

A REVIEW OF RELIABILITY MODELING METHODS FOR ELECTRONIC DEVICES

Papanchev Toncho, Technical University – Varna, t.papanchev@tu-varna.bg

Abstract: This article presents an overview of the most common methods for modeling the reliability of electronic products. A classification in terms of the information used in modeling is done. Problems and limitations of the methods are discussed. Guidelines for further work are outlined for improvement of the credibility of the obtained estimates of reliability indexes and the ultimate usefulness of the conducted reliability modeling.

Keywords: reliability modeling, electronic devices

ОБЗОР НА МЕТОДИТЕ ЗА МОДЕЛИРАНЕ НА НАДЕЖДНОСТТА НА ЕЛЕКТРОННИ ИЗДЕЛИЯ

Тончо Папанчев, Технически Университет – Варна, t.papanchev@tu-varna.bg

Абстракт: В настоящата статия е направен обзор на най-често прилаганите методи за моделиране на надеждността на електронни изделия. Направена е класификация от гледна точка на използваната при моделирането информация. Разгледани са някои проблеми и ограничения на методите и са очертани насоки за по-нататъшна работа за повишаване на достоверността на получаваните оценки на надеждностните показатели и крайната полезност от провеждането на надеждностно моделиране.

Ключови думи: моделиране на надеждността, електронни изделия

ВЪВЕДЕНИЕ

Надеждността на електронните изделия може да се разглежда като фактор, който играе важна роля при решаването на глобалните проблеми на съвременното. Тя е тясно свързана с осигуряването на икономия на енергия и материали, в различни аспекти: - намаляване на производствения брак, оттам намаляване на относителната част консумирана електроенергия и разходите на материали за производството на единица качествено изделие; - намаляване на разхода на енергия за производството (добива) на изходните материали; - удължаване на живота на електронните изделия и намаляването на ремонтно-възстановителните дейности, което е свързано с оптимизирането на разходите за поддръжка и понижаването на цената на експлоатацията на изделията; - намаляване на рисковете за замърсяване на околната среда, вследствие ограничаването на риска от възникване на аварии; - ограничаването на емисиите вредни газове, отделяни при производството на изделията, чрез удължаването на експлоатационния им период и намаляването на общия обем на производство.

Надеждността на даден продукт е характеристика, която изразява идеята за доверие или отсъствието на отказ. Според IEC 60050-191 [1], 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 [2] 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“.

Зададената в техническата документация надеждност на електронните изделия може да бъде постигната при оценяване на надеждността на всеки етап от жизнения цикъл на изделията. В своя труд „Изчислителна надеждност в радиоелектрониката“ [3] Гиндев представя три нива за осъществяването на надеждността като понятие, от които основополагащо значение е работата на етапа на проектиране, свързана с оценяването на конструкцията, градивните елементи и анализа на влияещите на надеждността 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.

Проектирането включва следните фази: провеждане на научно-изследователски и опитно-конструкторски дейности, завършващи с разработката на конструкторска документация, изработване на макети и опитни образци, проверка на очакваните характеристики на изделията, в това число и надеждността.

Оценяването на надеждността в началните фази на развитие на идеята и идентифицирането на критичните компоненти е решаващ фактор за икономическата ефективност на процеса на осигуряване на желаната надеждност на електронните изделия. Основа за това са електрическите изчисления за работните режими на компонентите на едно електронно изделие. Друга страна в този процес е намирането на оптимално решение за разпределянето на надеждността между отделните блокове в електронните системи. В [4] Андонова и колеги използват функция на цената на разпределяне на надеждността, като въвеждат коефициент на изпълнимост на повишаването на надеждността на компонентите и функционални блокове. Успехите в изпълнението на тези дейности са свързани с тясното сътрудничество между инженерите по надеждност и конструкторите на изделието. Единствено така се постига най-точно пресъздаване на функционалните блокови схеми и диаграми на електронната апаратура в структурни блокови диаграми от гледна точка на надеждността и най-достоверна оценка на показателите на надеждност на градивните електронни елементи.

Работата по оценяването и повишаването на надеждността на изделията в най-ранните стадии на създаването им протича в няколко посоки:

- избор на най-подходящо конструктивно изпълнение - помага на инженерите-разра-



Фиг.1.1. Класификация на методите за моделиране на надеждността на електронните изделия

ботчици да изберат най-добрите условия и най-подходящите типове компоненти;

- оценяване на потенциала на новите изделия, сравнявайки изчислената надеждност с поставените изисквания;

- прогнозираните стойности на показателите на надеждност могат да послужат за определяне на нивата на приемане и отхвърляне при приемо-предавателните отношения между производител и потребител;

- първоначално определяне на необходимия брой запасни части.

