненти с параметри, съответстващи на техническото им описание. Изграждане на принципна схема.

2. Провеждане на симулационен анализ в PSpice - времеви (Transient), постоянен ток (DC Sweep) или променлив ток (AC Sweep/Noise). Проверка на адекватността на получаваните характеристики.

3. Извършва се анализ "Smoke". Отчита се натоварването на компонентите по различните показатели (работна температура, разсейвана мощност и др.).

4. Сравняват се натоварванията на елементите с предварително определените за осигуряване излишъци по натоварване (определени от проектанта, или изисквани от методологията за изчисление на надеждността [42]). Елементите с недостатъчен излишък по натоварване се заменят с такива с по-висока издръжливост, правят се съответните корекции на параметри в симулационните им модели, и изпълнението на алгоритъма се връща в т.2.

5. В PSpice се извършват изчисления по отношение на основните параметри, обуславящи нормалната работа на схемата.

6. Извършва се анализ "Monte Carlo Advanced" за тези параметри.

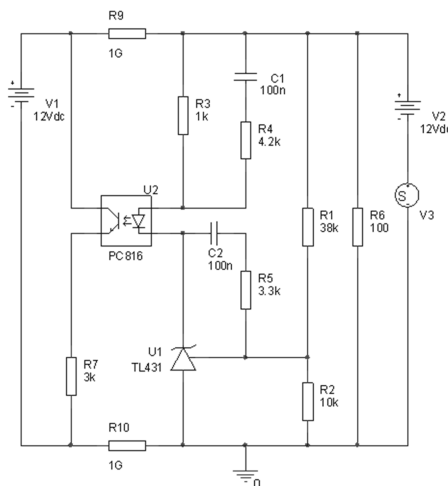
7. По получените резултати и предварително зададените изисквания за допустими отклонения на изходните параметри и за рандемана на производствения процес, се оценява работата на схемата. При показатели на разсейването в норма се отива към т. 10 от алгоритъма.

8. При по-голямо от допустимото разсейване на контролираните параметри се търси решение чрез намаляване на толерансите на елементите, пряко свързани с изходните резултати. Изпълнението на алгоритъма се връща в т.5, докато се изчерпят възможностите за въздействие чрез повишаване на точността на елементите.

9. Премахва се към търсене на ново схемотехническо решение. Изпълнението на цикъла започва отначало – т.1.

10. На база на получените данни за избраните елементи, условията на работа и степента на натоварване се извършва изчисление на интензивността на отказите по избрана предварително методология.

За илюстриране на действието на представения алгоритъм са извършени изследвания на модул за обратна връзка, използван много често при импулсните преобразуватели на напрежение.



Фиг. III.12. Модул за обратна връзка на база на TL431.

В PSpice е проведен времеви анализ (Time Domain), за период от 300ms, достатъчен за установяване на стационарен режим на работа на схемата. За температура на околната среда е избрана 40°C. Стойностите на резисторите R1 и R2 са изчислени при номинална стойност на изходното напрежение +12V. При симулациите е използван допълнителен източник на напрежение V3, създаващ изместване на стойността на изходното напрежение  $U_{изх}$ , измерено върху R6, от номиналната. Изследвани са два случая – при синусоидална форма на изместващото напрежение, и при линейно изменяща се стойност, в рамките на -1 до +1V. Установено е съответствие на резултатите от симулацията с очакваната работа на схемата за обратна връзка. При стойности на пада на напрежение  $U_{R2}$  върху резистора R2 по-малки или равни на 2.49V, токът  $I_{U2}$  през светодиода на оптрона U2 е равен на нула, а при нарастване на

$U_{R2}$  над 2.49V токът  $I_{U2}$  нараства до 11mA. Фигура III.13 показва формата на изменение на изходното напрежение  $U_{изх}$ , пада на напрежение  $U_{R2}$  върху R2, тока през светодиода на оптрона  $I_{U2}$ , тока през фототранзистора на оптрона  $I_{R7}$  и изместващото напрежение  $U_{V3}$ .

След установяване на съответствието между наблюдавания и очаквания начин на работа на схемата, е стартиран анализ на натоварването "Smoke". Резултатите от анализа "Smoke" са представени в таблица III.7. Показани са само компонентите, чието натоварване е по-голямо от 1%. Показателите на натоварване, които се използват пряко за оценка на надеждността, са подчертани.

Таблица III.7. Показатели на натоварването за елементите от схемата.

Компонент	Параметър		Тип	Номинална стойност	Допустимо натоварване, %	Максим. стойност на натоварване	Измерена стойност	Натоварване, %
C2	CV	Макс. напрежение	Peak	16	100	16	8,5702	<u>54</u>
C2	CV	Макс. напрежение	Average	16	100	16	7,5878	48
R5	TB	Макс. температура	Average	200	100	200	<u>40,0008</u>	21
R1	TB	Макс. температура	Average	200	100	200	<u>41,4068</u>	21
R2	TB	Макс. напрежение	Average	200	100	200	<u>40,3636</u>	21
R2	TB	Макс. напрежение	Peak	200	100	200	<u>40,3971</u>	21
R3	TB	Макс. температура	Average	200	100	200	<u>40,8525</u>	21
R4	TB	Макс. температура	Average	200	100	200	<u>40,0103</u>	21
R4	TB	Макс. температура	Peak	200	100	200	<u>40,0922</u>	21
C1	CV	Макс. напрежение	Peak	16	100	16	3,0424	<u>20</u>

За изследването на влиянието на толерансите на съставлящите компоненти върху стойността на изходното напрежение  $U_{изх}$ , при провеждането на анализа *Monte Carlo Advanced (MCA)* на входа се подава постоянно напрежение  $U_{вх}$  с големина, равна на номиналната стойност на изходното напрежение  $U_{изх(ном)} = +12V$ . Изпълнява се анализ "DC Sweep" за проверка на работата на схемата, изменяйки напрежението на V1 в диапазона 10,8÷14V. След това се стартира времеви анализ (*Time Domain*) при номинална стойност на изходното напрежение за V1=12V, и се извършва изчисление на основните параметри, които характеризират работата на схемата, а именно максималната стойност на пада на напрежение върху R2 и максималният ток през светодиода на U2.

За така посочените параметри е стартиран анализ MCA. Параметри на анализа са: - брой симулации N= 3000; - брой интервали k=28. Вторият показател е изчислен по правилото на Стърджис [3]:

$$k = 1 + 3,3 \cdot \ln(N). \quad (III.25)$$

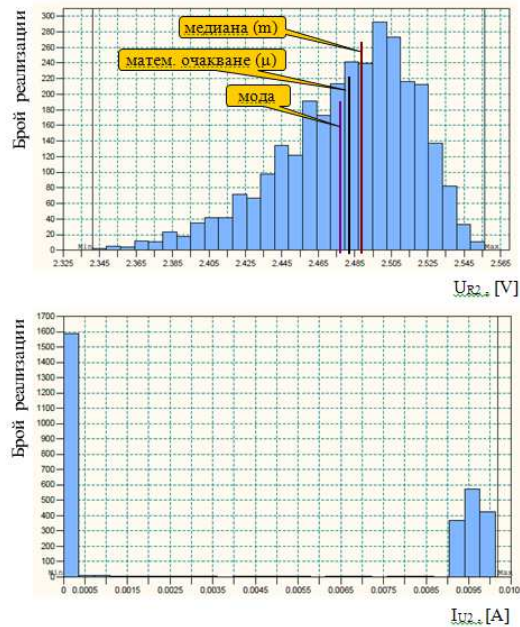
Фигура III.14 представя хистограмите на плътностите на разпределение  $f(U_{R2})$  и  $f(I_{U2})$ . Хистограмата на тока показва съсредоточаване на изходните стойности в две области - около 0mA и около 10mA, съответстващо на принципа на работа на схемата.

По хистограмата на пада на напрежение върху R2 се забелязва известно отклонение на разпределението вдясно от нормалното. Наличната база от данни за всички индивидуални стойности на  $U_{R2}$  за отделните реализации могат да се използват за по-детайлен статистически анализ, с изчисление на модата (mode) и асиметрията (skewness). Получените резултати са включени в таблица III.8, и отбелязани на фиг.III.14.

При зададено допустимо отклонение  $\Delta = \pm 5\%$  на изходното напрежение  $U_{out}$  проверяваме изпълнението на условието  $|\Delta| \geq 3\sigma$ . Установяваме, че условието е нарушено, което налага вземане на решение за промяна на толерансите на резисторите R1 и R2.

Таблица III.8. Статистически оценки на параметрите на разпределенията на  $U_{R2}$  и  $U_{изх}$

Измервана величина	"Cursor Min"	"Cursor Max"	"Yield" $\gamma$	$\mu$	$\sigma$	$\pm 3 \sigma$	m	mode	skewness
$U_{R2}, V$	2,3412	2,5562	99,96%	2,4812	0,03704	99,4%	2,4869	2,4762	-0,7394
$U_{изх}, V$	11,736	12,814	99,95%	12,094	0,1827	99,2%	12,062	12,115	0,8199



Фиг. III.14. Хистограми на плътностите на разпределение  $f(UR2)$  и  $f(IU2)$ .

След установяване на натоварванията на елементите съобразно предварително зададени изисквания, и осигуряване на стойностите на изходни параметри в допустимите граници, се пристъпва към оценяване на надеждността на изследваната схема. Използван е подхода “*Part stress*” на MIL-HDBK-217F. В таблица III.9 са представени прогнозните оценки на интензивността на отказите на отделните компоненти и на схемата като цяло. На този етап се разглежда единствено надеждността на избраното схемно решение, без оценка на влиянието на производствените и логистичните процеси.

Таблица III.9. Интензивности на отказите на елементите и на схемата като цяло.

	$\lambda_b, *10^{-6}$ часа	$\pi_T(2)$	$\pi_R$	$\pi_S(1)$	$\pi_Q$	$\pi_E$	$\lambda_s, *10^{-6}$ часа
<b>R1</b>	0,0037	1,2	0,444421	0,725793	10	1	0,014322
<b>R2</b>	0,0037	1,2	0,444421	0,717853	10	1	0,014165
<b>R3</b>	0,0037	1,2	0,444421	0,717853	10	1	0,014165
<b>R4</b>	0,0037	1,2	0,444421	0,717853	10	1	0,014165
<b>R5</b>	0,0037	1,2	0,444421	0,717853	10	1	165
	$\lambda_b$	$\pi_T(2)$	$\pi_C(1)$	$\pi_V(3)$			
<b>C1</b>	0,002	1,3	0,81	1	10	1	0,02106
<b>C2</b>	0,002	1,3	0,81	1,348678	10	1	0,028403
	$C_1$	$\pi_T$	$C_2$	$\pi_E$	$\pi_Q$	$\pi_L$	
<b>U1</b>	0,0025	16	0,0012	0,5	2	1	0,0812
	$\lambda_b$	$\pi_T$	$\pi_Q$	$\pi_E$			
<b>U2</b>	0,013	1,7	8	1			0,1768
					Обща интензивност на отказите на схемата:		<b>0,37844</b>

Получаваното преимущество по отношение на процеса на прогнозна оценка на надеждността на схемата, получавано при използването на възможностите на автоматизираните системи за проектиране и симулация, спрямо прогнозирането без използването им, е допълнителната информация за редица параметри на работните режими на елементите, които се използват при изчисленията на интензивността на отказите по използвания метод *Part stress Analysis*. Тази информация може да послужи като основен източник на данни, или да се използва за потвърждаване на предварително приети или изчислени стойности на параметрите на работните режими на елементите. И в двата случая използването на гореописания алгоритъм повишава точността на получаваните оценки на параметрите на надеждност. С представеното прилагане на алгоритъма е постигнато по-пълно изследване на проектираната схема, като са изследвани работните режими на елементите по отношение на електрическото им натоварване и работна температура. Въз основа на тези изследвания са подбрани елементи с такива номинални електрически параметри, които осигуряват наличието на необходимия резерв по натоварване, с цел постигане на поставените като цел стойности на показателите на надеждност на схемата. Изследвано е влиянието на толерансите на елементите върху стойностите на основните електрически показатели на

схемата. Така се дава възможност още на етап проектиране да се оцени вероятния дял изходна продукция със стойности на показателите в границите на допустимите стойности, и избор на елементи, осигуряващи зададените изисквания в това отношение.

### **III.3. Изводи и заключения**

В настоящата глава са анализирани някои проблеми и специфики при прогнозирането на надеждността на електронните изделия в етапа на проектирането им. Разработен е подход за избор на оптимални параметри на факторите, влияещи на надеждността на електронните елементи и системи. Този подход дава на инженерите-разработчици механизъм за цялостен поглед при постигането на нужната надеждност, помагайки им да изберат най-доброто възможно решение. Разгледаният подход е приложим за различни електронни компоненти и устройства. Той позволява бърз преглед на възможностите за повишаване на надеждността чрез увеличаване на излишъка по натоварване. На базата на данните, предоставени в MIL-HDBK-217F, са направени изследвания за надеждността на няколко вида кондензатори и примерна електронна схема. Представените диаграми и математически изчисления подчертават важната роля на на излишъка по натоварване в повишаването на надеждността на компонентите и устройствата без усложняване на тяхното устройство. Постигнатите по време на работата резултати бяха използвани за прогнозирането на надеждността на електронна апаратура – програмируем температурен контролер [110]], предмет на публикация [8A].

Изследвани са възможностите за използване на данни, получени от компютърни симулации, при прогнозната оценка на надеждността на електронните изделия с цел релевантен избор на допустими отклонения на основните параметри на градивните елементи. Поставен е акцент върху възможностите за използване на приложенията „Smoke” и “Monte Carlo Advanced” от модул PSpice Advanced Analysis на средата за автоматизирано проектиране OrCAD 16.0. Въз основа на направените изследвания, постигнатите резултати и техния анализ, е разработен алгоритъм, базиран на данните от компютърна симулация, които се използват при прогнозирането на надеждността на проектираното електронно устройство и оценяването на очакваното качество на изходната продукция.

## **ГЛАВА IV. Планиране и изпълнение на ускорени изпитвания на надеждност.**

### **Повишаване на точността на резултатите при работа с групирани данни**

#### **IV.1. Разработване на специализиран пакет от изчислителни модули за целите на Вейбуловия анализ на надеждността при наличие на групирани и цензурирани данни**

Най-разпространените програми за математически изчисления, като MATLAB, MATHCAD и др., предлагат възможност за статистически и на-деждностен анализ на точни данни и/или ограничени отдясно данни, но не и на групирани данни. Дори в специализираните програмни продукти няма предвидени възможности за по-широкообхватни изследвания на методите за анализ, използвани при групирани данни, и получаваните чрез тях резултати.

За целта на Вейбуловия анализ на надеждността, е разработен пакет от изчислителни модули в среда на MATLAB, който позволява генерирането на псевдослучайни реализации по закона на Вейбул от типа точни, ограничени отдясно или групирани, подготовка на данните за представянето им в графичен вид, получаване на оценки на параметрите на закона на разпределение по няколко метода и допълнителна статистическа информация. Цялата функционалност на пакета може да се използва при обработката и анализа на данни от реални изпитвания. С помощта на така разработения продукт са анализирани резултатите от някои най-използвани методи за оценка на параметрите на разпределението на Вейбул при комбинация от групирани с цензурирани данни, при различно третиране на началните данни за отказите, с цел сравнителен анализ и предлагане на най-оптимален подход при анализ на групирани данни. Добавен е предложеният подход „Интервален Вейбейс“ за оценка при липса на регистрирани откази или на единични откази. Подходът показва добри резултати при симулационните изпитвания в широк диапазон на вариации на изходните параметри на симулациите.

#### IV.1.1. Използвани методи за оценяване на коефициентите на закона на Вейбул

С помощта на разработения изчислителен пакет са изследвани следните методи:

1) Метод на максималното правдоподобие (ML) за оценка на групирани и ограничени отрядно данни с изчисление по метода Нютон-Рафсън (Н-Р);

2) ML за оценка на групирани и ограничени отрядно данни с изчисление по модифициран метод на секущите [107];

3) ML за оценка на точни и ограничени отрядно данни с изчисление по метода Н-Р;

4) ML за оценка на точни и ограничени отрядно данни с изчисление по модифициран метод на секущите;

5) Метод на линейното преобразуване (MRR) с анализ на данните по отношение на X (XonY), където  $X = \ln(t)$  и  $Y = \ln(-\ln(1 - F(t)))$  са членове на линейното преобразуване на закона на Вейбул спрямо X:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right) \rightarrow \ln(t) = \frac{1}{\beta} \cdot \ln(-\ln(1 - F(t))) + \ln(\alpha) \quad (IV.1)$$

6) MRR с анализ на данните по отношение на Y (YonX):

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right) \rightarrow \ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(\alpha) \quad (IV.2)$$

7) ML за оценка на групирани и ограничени отрядно данни с изместване половин интервал наляво, изчисление по метода Н-Р;

8) ML за оценка на групирани и ограничени отрядно данни с с изместване половин интервал надясно, изчисление по модифициран метод на секущите;

9) метод „Вейбейс“ за точни и цензурирани данни [56] с предварително приета стойност на  $\beta$ , равна на средноаритметичната стойност на оценката на параметъра  $\beta$  по метода ML за групирани данни (случай 1).

10) метод „Вейбейс“ за точни и цензурирани данни с предварително приета стойност на  $\beta$ , равна на избраната за създаване на симулационните данни.

11) предложеният подход “Интервален Вейбейс“, предназначен за групирани и цензурирани данни при предварително приета за известна стойност на  $\beta$ , равна на средноаритметичната стойност на оценката на параметъра  $\beta$  по метода ML за групирани данни. В случаите, когато липсва регистриран отказ, се приема граничния случай на възникване на отказ в последния интервал на изпитванията.

За случаите 3, 4, 5, 6, 9 и 10, групирани данни са преобразувани в точни, с разполагане в средата на интервала, ако са единични, или чрез равномерно разпределение в рамките на интервала, ако са повече.

#### IV.1.2. Избор на показатели за оценяване на методите по получаваните резултати

В резултат от провеждането на симулационните изпитвания по всеки от изследваните методи се получават оценки на коефициентите на закона на разпределение на Вейбул. Съобразно предложените в глава II критерии за допълнително оценяване на приложимостта на методите за анализ на данни от ускорени изпитвания, за анализирането на получаваните данни са избрани следните показатели:

а) дял коректни резултати - резултати със стойности на параметрите, които могат да представляват правилна оценка;

б) дял грешни резултати - резултати без физически смисъл или нереално далече от очакваните резултати;

в) средна стойност и стандартно отклонение на стойностите на параметрите;

г) дял грешни резултати в зависимост от броя регистрирани откази;

д) дял коректни резултати и средна стойност на параметрите в зависимост от броя регистрирани откази;

е) дял коректни резултати в рамките на  $\pm 1\%$ ,  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  от реалната стойност поотделно за параметрите и като двойка.

ж) големина на получаваните интервални оценки на изследваните параметри, при доверителна вероятност 90% [60].



За целта е необходимо да се извърши статистически анализ на събраните масиви от данни, който да даде конкретни стойности на тези показатели за всеки изследван метод. Анализирателното и съпоставянето на тези стойности е основата за достигане до заключения за преимуществата или недостатъците на методите.

#### IV.2. Оценяване на достоверността на получените резултати и анализ на приложимостта на методите при групирани и ограничени откъсно данни

При симулациите се приема, че се работи само с групирани данни и с ограничени откъсно данни за изделията, които са останали работоспособни след приключване на изпитванията. Изследванията са насочени към тези два типа данни, защото са характерни за разглежданите в дисертацията форсирани ускорени изпитвания на надеждност. За ограничаване обема на изходните резултати и с цел по-голяма представителност на изводите, но без да се губи от обобщеността и точността на крайните резултати приемаме, че всички симулирани реализации имат еднакви параметри на закона на разпределението. Параметрите на генерираните псевдослучайни реализации са представени в таблица IV.1.

Таблица IV.1. Изходни параметри на псевдослучайните реализации.

Серия №		1					2					3					4				
Брой изделия в един тест	$m$	5	15	30	50	100	5	15	30	50	100	5	15	30	50	100	5	15	30	50	100
Брой реализации, хиляди	$n$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Параметри на закона на Вейбул	$\alpha$	500					500					1000					1000				
	$\beta$	1.2					3					2					5				
Продължителност на изпитванията	$T$	200										500									
Брой интервали	$i$	5					5					10					10				

Освен в автентичната си форма на групирани данни, събраната при изпитванията информация е преобразувана и използвана в следните вариации:

- всички групирани данни се изместват с половин интервал наляво;
- отказите в интервала са разпределени равномерно в интервала и така получените времена се приемат за точните времена на отказите.

В таблица IV.2 показани част от събраните данни в суров вид, преди по описаните по-горе показатели, а таблица IV.3 представя получени данни по зададените показатели след анализ на входните данни.

Таблица IV.2. Извадка от събраните при симулациите данни от серия 2

ML за групирани данни с Н-Р						ML за групирани данни с Н-Р с изместване						Брой откази
$\alpha$	$\alpha 90\%$ дов. инт.		$\beta$	$\beta 90\%$ дов. инт.		$\alpha$	$\alpha 90\%$ дов. инт.		$\beta$	$\beta 90\%$ дов. инт.		
NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	542,54	408,73	720,17	1,33	0,55	3,23	1
498,03	378,86	654,69	1,15	0,51	2,62	NaN	NaN	NaN	0,03	0,02	0,07	2
527,53	238,61	1166,28	0,75	0,26	2,14	535,62	426,06	673,35	1,49	0,62	3,60	1
527,53	238,61	1166,28	0,75	0,26	2,14	535,62	426,06	673,35	1,49	0,62	3,60	1
955,70	186,64	4893,71	0,67	0,20	2,29	NaN	NaN	NaN	1,90	1,38	2,61	1
575,16	357,50	925,35	0,99	0,39	2,56	626,28	361,85	1083,95	0,86	0,33	2,20	1
314,22	221,42	445,92	1,16	0,47	2,85	485,52	370,71	635,90	1,12	0,46	2,68	4
955,70	186,64	4893,71	0,67	0,20	2,29	NaN	NaN	NaN	1,90	1,38	2,61	1
575,16	357,50	925,35	0,99	0,39	2,56	626,28	361,85	1083,95	0,86	0,33	2,20	1
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
492,82	391,86	619,79	1,13	0,55	2,33	501,77	401,15	627,62	1,13	0,55	2,30	3

Таблица IV.3. Резултати от симулациите с параметри:  $n=2000$ ,  $\alpha=500$ ,  $\beta=1.2$ ,  $T=200$ ,  $i=5$ , метод ML и преобразувани от групирани в точни данни

	Брой изделия в един тест	коректни резултати	резултати извън обхват	грешни резултати	$\alpha$	стандартно отклонение $\sigma_\alpha$	$\beta$	стандартно отклонение $\sigma_\beta$	Разпределение на грешните резултати по брой на отказите в един тест				Разпределение на коректните резултати според броя на регистрираните откази					
	m								0	1	2-3	4-7	0	1	2-3	4-7	8-20	21-40
в абсолютни стойности	5	1317	363	320	404,22	245,52	1,86	1,12	0	279	35	6	0	471	815	31	0	0
	15	1888	18	94	563,40	455,02	1,72	1,42	0	34	47	13	0	60	550	1204	4	0
	30	1978	0	22	546,00	297,85	1,37	0,53	0	1	4	13	0	1	25	631	709	0
	50	1999	0	1	550,79	246,73	1,28	0,36	0	0	0	1	0	0	0	36	1785	58
	100	2000	0	0	531,90	146,91	1,22	0,22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81
в относителни стойности	5	0,80	0,18	0,20	404,22	245,52	1,86	1,12	NaN	0,37	0,04	0,16	NaN	0,63	0,96	0,84	NaN	NaN
	15	0,95	0,01	0,05	563,40	455,02	1,72	1,42	NaN	0,36	0,08	0,01	NaN	0,64	0,92	0,99	1,00	NaN
	30	0,99	0,00	0,01	546,00	297,85	1,37	0,53	NaN	0,50	0,14	0,02	NaN	0,50	0,86	0,98	1,00	NaN
	50	1,00	0,00	0,00	550,79	246,73	1,28	0,36	NaN	NaN	NaN	0,03	NaN	NaN	NaN	0,97	1,00	1,00
	100	1,00	0,00	0,00	531,90	146,91	1,22	0,22	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1,00

Чрез направените изследвания са събрани потвърдителни факти относно заключенията на Абернети [105], Миикър [79] и др. за спецификите и приложимостта на различните методи при оценяването на коефициентите на изследваните закони на разпределение на времето за безотказна работа. След внимателно проучване на резултатите бе достигнато до нови изводи, предоставящи допълнителна възможност да се оптимизират подходите за анализ на данни от изпитвания с периодични проверки:

1. При използването на метода ML за анализ на групирани данни, изместването на времената на интервалите с половин интервал наляво запазва обема резултати с точност до 20%, но нараства дялът на по-високите точности – от 1% до 10%. Едновременно с това обаче се влошават доверителните интервали и в двете посоки с около 10% за характеристичното време.

2. Методът ML за интервални данни дава по-точна оценка за параметъра на формата  $\beta$ , сравнена с тази за  $\alpha$ , както се вижда от резултатите в таблица IV.2.

3. Методът ML във всички разглеждани случаи дава по-точни резултати при използването на метода Н-Р, отколкото при използването на метода на секущите. Трябва да се отбележи, че разликите не са особено големи, така че при необходимост от по-ограничен математически апарат е допустимо прилагането на метода на секущите.

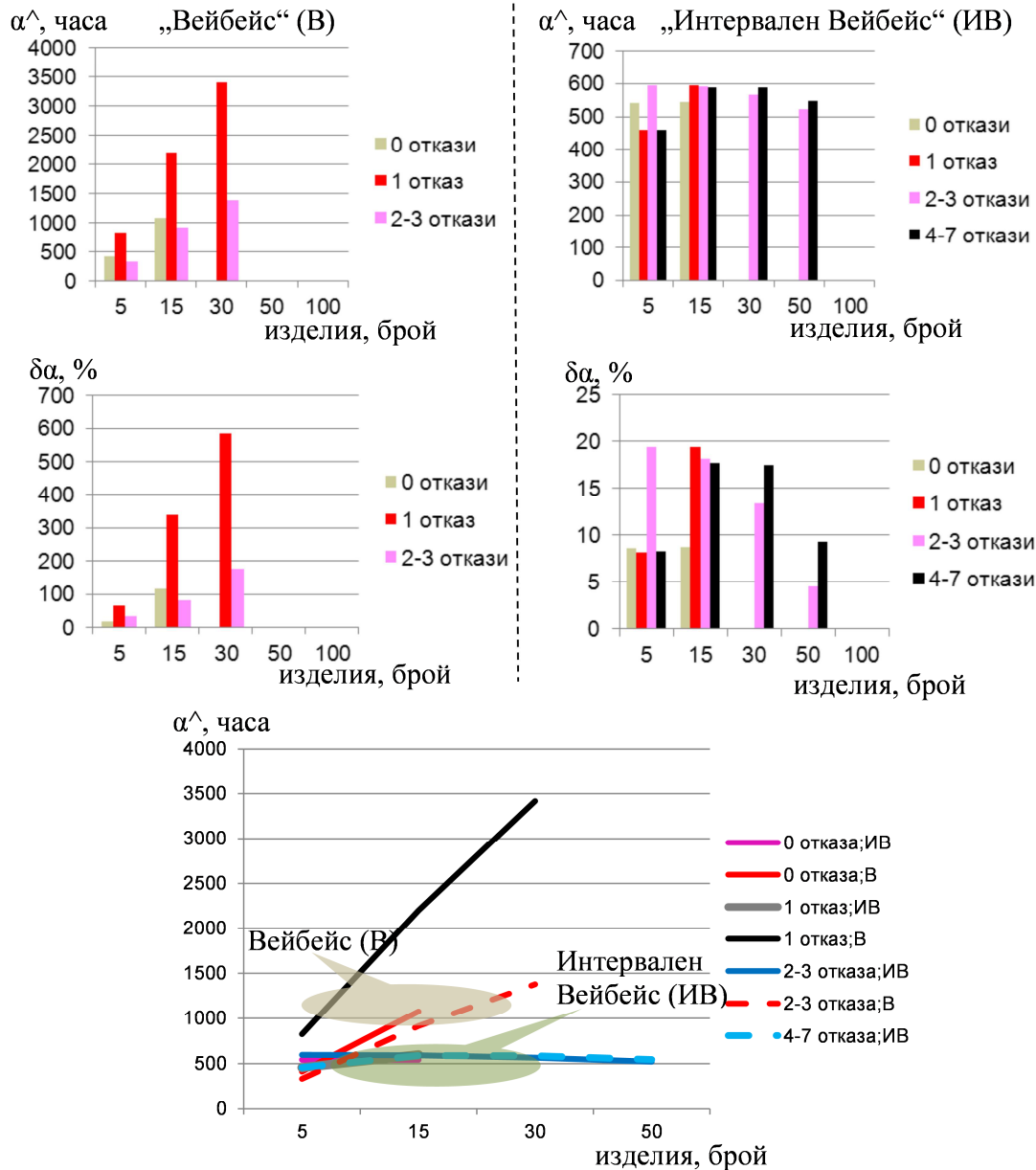
Сравнени са получените резултати при симулационните изследвания на метода Вейбейс и разработения подход „Интервален Вейбейс“.

Резултатите за получените оценки  $\hat{\alpha}$  на характеристичното време  $\alpha$  и относителната грешка  $\delta\alpha$  за серия симулационни данни са представени на фигура IV.1. Изследванията са съсредоточени в симулациите с брой изделия до 50, тъй като за 100 изделия са регистрирани повече от 7 отказа в едно изпитване.

След анализ на получените резултати при прилагането на изследваните начини за оценка на параметрите на разпределението на Вейбул при групирани данни и липса или малък брой регистрирани откази, са формулирани следните изводи:

1. Методът Вейбейс при 0, 1 и 2 отказа показва нестабилност и чувствителност на изходните резултати относно параметрите продължителност на изпитванията, големината на  $\beta$  и брой изделия в един тест. Затова получаваните оценки в много случаи се различават значително от истинската стойност на характеристичното време  $\alpha$ .

2. При прилагането на подхода “Интервален Вейбейс”, в голяма част от случаите се получават оценки, близки до истинските стойности на параметрите, независимо от броя на изделията в един тест, броя откази, продължителността на изпитванията и стойностите на параметрите на разпределението. От 65% до 98% са в рамките на толеранс 20%. Особено голяма е разликата с метода Вейбейс при извадки с малък обем, малка продължителност на изпитване, малък брой интервали и  $\beta \leq 1,5$ . При симулативните резултати с параметри  $\{\alpha=1000, \beta=5\}$  се получават сходни резултати и при двата варианта.



Фиг.IV.1. Сравнение на оценките  $\hat{\alpha}$  и относителните грешки  $\delta\alpha$  за  $\hat{\alpha}$ , получени по двата начина при начални параметри на симуляционните реализации:  $\alpha=500$  часа.  $\beta=1.2$ ;  $T=200$  часа;  $i=5$  интервала

Така посочените изводи са основание да бъде предложен подходът „Интервален Вейбейс“ за приоритетно използване при работа с групирани данни, когато регистрираните откази са малък брой или липсват такива, при условие, че обосновано може да се приеме достоверна стойност за параметъра на формата  $\beta$ .

#### IV.3. Приложение на разработения изчислителен пакет при анализа на данни от изпитвания на надеждност на многослойни керамични кондензатори

Многослойните керамични кондензатори представляват структура от редуващи се слоеве диелектричен материал и метални електроди. За постигане на голям капацитет в малък обем дебелината на диелектричните слоеве се намалява, а броят на слоевете в един кондензатор се увеличава. Този процес води до достигане на дебелина от порядъка на няколко

микрона на диелектричния слой на съвременните многослойни керамични кондензатори, и брой на слоевете от няколко десетки до няколко стотици.

Температурата и работното напрежение са основни фактори, въздействащи на надеждността на многослойните керамични кондензатори [41], [112], [113]. Затова тези два фактора са избрани за ускоряващи фактори в извършените ускорени изпитвания. Под влияние на двата фактора се активират някои процеси на деградация като миграция на кислородни атоми от диелектричния слой, деформация на материалите и др. В резултат се наблюдава понижаване на издръжливостта на натоварвания и нарастване на броя на отказите в елементите. Отказите, които настъпват са: възникване на късо съединение, прекъсване на веригата, понижаване на изолационното съпротивление под определени граници, повишаване на утечния ток над допустимата стойност, изменение на стойността на капацитета извън допустимите граници.

Данните от експериментите са отчитани в точно определени, предварително фиксирани моменти. Това определя и типа на събраните данни - те са групирани, двустранно ограничени. В случай, че при завършване на теста има работещи елементи, се добавят и данни с ограничение отдясно. Типът на данните определя и основния избран метод за моделиране на закона на разпределение - метода на максималното правдоподобие. За изпитванията с 0 или единични откази е приложен методът "Интервален Вейбейс". За извършване на математическите операции е използван разработения изчислителен пакет, а също предлаганите в *MATLAB* оператори за вероятностен и статистически анализ.

#### IV.3.1. Използвани математически модели

Законът на Вейбул за разпределение на случайни величини описва най-комплексно характера на изменението на надеждността на голяма част от електронните изделия под въздействие на температурата и електрическото натоварване. В много публикувани изследвания, разпределението на Вейбул е препоръчано като най-подходящо за използване при оценка на надеждността на многослойните керамични кондензатори [63], [111], [110], [68]. Поради това първоначално е прието, че моментите на възникване на отказите по време на изпитванията, имат разпределение на Вейбул. С помощта на графичните методи може да се потвърди или отхвърли така направеното допускане.

На базата на анализа на спецификите на избраните ускоряващи фактори и въз основа на направените проучвания е прието изчисленията да се извършат върху два основни модела, описващи въздействието на напрежението и температурата върху качествата на кондензаторите - закона на Арениус и т. нар. "Инверсен степенен закон" [112], [55].

Отношението на средните времена на отработка до отказ  $\tau_{op}$  при номинална температура и  $\tau_{ACC}$  при повишена температура представлява коефициентът на ускорение на процесите, водещи до отказ. При едновременно прилагане на ускоряващите фактори температура и напрежение, за определяне на коефициента на ускорение  $AF(\theta^{\circ}C, V)$  се използва формулата на Прокопович-Васкас (*P-V equation*) [112]:

$$AF(\theta^{\circ}C, V) = \frac{\tau_{op}}{\tau_{ACC}} = \left( \frac{V_{ACC}}{V_{op}} \right)^J \cdot \exp \left[ \frac{E_a}{K_B} \left( \frac{1}{\Theta_{op}} - \frac{1}{\Theta_{ACC}} \right) \right]. \quad (IV.3)$$

където  $V_{op}$  и  $V_{ACC}$  са съответно нормална работна стойност и повишена ускоряваща стойност на напрежението;  $J$  е параметър, зависещ от свойствата на изделието и на прилагания тест;  $\Theta_{op}$  и  $\Theta_{ACC}$  са съответно номиналната работна температура и повишената температура, изразени в градуси по Келвин;  $K_B$ ,  $eV/K$  е константа на Болцман;  $E_a$ ,  $eV$  - активационна енергия на температурно-зависимите процеси в изделието.

В своя труд [112] авторите предлагат опростена форма на горното уравнение:

$$\tau = \frac{A}{V^J} \cdot \exp \left( \frac{E_a}{K_B \cdot \Theta} \right), \quad (IV.6)$$

където  $A$  е константа, измервана в единици за време (часове, минути и др.).

След логаритмуването му се получава т. нар. логаритмично-линеен модел на изпитванията:

$$\ln(\tau) = \ln(A) - J \cdot \ln(V) + \frac{E_a}{K_B} \cdot \frac{1}{\Theta}, \quad (IV.8)$$

С помощта на израз (IV.8) може да се направи многофакторен регресионен анализ, чрез който да се получат стойностите на коефициентите  $A$ ,  $J$  и  $E_a$ . В случая, факторните (независимите) променливи са  $\ln(V)$  и  $1/k_B \cdot \Theta$ , а зависимата (резултантната) променлива е  $\ln(\tau)$ .

Събраните данни за моментите на възникване на отказите, при различни напрежения и температури, са използвани при оценката на средното време на работа до отказ за всеки тест. За целта са използвани методите за статистическа обработка на информацията - графични и аналитични.

#### IV.3.2. Параметри на изпитванията и експериментални резултати.

Обект на изследването са многослойни керамични кондензатори тип X5R, предназначени за повърхностен монтаж, с корпус 0805 [71]. Параметрите на елементите са показани в таблица IV.5.

Използваната апаратура включва LCR-метър *Agilent U1733P*, мултифункционален измервателен уред *Mastech MS8268*, термобарокамера, разработена по идея на научния колектив специално за провеждане на изпитвания на надеждност, стабилизирани захранващи устройства *TEC1300K* и “*PSM3/2A*”. За ограничаване на метрологичните грешки избраните кондензатори имат капацитет, съобразен с диапазона на най-малка грешка на LCR-метъра.

Таблица IV.5. Параметри на изпитваните елементи

Елемент	Производител/ парт. номер	Температурен диапазон	Толеранс	Коефициент на загубите	Изоляционно съпротивление
0805, 4,7 $\mu$ F; 16V, X5R	MULTICOMP MCCA000548	-55°C/+85°C	$\pm 10\%$	не повече от 12,5%	11000 M $\Omega$

Оценяването на показателите на надеждност на кондензаторите в утежнени условия на работа е базирано на резултатите от проведени ускорени изпитвания.

Състоянието на елементите е проверявано в точно определени, предварително фиксирани моменти. Това определя и типа на събраните данни - те са групирани, двустранно ограничени. В случай, че при завършване на теста има работещи елементи, се добавят и данни с ограничение отдясно. Типът на данните определя и основния избран метод за моделиране на закона на разпределение - метода на максималното правдоподобие. За изпитванията с нула или единични откази е приложен методът “Интервален Вейбейс”. За извършване на математическите операции е използван разработения изчислителен пакет, а също предлаганите в *MATLAB* оператори за вероятностен и статистически анализ.

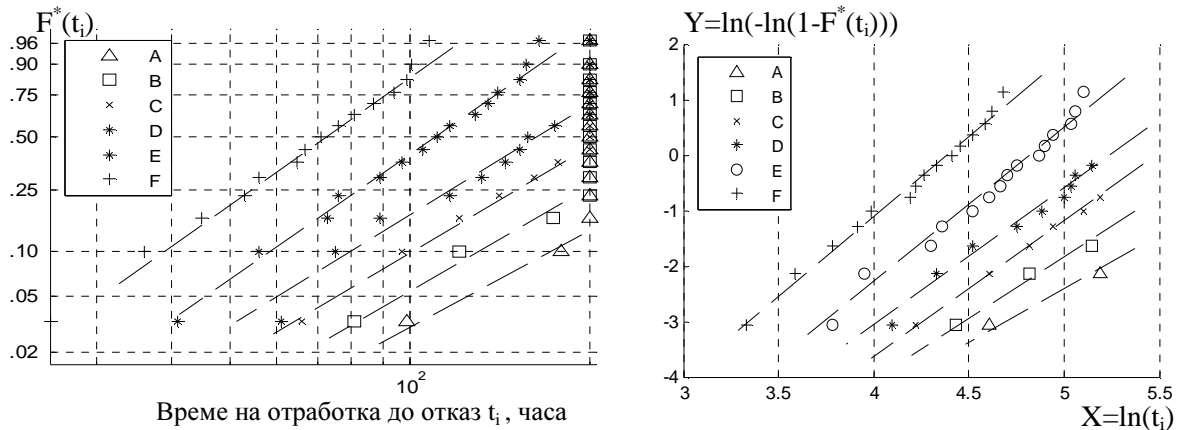
Изборът на броя изследвани изделия във всеки тест е направен с цел ограничаване на общия брой изпитвани изделия. Гиндев [4] е указал като долна граница на броя изпитвани изделия, при известен предварително закон на разпределение, те да бъдат повече от 10. В разглеждания случай, основавайки се на публикации по темата [55], [112]], [114]], може да се приеме за известен вида на разпределение на времената на безотказна работа на изследваните елементи. С цел повишаване на достоверността на получаваните резултати, без да се увеличава твърде много общия брой изследвани елементи, е решено във всеки тест да бъдат изпитвани 15 елемента. Всеки тест се извършва в продължение на 200 часа. Параметрите на тестовете са описани в таблица IV.6.

Таблица IV.6. Параметри на тестовете

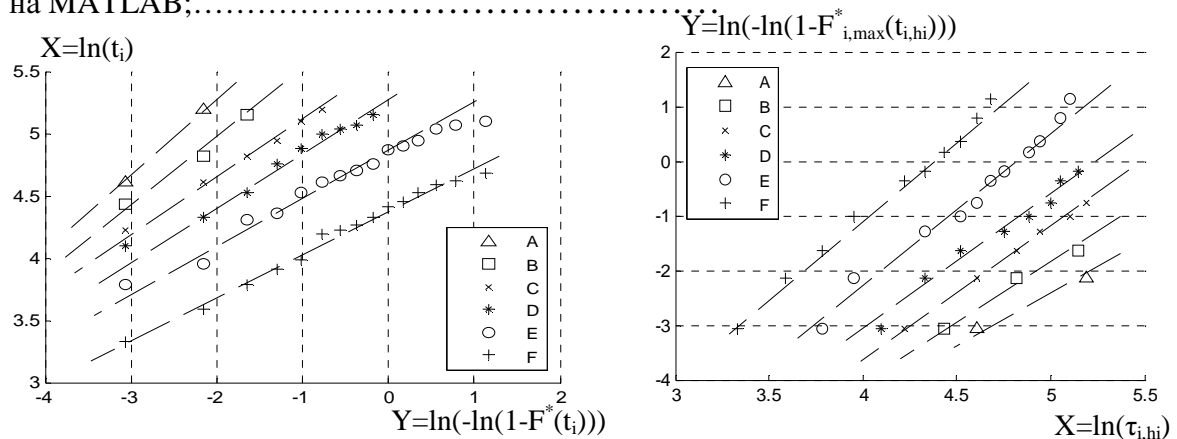
Тест	Брой елементи в извадка	Температура, °C	Напрежение, V	Продължителност на теста, часове
A	15	95	30	200
B	15	95	38	200
C	15	120	30	200
D	15	95	50	200
E	15	120	38	200
F	15	120	50	200

За извършване на графичната оценка за съответствие на експерименталните данни с Вейбуловото разпределение е използват функциите на изчислителния пакет, в който данните могат да се използват в оригиналния си вид на групирани данни или след преобразуване в точни данни с равномерно разпределение на моменти на отказите в интервалите. След такова преобразуване е възможно използването на функцията *wblplot* на *MATLAB*.

На фигура IV.4 са показани графиките на експериментално получените данни. При първите три графики данните за времената на отказите са приети за известни, получени по описания по-горе начин. Фигура IV.4.а е резултат от прилагане на функцията `wblplot` на MATLAB, а останалите три представляват различно интерпретиране на данните с помощта на разработения изчислителен пакет. Ясно се вижда, че заложената в MATLAB функция представлява варианта на представяне „Y спрямо X“ (YonX) от фигура IV.4.б. На фигура IV.4.в променливите по осите са разменени - X спрямо Y (XonY). Фигура IV.4.г представя данните в техния оригинален вид, когато са известни само броя на откази в интервал и моментите на отчитане. В този случай за всеки интервал се отчита само отказа с най-висока стойност на  $F^*(t_{i,hi})$  и времето на горния край на интервала  $\tau_{i,hi}$ .



а) посредством функцията `wblplot` на MATLAB; ..... б) MRR относно Y (Yon X);



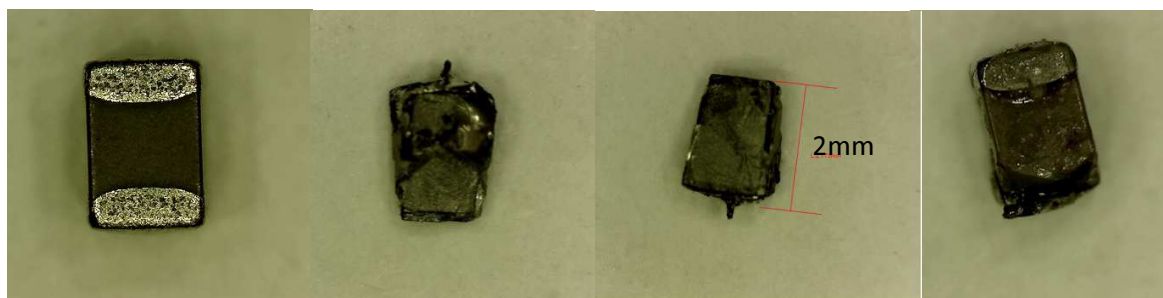
в) MRR относно X (XonY); г) интервално представяне.

Фиг.IV.4. Графично представяне на разпределението на отказите с използване на различни подходи и инструменти.

Всички показани графики показват добра апроксимация на разположението на точките от отделните тестове с права линия, което потвърждава възприетата хипотеза за Вейбулово разпределение на отработката до отказ при многослойните керамични кондензатори. Освен линейността, добре изразената успоредност на апроксимиращите прави подкрепя допускането за слаба корелация между прилаганите фактори на ускоряване.

На фигура IV.5 са показани снимки на образци от изпитваните елементи. Най-отляво е нов компонент, другите изгледи са от напълно разрушен или частично разрушени вследствие прегряване кондензатори.

Получаването на оценка на параметрите на разпределението на Вейбул за всеки от тестовите е изпълнено с помощта на методите, включени в разработения изчислителен пакет, и предлаганите от MATLAB функции. Получени са числови оценки на параметрите  $\alpha$  и  $\beta$  на разпределението на Вейбул, средното време за безотказна работа  $T_0$  при експерименталните условия, дисперсията  $D$  и средноквадратичното отклонение  $\sigma$  на  $T_0$  за отделните тестове. В таблица IV.8 са показани резултатите от различните методи.



Фиг.IV.5. Снимки на образци от изпитваните елементи

Таблица IV.8. Оценки на параметрите на закона на разпределение:

Тест	$\alpha$ , часа	$b$ , -	$T_0$ , часа	$D$ , часа <sup>2</sup>	$\sigma$ , часа
A	422,41	2,60	375,19	24027,22	155,01
B	400,26	2,14	354,48	30401,90	174,36
C	262,35	2,40	232,57	10654,87	103,22
D	202,86	2,40	179,83	6370,58	79,82
E	121,71	3,43	109,39	1242,78	35,25
F	79,20	3,17	70,90	601,55	24,53

а) чрез *wblfit* и *wblstat* на MATLAB;

Тест	$\alpha$ , часа	$b$ , -	$T_0$ , часа	$D$ , часа <sup>2</sup>	$\sigma$ , часа
A	706,89	1,57	634,99	171192,71	413,75
B	375,77	2,02	332,95	29632,32	172,14
C	254,32	2,31	225,31	10746,96	103,67
D	190,34	2,53	168,94	5111,45	71,49
E	123,01	2,82	109,56	1775,00	42,13
F	79,99	2,66	71,10	829,71	28,80

в) MRR относно X (ХонY);

Тест	$\alpha$ , часа	$b$ , -	$T_0$ , часа	$D$ , часа <sup>2</sup>	$\sigma$ , часа
A	424,39	2,58	376,86	24582,40	156,79
B	400,16	2,14	354,39	30367,63	174,26
C	262,26	2,40	232,48	10659,33	103,24
D	202,95	2,39	179,91	6405,58	80,03
E	103,81	2,35	91,99	1733,96	41,64
F	91,24	2,39	80,83	1399,8	37,80

д) ML оценка на интервални данни;

Тест	$\alpha$ , часа	$b$ , -	$T_0$ , часа	$D$ , часа <sup>2</sup>	$\sigma$ , часа
A	422,53	2,60	375,27	24110,65	155,28
B	400,27	2,14	354,48	30406,45	174,37
C	262,36	2,40	232,57	10691,45	103,40
D	202,86	2,40	179,83	6387,65	79,92
E	121,71	3,43	109,39	1243,74	35,27
F	79,19	3,17	70,90	600,07	24,50

б) ML оценка на точни и ограничени данни

Тест	$\alpha$ , часа	$b$ , -	$T_0$ , часа	$D$ , часа <sup>2</sup>	$\sigma$ , часа
A	425,02	2,50	377,11	26039,14	161,37
B	409,98	2,50	363,76	24228,37	155,65
C	262,11	2,50	232,57	9903,48	99,52
D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

г) Интервален Вейбейс;

Тест	$\alpha$ , часа	$b$ , -	$T_0$ , часа	$D$ , часа <sup>2</sup>	$\sigma$ , часа
A	425,09	2,51	377,19	25917,08	160,99
B	400,32	2,08	354,59	32038,53	178,99
C	259,27	2,33	229,72	10998,04	104,87
D	199,40	2,34	176,69	6444,86	80,28
E	104,52	2,37	92,63	1732,54	41,62
F	95,81	2,33	84,89	1497,00	38,69

е) ML оценка на интервални данни с изместване наляво.

Вижда се голямата неточност в резултатите от графичния метод ХонY при малък брой регистрирани откази. Еднаквите резултати в таблици IV.8.a и IV.8.б показват, че функцията *wblfit* прилага метода ML за точни и ограничени данни, което предполага предварителната апроксимация на групирани данни и внасянето на допълнителна неточност в получаваните оценки. Това се забелязва най-отчетливо в значително по-широките доверителни интервали в сравнение с получаваните по метода ML за групирани данни, както се вижда от таблица IV.9.

Използването на предложения подход „Интервален Вейбейс“ предоставя възможност за първоначално оценяване на характеристикното време за изпитванията с малко откази, използвани впоследствие като начални за метода ML за групирани данни.

Таблица IV.9. 90% доверителни интервали за оценките на  $\alpha$  и  $\beta$ .

90% доверителен интервал		A	B	C	D	E	F
<i>wblfit</i>	$\alpha$	159,02	179,83	185,03	159,95	106,88	68,82
		1122,08	890,90	371,97	257,29	138,59	91,15
	$\beta$	0,83	0,85	1,28	1,47	2,42	2,24
		8,11	5,36	4,49	3,91	4,87	4,50
ML групирани	$\alpha$	408,54	382,41	251,21	193,50	99,42	84,63
		440,86	418,73	273,79	212,69	108,44	98,30
	$\beta$	1,53	1,29	1,45	1,49	1,71	1,63
		4,35	3,56	3,97	3,85	3,24	3,49
ML групирани с изместване	$\alpha$	408,71	381,98	247,97	189,93	99,19	90,29
		442,12	419,54	271,08	209,21	110,15	101,68
	$\beta$	1,49	1,25	1,40	1,46	1,70	1,60
		4,23	3,46	3,85	3,75	3,31	3,41

Резултатите от изпитванията показват устойчивостта на металокерамичните кондензатори на свръхнатоварвания по напрежение два пъти по-високо от номиналното, дори и при температура по-висока от допустимата. Тези данни, съчетани с постигнатите големи стойности на капацитет в корпуси за повърхностен монтаж, могат да бъдат основа за използването им вместо електролитни кондензатори в изделия, работещи в условия на повишена температура. Трябва да се отбележи обаче значително по-високата цена на многослойните керамични кондензатори - например SMD кондензатор капацитет 100 $\mu$ F има цена на едро около 0,50евро срещу 0,10евро за SMD електролитен кондензатор с алуминиев оксид.

Така получените оценки за стойностите на средното време за безотказна работа се използват за получаването на стойностите на неизвестните коефициенти във формула (IV.8) посредством многофакторен регресионен анализ.

#### IV.4. Подход за анализ на информативността и оптимизация на ускорените изпитвания на електронни изделия

В литературата има описани много подходи за предварителна оценка на параметрите на изпитванията[3],[46],[55]. В настоящата дисертация е предложен подход, целящ оптимизирането на броя изпитвания чрез прилагането на алгоритъм, подобен на използваните в областта на разпознаването на образи за анализ на информативността на входящата информация. Чрез оценка на тестовете в самия процес е възможно да се намали броя на различните изпитвания (намалява се необходимата материална база), със запазване на достоверността на изходните резултати, или без намаляване на броя на изпитванията да се намерят най-подходящите с цел повишаване на резултатността. Посредством динамичното оптимизиране на тестовете (изпитванията) се дава възможност да се получат достатъчно достоверни резултати, чрез търсене на оптималната комбинация по състав на изпитванията. Така е възможно да се постигне икономия във вид на време и ресурси, като се избягва необходимостта от повтаряне на пълния пакет изпитвания, при установяване на слаба информативност на вече извършените фиксирани тестове. Алгоритъмът е изследван посредством анализ на резултатите от практически извършени тестове.

Същността на подхода е в обработката и анализа на постъпващата информация при изпълнението на тестовете, и вземане на решение за прекратяване на някои тестове и стартиране на нови с различна степен на натоварване. За целта е необходимо да се въведат подходящи критерии за вземане на решение.

Предлаганият подход е приложим за почти всички формати на изпитвания, с изключение на тези, при които се извършва отчитане само в края на теста, и при наличие на ограничени отляво данни (*left censored data*).

Основа на подхода е алгоритъм за оценка на качеството на клъстеризация, използван при класификацията на образи.



Със стартирането на изпитванията започва натрупването на информация за протичането на тестовете. Информацията, която се събира за всеки регистриран отказ, е номера на теста, поредния номер на отказа от началото на теста и момента на възникване на отказа, отчетен от началото на теста. Ако изпитванията са с непрекъснат контрол и отчитане, тези параметри се получават директно. Ако обаче се провежда периодичен контрол, първоначалната информация се състои от номера на теста, номер на периода, продължителност на периода, брой откази в изтеклия период. Тази информация подлежи на преработка, като при интервали, сравнително къси спрямо общата продължителност на теста, може да се допуска приемането, че отказите са равномерно разпределени в интервала.

Анализът на текущите данни се извършва през определен период от време. За изпитвания с периодичен контрол моментите на събиране на информация съвпадат с края на поредния интервал на изпитване. Възможно е да се извършва на всеки интервал или с определена кратност. За изпитвания с непрекъснат контрол, предварително се определят моментите за извършване на анализ, съобразени със някои конкретни характеристики на изпитванията. При напълно автоматизирана система е възможно извършването на анализ при всеки новоотчетен отказ. Това обаче не е препоръчително, поради твърде кратката по актуалност и съответно с малка “тежест” получена от анализа информация. Ако все пак се прилага такъв подход, трябва да се определи стъпка на сравняване на актуалните с предходните резултати.

Нека се разгледат процесите при анализ след поредния  $k$ -ти период от изпитванията (за непрекъснатите изпитвания - в  $k$ -тия момент за анализ).

След въвеждане на информацията за възникналите през  $k$ -тия период откази (за непрекъснатите изпитвания - между моментите за анализ  $k-1$  и  $k$ ), всички откази от съответния тест са подредени по реда на тяхното възникване, представени с времето на възникването им. Извършва се статистически анализ, приемайки, че този момент представлява края на изпитванията:

1. Проверка доколко теоретичните закони за разпределение на времената до отказ отразяват реалните данни чрез прилагане на графичния метод, в случая чрез нанасяне на данните върху логаритмична или вейбулова координатна система. Ако системата е напълно автоматизирана, проверката се изпълнява след извеждане на уравнението на апроксимиращата права. Тогава се взема решение кой закон за разпределение е по-подходящ. В голямата част от случаите провеждащият изпитванията предварително е взел решение по отношение на валидния закон за разпределение, и се пристъпва към сравнение единствено, ако този закон показва явни признаци на несъответствие с реалните данни.

2. За всеки от тестовете по методите на максималното правдоподобие се определят статистически оценки на параметрите на приетия в точка 1 закон за разпределение.

3. Въз основа на наличните експериментални резултати се пристъпва към оценка на коефициентите на уравнението на предварително приетия модел за връзка между ускоряващите фактори и съответния показател на надеждността. За модела на Арениус и експоненциален закон за разпределение уравнението представлява следното [3]:

$$\ln(\tau_{0i}(\Theta)) = \xi_1 + \xi_2 \cdot \frac{1}{\Theta_i}, \quad (\text{IV.9})$$

където  $\tau_{0i}$ [часа] е средното време за работа до отказ, изчислено за  $i$ -тия тест;  $\Theta_i$ [°K] е изпитвателната температура на  $i$ -тия тест в абсолютни градуси;  $\xi_1$  и  $\xi_2$  са коефициентите на модела. Техните стойности зависят от изпитваните изделия и метода на изпитванията.

За закона на разпределение на Вейбул параметърът  $\beta$  се приема за постоянен и моделът изглежда по същия начин, но обикновено се отнася за характеристичното време  $\alpha_i$  за  $i$ -тия тест.

При повече от един фактор на ускорение, моделът запазва своя линеен характер, но коефициентите стават три:

$$\ln(\alpha_i(\Theta)) = \zeta_1 + \zeta_2 \cdot \frac{1}{\Theta_i} + \zeta_3 \cdot x, \quad (\text{IV.10})$$

където  $x$  представя втория параметър на ускорение.

За оценяване на коефициентите и техните доверителни интервали се прилага многофакторен регресионен анализ. Данните за всички неотказали изделия се приемат като ограничени отъясно към момента на анализа.

4. Определят се показателите на надеждност, чиито оценки ще бъдат използвани за оптимизационния процес. Нека в случая са анализирани изпитванията по един параметър. Естествения избор при експоненциалния закон за разпределение е средното време за работа до отказ  $T_0$ , представено със своя натурален логаритъм  $\ln(T_0)$ . При разпределението на Вейбул освен средното време за работа до отказ е удобно да се работи с характеристичното време  $\alpha$ , представляващ 63-тия перцентил на величината “време на отработка до отказ”, отново под формата на логаритъм  $\ln(\alpha)$ . При известни стойности на единия от параметрите, другият може да се получи от уравнението за средното време за работа до отказ за закона на Вейбул.

За общност на изложението, по-долу се използват записа  $\ln(\tau)$ .

5. Всеки от провежданите тестове има съответната оценка на изборения параметър  $\ln(\tau_{i,tot}^{(k)})$ ,  $i=1 \div Z$ . Посредством линеен регресионен анализ, приложен върху пълния набор от текущите данни, са получени оценка на стойностите на коефициентите на модела на изпитванията  $(\xi_{1,tot}^{(k)}, \xi_{2,tot}^{(k)})$ .

Ако статистическите показатели като квадрата на корелационния коефициент  $R^2$  са в допустимите граници, по показателя за грешките може да се съди за постигането на оптималност на извършваните изпитвания и да бъде взето решение за прекратяване на изпитванията преди планираното време. Необходимо условие за такава стъпка е натрупването на достатъчен брой откази, който е зададен предварително.

Чрез последователно изваждане на всеки един от тестовите от общата съвкупност, се формират  $Z$  броя подгрупи от  $(Z-1)$  изпитвания. След извършване на регресионен анализ върху всяка от тези подгрупи се стига до получаване на допълнителни  $(Z)$  резултата за двойката коефициенти  $(\xi_{1,j}^{(k)}, \xi_{2,j}^{(k)})$ , където  $j$  указва номера на извадения тест,  $j=1 \div Z$ . За всяка подгрупа се изчисляват теоретичните стойности на логаритъма  $\ln(\tau_{ij}^{(k)})$ , включително и за извадения тест.

Сравнявайки резултатите в подгрупите с тези, получени с използване на пълния набор от данни, може да се оцени доколко всеки от тестовите допринася за повишаването на точността на извършвания анализ. Особено внимание е обърнато на сравнението при изключените тестове, защото те не участват в изчислението на параметрите на модела и представляват “непознат образ” за него. Така се получава една допълнителна, “независима” оценка на адекватността на модела и неговите параметри.

Оценяването на степента на правдоподобност на получените резултати се извършва с помощта на функция на грешката от вида:

$$E_j^{(k)} = \sum_{i=1}^Z \left[ \ln(\tau_{i,tot}^{(k)}) - \ln(\tau_{ij}^{(k)}) \right]^2, \quad (IV.11)$$

където  $\tau_{i,tot}^{(k)}$  е експериментално полученото средно време до отказ за  $i$ -тия тест;  $\tau_{ij}^{(k)}$  - полученото чрез един от изразите (IV.9) или (IV.25) теоретична стойност на параметъра  $\tau$  за  $i$ -тия тест със стойности на коефициентите на модела  $(\xi_{1,j}^{(k)}, \xi_{2,j}^{(k)})$ ;  $E_j^{(k)}$  - стойността на функцията на грешката за  $j$ -тата подгрупа, изчислена при стойности на коефициентите на модела  $(\xi_{1,j}^{(k)}, \xi_{2,j}^{(k)})$ .

Аналогично се изчислява стойността на функцията на грешката  $E_{tot}^{(k)}$  при параметрите  $(\xi_{1,tot}^{(k)}, \xi_{2,tot}^{(k)})$ .

Относителната разлика между всяка от стойностите  $E_j$  на функцията на грешката с  $E_{tot}$  се изчислява чрез израза:

$$\delta_j = \frac{|E_{tot} - E_j|}{E_j}. \quad (IV.12)$$

Получените стойности за  $\delta_j$  могат да се използват като показател за информативността на всеки отделен тест. Колкото  $\delta_j$  е по-малка, толкова е по-малък приносът на информацията от съответния  $j$ -ти тест за постигането на точни оценки на коефициентите, изчислени чрез регресионния анализ. При достатъчно малка разлика може да се заключи, че за ограничаване

боя на извършваните тестове, този тест може да не се провежда. Това решение трябва да се вземе след анализ и на други показатели, показващи адекватността на анализирания модел на изпитванията. Подходящи показатели са коефициентът на определеност  $R^2$ , показващ качеството на апроксимиращия линеен модел, както и диапазоните на доверителните интервали на изчислените стойности на параметрите. Запазването на техните стойности в рамките на предварително зададени допустими граници е условието за изключването на даден тест от изпитванията, а излизането извън тях налага вземане на решение за запазване на теста или заменянето му с друг тест.

Така описаната процедура може да се извърши неколkokратно, докато се постигне комбинацията от най-информативните тестове. От икономическа гледна точка целесъобразно е планирането на една или две такива корекции.

В резултат от гореописаните действия се получава група от изключени тестове, чиято информативност е оценена като достатъчно малка, за да оказва влияние върху резултатите от извършваните експерименти. При подробен анализ на параметрите на тези тестове могат да се направят изводи за по-оптималното планиране на бъдещи изпитвания.

#### **IV.5. Оценяване на информативността на проведените надеждности изпитвания с помощта на предложения подход**

Описаният в точка IV.4 подход за определянето на информативността на отделните тестове е приложен спрямо получените по-горе оценки на средното време за безотказна работа  $T_0$  за отделните тестове. Получени са седем оценки на коефициентите  $A$ ,  $J$  и  $E_a$  - по една за всяка различна комбинация от пет теста и една при използването на шестте теста.

Пресметнати са теоретичните стойности на средните времена за работа до отказ за отделните тестове по формула (IV.8) с използване на получените стойности на коефициентите  $A$ ,  $J$  и  $E_a$ . Изчислена е стойността на функцията на грешката  $E_j$  и  $E_{tot}$  по формула (IV.11), за  $j=1\div 6$ . Използваната номерация показва кой от тестовите е изключен, като на цифрите 1, 2, 3, 4, 5 и 6 отговарят съответно тестовите  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  и  $F$  - например  $(A, J$  и  $E_a)_3$  и  $E_3$  са изчислените стойности при изключен тест  $C$ .

Изчислена е относителната разлика  $\delta_j$  между функциите на грешката  $E_j$  и  $E_{tot}$  за всеки от тестовите по формула (IV.12). Таблица IV.11 представя получените резултати от изчисленията.

Таблица IV.11. Резултати от регресионния анализ по всички изследвани комбинации

Комбинация	$A$	$J$	$E_a$	$r^2$	$E_j, E_{tot}$	$\delta_j$
1	$1,145 \cdot 10^{-4}$	1,169	0,579	0,962	4,983	0,980
2	$4,369 \cdot 10^{-4}$	1,242	0,497	0,950	0,107	0,075
3	$4,101 \cdot 10^{-4}$	0,958	0,516	0,953	3,88	0,975
4	$5,482 \cdot 10^{-5}$	0,852	0,592	0,989	0,199	0,502
5	$10,29 \cdot 10^{-3}$	1,264	0,474	0,974	0,128	0,227
6	$1,949 \cdot 10^{-3}$	1,292	0,530	0,925	0,100	0,01
Всички ( $TOT$ )	$2,084 \cdot 10^{-3}$	1,249	0,523	0,954	0,099	0,000

По стойностите на относителната грешка  $\delta_j$  може да се направи заключението, че тест  $F$  е най-неинформативен и изключването на резултатите от него най-слабо влияе при изчисляването на оценката на коефициентите на формула (IV.8). В таблица IV.12 са показани оценките за средните времена на отработка до отказ при няколко работни режима в границите на нормалните експлоатационни условия при двата случая -  $T_{0tot}$  за всички тестове и  $T_{0F}$  при изключен тест  $F$ , и относителната разлика между тях  $\delta_{T0}$ . От получените резултати се вижда, че относителната грешка от изключването на тест  $F$  е в рамките на 10%. При преценка за допустимост на такава грешка в прогнозните резултати може да се приеме за допустимо изключването на този тест от плана за изпълнение.

Друг аргумент в полза на оптимизирането по информативност, и за лимитирането на максималните стойности на натоварванията е фактът, че отказите, формиращи десния край на разпределението, могат да увеличат грешката на експериментално получаваното разпределение в левия край, където се описват най-важните от инженерна гледна точка събития - първите възможни откази [79].

Таблица IV.12. Прогнозни стойности за  $T_0$  при различни работни режими

Работни условия	$T_{отоб}$ часа	$T_{оф}$ часа	$\delta_{Тоб}$ %
85°C /16V	1490	1560	4,7
55°C /16V	10048	10871	8,2
55°C /12V	33370	36696	9,97

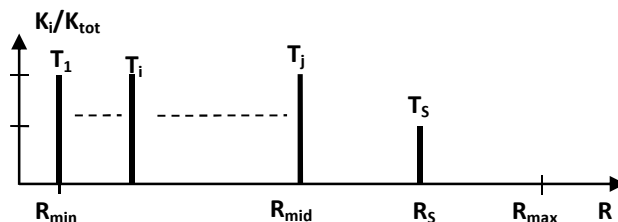
Тест  $F$  е проведен при най-тежки условия и всички изделия са отказали в рамките на първата половина от продължителността на теста. Внимателният поглед върху него показва излизане от линейността на разполагане на отказите на последните изделия, което означава, че е се извяват непредвидени при изпитванията фактори. Това може да се приеме за основание да се формулира заключение, че има някаква граница в прилаганите натоварвания, след която резултатите от проведените изпитвания не носят значима информация, и е целесъобразно изпитванията да се провеждат при натоварвания по-ниски от тази граница.

На база на направените експерименти и анализа на получените резултати, е построена и се предлага следната конкретна процедура при планиране и провеждане на ускорени изпитвания по надеждност:

1. Нека са предвидени за изпълнение  $Z$  теста, с диапазон на изменение на натоварването от  $R_{min}$  до  $R_{max}$  и обем на всяка извадка  $K_{tot}$ . Предварително се планира натоварването за всеки тест. В началото се стартират изпитванията  $T_1 \div T_j$ , чиито стойности на натоварванията са равни или по-малки от средното ниво на натоварване  $R_{mid}$ , и тестът  $T_s$ , чието натоварване  $R_s$  е равно или най-близко до нивото  $(R_{min} + R_{max})/2$ . Изпитванията  $T_1 \div T_j$  са в пълен обем, докато тестът  $T_s$  започва с половината от обема  $K_{tot}$ . Графично представяне на обема и натоварванията при стартираните в началото на експеримента изпитвания е показано на фиг. IV.6.

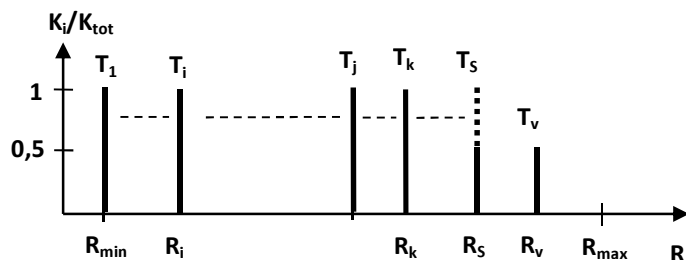
2. Текущо се проверява броят на отказалите изделия в тест  $T_s$ . Предварително трябва да има решение какво ще се предприема при установяване на голям брой откази в кратък период след началото на тестовете. Краят на първата четвърт от времето на изпитване е момент, в който може да се вземе решение за промяна на плана на изпитванията. Отчита се състоянието на елементите от теста с най-тежък режим на изпитване  $T_s$  и се пристъпва към едно от следните действия:

А. Ако всички елементи са отказали, тестът се прекратява и се започва друг, при по-леки условия, отново първоначално с половин обем на изпитваните елементи. В този случай максималното ниво на натоварване се намалява до  $R_s$ .



Фиг. IV.6. Обем и степен на натоварване при стартираните в началния момент тестове.

Б. Ако има неотказали елементи, към извадката елементи за тест  $T_s$  се добавя другата половина елементи и изпитванията по теста продължават, като се взема предвид момента на включване на новите елементи. Всички планирани тестове  $T_{j+1} \div T_{s-1}$  с натоварване по-малко от това на  $T_s$  стартират с пълен обем. Едновременно с това започват изпитванията по тест  $T_v$ , чието натоварване е по-голямо от това на  $T_s$ . Фиг. IV.5 илюстрира случай Б.



Фиг. IV.7. Обем и степен на натоварване на активните тестове при реализиран случай Б.

Горните стъпки се повтарят до стартиране на всички планирани тестове, ако не се реализира случай *A*, или до стартиране на всички планирани тестове с натоварване по-малко от достигнатото по случай *A*.

При силно снижаване на горното ниво на натоварването и ограничаване броя предварително планирани тестове е възможно добавяне на нови тестове с междинни натоварвания, до достигане на планирания брой изпитвания.

При реализирането на предложената последователност при провеждането на експериментите се получава незначително удължаване на общата продължителност на изпитванията, но се увеличава обема на “полезната” информация чрез увеличаване на броя най-информативни тестове. Допълнително предимство на предложената идея е, че данните, получени от прекратените тестове също се включват и допълват окончателните резултати.

#### IV.6. Изводи и заключения

В настоящата глава са разгледани някои проблеми при прилагането на ускорени изпитвания за анализ на надеждността на електронни изделия и обработката на събраните данни, когато няма информация за точните времена на възникване на отказ и данните са групирани. С помощта на разработения от автора изчислителен пакет в среда на MATLAB са проведени симулационни изследвания за анализиране на получаваните резултати при прилагане на различни методи за оценка на параметрите на Вейбуловия закон за разпределение на случайната величина „време за безотказна работа“. При изследването на методите са използвани предложените допълнителни критерии за оценяване по отношение на използването им при групирани данни. Разгледани са проблемите при наличие на изпитвания с нулеви или единични откази.

Чрез направените изследвания са събрани потвърдителни факти относно заключенията на Абернети [105], Миикър [79] и др. за спецификите и приложимостта на различните методи при оценяването на коефициентите на изследваните закони на разпределение на времето за безотказна работа. След внимателно проучване на резултатите бе достигнато до нови изводи, предоставящи допълнителна възможност да се оптимизират подходите за анализ на данни от изпитвания с периодични проверки.

Планирани са и са проведени ускорени изпитвания, предназначени за оценка на показателите на надеждност на многослойни керамични кондензатори. Извършена е оценка на средното време до отказ на елементите при различните тестове. Изчислени са стойностите на параметрите  $A$ ,  $J$  и  $E_a$  от използвания линеен модел за оценка на средното време за безотказна работа за отделните тестове. В резултат се осигурява възможност за оценка на показателите на надеждност на елементите при зададени температура и напрежение в рамките на нормални експлоатационни условия.

Разработен е алгоритъм за оптимизация на изпитванията по време на провеждането им, посредством оценка на информативността на отделните тестове по отношение на получаваните оценки на изследваните показатели на надеждност. По този начин се осигурява повишаване на ефективността на проведените експериментални дейности. Предложеният подход бе приложен върху данни от реални ускорени изпитвания. Алгоритъмът може да се прилага при изпитвания по надеждност на широк кръг изделия, след отчитане на спецификата на работата и режимите на натоварването им.

## ОБЩИ ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия дисертационен труд са представени извършените изследвания, анализи и постигнатите резултати по отношение на проблеми на инженерната надеждност, възникващи при проектирането и изработването на електронни изделия, и свързани с оценяването и осигуряването на изискваните стойности на показателите на надеждност.

Анализирани са проблемите и спецификата при прогнозирането на надеждността на електронните изделия в най-ранните етапи на проектирането им. Извършено бе задълбочено изследване и сравнителен анализ на основните използвани в момента методологии на прогнозиране по надеждност. Изяснявайки специфичните характеристики на отделните методологии, анализът дава допълнителна информация при търсене на подходящата за различните случаи методология, с цел получаване на оценка с висока степен на достоверност на показателите на надеждност за изследваните електронни изделия.

Разработен е подход за избор на оптимални параметри на факторите, влияещи на надеждността на електронните елементи и системи. Подходът дава възможност за определяне на допустимите граници на изменение на въздействащите фактори, при зададена допустима стойност на интензивността на отказите. Този подход дава на инженерите-разработчици механизъм за по-цялостен поглед при постигането на нужната надеждност, помагайки им да изберат най-доброто възможно решение. Разгледаният подход е приложим за различни електронни компоненти и устройства. Подходът бе използван при оценяването на показателите на надеждност на електронни елементи и примерна схема, на базата на данни от MIL-HDBK-217F.

Изследвани са възможностите за използване на данни, получени от компютърни симулации, при прогнозната оценка на надеждността на електронните изделия с цел релевантен избор на допустими отклонения на основните параметри на градивните елементи. Поставен е акцент върху възможните използване на приложенията „Smoke” и “Monte Carlo Advanced” от модул PSpice Advanced Analysis на средата за автоматизирано проектиране OrCAD 16.0. Въз основа на направените изследвания, постигнатите резултати и анализа на тези резултати, е предложен алгоритъм, базиран на данните от компютърната симулация, който осигурява коректно прогнозиране на надеждността и оценяване на очакваното качество на изходната продукция. Прилагането на алгоритъма позволява по-широкообхватното оценяване на надеждността на изделията, позволявайки да се ограничи неопределеността по отношение на въздействието на толерансите на изграждащите една система елементи.

Проучени бяха основните методи за анализ на надеждността въз основа на данни от ускорени изпитвания. В резултат на проучването бе направен обоснован избор на методи, приложими при работа с групирани данни. Описан е математическият им апарат и е представен във вид, удобен за последващо прилагане в автоматизирана изчислителна процедура.

В областта на малките извадки и малък брой откази - от 0 до 7, при групирани данни е разработен подход с работно наименование “Интервален Вейбейс“, комбиниращ идеите на метода Вейбейс с математическия апарат на метода на максималното правдоподобие ML, прилагащ се при работа с групирани данни.

Предложени са критерии за оценяване на резултатите от извършвани симулационни изследвания, резултатите от които могат да се използват при обосноваването на избор на метод за анализ на данни от ускорени изпитвания. Критериите са използвани в глава IV на дисертацията по отношение на избраните методи за анализ на групирани данни, подчиняващи се на Вейбуловия закон на разпределение на случайни величини. Критериите имат общ характер и могат да се използват за изучаването на свойствата на други методи, за различни закони за разпределение и вид на данните - точни, цензурирани или групирани.

За целта на Вейбуловия анализ по надеждност, е разработен пакет от изчислителни модули в среда на MATLAB, който позволява генерирането на псевдослучайни реализации по закона на Вейбул от типа точни, ограничени отдясно или групирани, подготовка на данните за представянето им в графичен вид, получаване на параметрични оценки на параметрите на закона за разпределение на времената за безотказна работа по няколко

метода и допълнителна статистическа информация. Цялата функционалност на пакета може да се използва при обработката и анализа на данни от реални изпитвания. С помощта на така разработения продукт са анализирани резултатите от основните методи за оценка на параметрите на разпределението на Вейбул, включително разработения подход „Интервален Вейбейс“, при комбинация от групирани с цензурирани данни, при различно третиране на началните данни за отказите, с цел сравнителен анализ и предлагане на най-оптимален подход при анализ на групирани данни.

Анализирането на получените резултати от симулационните изследвания очерта някои специфики на методите, които могат да се имат предвид за повишаване на ефективността на прилагането им. Установено бе предимство на подхода „Интервален Вейбейс“ спрямо стандартния метод „Вейбейс“ при работа с интервални данни и нула или единични регистрирани откази.

Планирани са и са извършени ускорени изпитвания по надеждност на многослойни керамични кондензатори. Като ускоряващи фактори са използвани температурата и работното напрежение, поради факта, че са основни фактори, определящи експлоатационната им надеждност. Данните от експериментите са отчитани в точно определени, предварително фиксирани моменти. Това определя и типа на събраните данни - те са групирани, двустранно ограничени. Типът на данните определя и основния избран метод за моделиране на закона на разпределение - метода на максималното правдоподобие. За изпитванията с 0 или единични откази е приложен методът „Интервален Вейбейс“. За извършване на математическите операции е използван разработения изчислителен пакет, а също предлаганите в *MATLAB* оператори за вероятностен и статистически анализ.

Разработен е алгоритъм за оптимизация на изпитванията по време на провеждането им, на база на текущите резултати, посредством оценяване на информативността на отделните тестове по отношение на получаваните оценки на изследваните показатели на надеждност. Посредством динамичното оптимизиране на тестовете (изпитванията) се дава възможност да се получат достатъчно достоверни резултати, чрез търсене на оптималната комбинация по състав на изпитванията. Така е възможно да се постигне икономия във вид на време и ресурси, като се избягва необходимостта от повтаряне на пълния пакет изпитвания, при установяване на слаба информативност на вече извършените фиксирани тестове. По този начин се осигурява повишаване на ефективността на проведените експериментални дейности. Предложеният подход бе изследван посредством данни от реални ускорени изпитвания. Алгоритъмът е до голяма степен универсален, и след отчитане на спецификата на работа и режимите на натоварване, може да се прилага при изпитванията по надеждност на широк кръг изделия.

### **Основни изводи и предложение за практиката**

Разработените в дисертационния труд подходи и алгоритми увеличават възможностите за постигане на достоверна оценка на надеждността на електронните изделия в процеса на създаването им - при схемотехническото проектиране, когато е важно да се поставят сигурни основи за постигане на желаната надеждност, и при наличие на готова продукция, чрез избора на подходящи методи за надеждностен анализ и оптимизиране на провежданите надеждностни изпитвания.

Създадения изчислителен пакет предлага широки възможности за добавяне на нови модули за работа с други типове данни и методи за анализ.

Изследванията в дисертационния труд относно изпитвания с нула или единични откази при ускорени надеждностни изпитвания следва да бъдат продължени с работа по оценяване на текущото надеждностно състояние на електронни системи, за които, подобно на ускорените изпитвания, липсват възникнали откази в процеса на тяхната експлоатация. Перспективи в тази посока откриват съвременните техники от сферата на разпознаването на образи, анализа на данни и изкуствения интелект - методи за класификация на образи, изкуствените невронни мрежи, размита логика, генетични алгоритми, и др.

## ПРИНОСИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В настоящия дисертационен труд са анализирани някои проблеми на инженерната надеждност, свързани с прогнозирането и оценяването на надеждността на електронни изделия. Предложени са идеи и са разработени алгоритми, разширяващи инструментариума на конструкторите на електронни изделия и специалистите по надеждност. Проверката на адекватността на предложенията е извършена чрез симулационни експерименти и ускорени изпитвания по надеждност на електронни изделия.

В процеса на решаване на теоретичните и експериментални задачи на дисертацията са постигнати резултати, определящи следните научно-приложни и приложни приноси:

### Научно-приложни приноси:

1. Формулиран е и е изследван подход „Интервален Вейбейс“ за оценяване параметрите на закона на Вейбул при групирани данни, когато не са регистрирани откази или те са един или два.

2. Разработен е и е изследван алгоритъм за оптимизация на изпитванията по време на провеждането им, на база на текущите резултати, посредством оценка на информативността на отделните тестове по отношение на получаваните оценки на изследваните показатели на надеждност.

3. След провеждане на изследвания на предложения в глава II подход “Интервален Вейбейс” и на избрани методи за анализ на надеждността въз основа на групирани данни чрез симулационни експерименти и реални данни от изпитвания са установени нови факти, подпомагащи обосновавания избор на метод за анализ при обработката на данни от изпитвания с периодични проверки.

### Приложни приноси:

1. Разработен е подход за определяне на допустимите граници на изменение на въздействащите фактори, при зададена допустима стойност на интензивността на отказите.

2. Предложени са критерии за оценяване на методите за анализ на данни от ускорени изпитвания, на база на събрани при симулационни изследвания данни, които да служат за допълнителна аргументация при избора на метод за анализ в реални изпитвания.

3. Разработен е изчислителен пакет за симулационни експерименти и обработка на реални данни за времената на възникване на откази, подчиняващи се на закона за разпределение на Вейбул, с възможност за работа с точни, ограничени и групирани данни.

4. Разработен е алгоритъм за прогнозиране на надеждността и оценка на качеството на проектираните електронни изделия, основаващ се на използването на възможностите на съвременните автоматизирани системи за проектиране и симулации.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

[1A] Папанчев Т., Модифициран подход за оценка на параметрите на разпределението на Вейбул при изпитвания с нула или единични откази и интервални данни, списание „Известия“ на Съюза на учените - Варна, серия „Технически науки“, бр.1/2013, стр. 53-57, ISSN 1310-5833

[2A] Papanchev T., Modeling and Analysis of Electronic Systems with Bridge Structure, XX International Scientific Conference ELECTRONICS - ET2011, Sozopol, Bulgaria, 14-16.09.2011, Annual journal of Electronics, vol. 5, pp. 202-205, ISSN 1313-1842.

[3A] Папанчев Т., А. Георгиев, Приложение на системи за автоматизирано проектиране при изследване на надеждността на електронни изделия, Електронно списание „Компютърни науки и комуникации“, брой 2/2013г. том 2, стр. 2-10, ISSN 1314-784, <http://ojs.bfu.bg/index.php/knk>

[4A] Папанчев Т., А. Георгиев, Оценка на надеждностните характеристики на електронни схеми посредством симулационни данни от автоматизирани системи за проектиране, Сборник доклади от докторантски семинар по проект “BG051PO001-3.3.06 -0005 - Развитие потенциала на докторанти, постдокторанти, млади учени и специализанти от инженерните науки в ТУ Варна и техния принос за развитие на икономика, базирана на знанието”, ТУ-Варна, 2013, стр. 37-41, ISBN 978-954-760-316-5



- [5A] Папанчев Т., А. Георгиев, Приложение на методи за разпознаване на образи в класификацията на електронни изделия по надеждност, Електронно списание „Компютърни науки и комуникации”, брой 1/2012, стр. 23-33, ISSN: 1314-7846, <http://ojs.bfu.bg/index.php/knk>
- [6A] Papanchev T., A. Georgiev, N. Georgieva and A. Marinov, Application of Stress Redundancy and its Influence upon the reliability of electronic elements and Systems, XLVI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies - ICEST 2011, 29 to 1 July 2011, Nish, Serbia, Proc. of papers vol. 3, pp. 921-924, ISBN 978-86-6125-033-0
- [7A] Papanchev T., A. Georgiev, G. Todorinov, Analysis of Parameter Estimation Methods for Weibull Distribution and Interval Data, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Volume 3, Issue 9, March 2014, pp. 230-235, ISSN: 2277-3754 , <http://ijeit.com/archivedescription.php?id=29>, ISRA Journal IF: 2.137 (dec. 2014)
- [8A] Papanchev T., A. Georgiev, H. Gigov, N. Georgieva and G. Todorinov , A Study on Reliability Characteristics of Programmable Temperature Controller, XX International Scientific Conference ELECTRONICS - ET2011, Sozopol, Bulgaria, 14-16.09.2011, Annual journal of Electronics, vol. 5, pp. 206-209, ISSN 1313-1842.
- [9A] Георгиев А., Т. Папанчев, Анализ на надеждността на електронни изделия, основаващ се на данни от ускорени изпитвания, Proceedings of 3th International Scientific Congress, TU-Varna, 04.-06.10.2012, Vol. 2, pp. 128-133, ISBN 978-954-20-0551-3.
- [10A] Georgiev A., T. Papanchev, D. Kovachev, Evaluation of Technical Condition of a Radar with Redundancy, , International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Volume 4, Issue 6, December 2014, pp. 185-192, ISSN: 2277-3754 , <http://www.ijeit.com/archivedescription.php?id=38>, ISRA Journal IF: 2.137 (dec. 2014)

### **Abstract**

## **RESEARCH, ANALYSIS AND EVALUATION OF THE RELIABILITY OF ELECTRONIC DEVICES**

This PhD thesis presents the investigations, analysis and results regarding the problems of engineering reliability, occurring in design and manufacture of electronic products and related to assessment and ensuring the required levels of reliability parameters. An approach is developed for selecting the optimal parameters of the factors affecting the reliability of electronic components and systems. The approach allows to determine acceptable limits of variations of influencing factors at a set limit to the failure rates. This approach gives engineers a tool for a more comprehensive view in achieving the required reliability, helping them to choose the best possible solution. The main methods for reliability analysis of data from accelerated tests were studied. As a result of the survey, a reasonable choice is done of methods useful when dealing with interval data. These methods are mathematically represented in a form suitable for further application in automated computational procedure. In small samples and small number of failures - from 0 to 7, for interval data, we have developed an approach named "Interval Weybayes", combining the ideas of their method Weybayes with the mathematical apparatus of the method of maximum likelihood ML, used when working with interval data. For the purpose of Weibull reliability analysis, we developed a set of computational modules in the environment of MATLAB, which allows the generation of pseudorandom data under the law of Weibull of the type precise, right censored or interval, preparation of data for presentation in graphical form, obtaining the parameter estimates of the reliability distribution by several methods, and additional statistical information. Using this product we have analyzed the results of the main methods to estimate parameters of the Weibull distribution in combination with interval censored data, different treatment of initial failure data, in order to offer the most optimal approach for the analysis of interval data. Analyzing the results of simulation studies outlined some features of the methods that can be considered to increase the effectiveness of their implementation. It was found an advantage on the "Interval Weybayes" than the standard method "Weybayes" when working with interval data and zero or single registered failures. An algorithm is developed for optimization the tests during their implementation, based on the current results by means of evaluating the informativeness of individual tests in terms of getting an evaluation of reliability parameters. Dynamic optimization of tests allows to obtain sufficiently

reliable results by searching for the optimal combination of tests. Thus, it is possible to achieve savings in terms of time and resources, while avoiding the need to repeat the entire test packet, when establishing low informativeness of standard tests already carried out.

## **Резюме**

### **ИССЛЕДОВАНИЯ, АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

В дисертации представлены проведенные исследования, анализы и результаты в плане проблемы инженерной надежности, возникающих в области разработки и производства электронных изделий и связанных с этим оценки и обеспечения необходимые уровни надежности показателей. Разработана методика выбора оптимальных параметров факторов, влияющих на надежность электронных компонентов и систем. Подход позволяет определить приемлемые пределы изменения влияющих факторов на установленный предел интенсивности отказов. Такой подход дает разработчикам механизм для достижения требуемой надежности, помогая им выбрать наилучшее решение. Изучены основные методы анализа надежности при выполнении ускоренных испытаний. В результате опроса, сделан разумный выбор подходящих методов полезных при работе с интервальными данными. Эти методы математически представлены в форме, пригодной для дальнейшего применения в автоматизированной вычислительной процедуре. В некоторых образцы и небольших числа отказов - от 0 до 7, когда имеем интервальные данные, мы разработали способ с рабочим названием "Интервальный Вейбейс", сочетая идеи метода Вейбейс с математическим аппаратом метода максимального правдоподобия ML, используемой при работе с с интервальных данных. Для целей анализа надежности Вейбулла, мы разработали набор вычислительных модулей в среде MATLAB, что позволяет генерацию псевдослучайных реализаций закону Вейбулла точные, ограниченные справа или интервальные данные. Эти данные могут быть представлены в графическом виде и анализированы несколькими методами для получения оценок надежных параметров и дополнительной статистической информации. С этим продуктом мы обследовали результаты основных методов для оценки параметров распределения Вейбулла, в сочетании с интервальными и цензурированными данными, различной обработки исходных данных для отказов, чтобы предложить наиболее оптимальный подход для анализа интервальных данных. Анализируя полученных результатов исследований были изложены некоторые особенности методов, которые могут быть рассмотрены для повышения эффективности их реализации. Установлено было преимущество способу "Интервальный Вейбейс", по сравнению с методом "Вейбейс", при работе с интервальными данными и нуля или некоторых зарегистрированных отказов. Таким образом, эти результаты дают нам основание предложить способ "Интервальный Вейбейс" использоваться как основной выбор в этих условиях, когда можно обоснованно принять известным стойность параметра формы  $\beta$ . Разработан алгоритм оптимизации испытания в процессе их реализации, основан на текущие результаты, оценивая информативность отдельных тестов с точки зрения получения оценки параметров надежности. Динамическая оптимизация тестов позволяет получить достаточно надежные результаты посредством оптимальное сочетание тестов. Таким образом, можно добиться экономии времени и ресурсов, уменьшая вероятности повторения испытаний.

### **Благодарности**

Исказвам благодарности на своя научен ръководител доц. д-р инж. Антон Георгиев за неговите съвети и компетентно ръководство. Благодаря на колегите от катедра „Електронна техника и микроелектроника“ към Технически Университет - Варна за оказаната ми помощ през годините на работа по дисертационния труд.

Благодаря на семейството си за проявеното разбиране, търпение и подкрепа.