В статията е направен преглед на методите за моделиране на надеждността от гледна точка на наличната информация в момента на извършването на оценяването. Терминът „информация“ се използва като обобщаващ за данни относно времената на възникване на откази, броя възникнали откази за единица време, видовете на отказите, данните за работната среда и натоварването и др. Фигура 1.1 представя класификация на методите за моделиране на надеждността, направена от такъв дискурс.

ОБЗОР НА МЕТОДИТЕ ЗА МОДЕЛИРАНЕ НА НАДЕЖДНОСТТА

В книгата „Надеждност и сигурност на комуникациите“ [5] 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.

ФИЗИЧЕСКИ МЕТОДИ ЗА МОДЕЛИРАНЕ – ФИЗИЧЕСКИ МОДЕЛИ

Физическите модели се разделят на статистически и експериментални. Физически-статистически са законът на Арениус, законът на Ейринг, Инверсният степенен закон и комбинация от тези методи. Физически-експерименталните модели описват процесите, довеждащи до възникване на внезапни или параметрични откази. При електронните изделия такива са процесите на електромиграция, влиянието на влажността, умората на материалите вследствие на постоянно въздействащи фактори като температура, вибрации и др. Известно е, че причините за възникването на откази не са обусловени от точно формулирани процеси, а напротив, това са стохастични процеси, и трябва да бъдат анализирани като такива при изграждането на модели, гарантиращи висока достоверност на резултатите. Надеждността е напълно зависима от първоначалните условия (например производствените вариации) и изходните променливи. И началните състояния, и изходните променливи често са непознати. Това подчертава необходимостта да се изследват причините за възникване на отказите и да се изградят модели, които еднозначно да моделират процесите, довеждащи до възникване на отказите. При наблюдаване на постепенни изменения вследствие на стареене, без достигане на пълен отказ, се използват модели на стареене, базирани на знанията за законите на противичане на физическите процеси или на статистически данни.

Милтън Оринг [6] предлага подробен анализ на физическите процеси, протичащи в основните полупроводникови електронни елементи, и връзката им с изменението на тяхната надеждност. Чернишев [7] също изследва процесите, влияещи върху надеждността на полупроводниковите елементи и интегрални схеми. Една част от тези процеси могат да се нарекат вътрешно-характерни, като преместването на маси в твърдите тела, причинени от дифузионни процеси, реакция в мястото на допир на различни по свойства материали, например контакта метал-полупроводник, процесите на електромиграция. Други процеси могат да се окачествят като свързани с електрическото натоварване на електронните изделия - пробив в диелектричните материали, ефекти, пре-

дизвикани от частици с висока кинетична енергия (*hot carriers*), електрическо претоварване или електростатичен разряд. На описание подлежат и процесите, породени от фактори на въздействие на средата на функциониране на изделията, като атмосферни замърсявания, влага, радиация и други. Сложността при изграждането на математическо описание на физическите модели е свързана с едновременното протичане на няколко такива процеси и взаимното повлияване на начина и скоростта на протичането им. Методите, които се прилагат най-често в анализа на надеждността, могат да се диференцират и по обекта на изследване. Основните показатели, чието поведение се моделира, са два. В единия случай това е времето до възникване на отказ, за което се приема, че е обратно пропорционално на степента на приложеното натоварване. Това са моделите на времето до отказ при ускорени изпитвания. При тях се приема, че логаритъмът на „номиналното“ [8] време до отказ τ , $y = \ln \tau$, има линейна форма на разпределение с параметър на отреза $\mu(\vec{s})$, във функция от вектора на натоварването \vec{s} , и ълов коефициент (параметър на мащаба) σ , с постоянна стойност:

$$y = \ln(\tau) = \mu(\vec{s}) + \sigma \cdot \gamma, \quad (1)$$

където γ е случайна променлива с разпределение, независимо от вектора на натоварването \vec{s} . Параметърът на отреза представлява предварително определена функция на вектора на натоварването, като при електронните изделия това обикновено е линейно уравнение от вида

$$\mu(\vec{s}) = \mu(s_1, s_2) = \theta_0 + \theta_1 s_1 + \theta_2 s_2, \quad (2)$$

където s_1 и s_2 са предварителни известни функции на натоварванията, а θ_0 , θ_1 и θ_2 са коефициенти, чиито стойности се дефинират чрез методите на регресионния анализ. Друго предварително условие на моделите на времето до отказ е, че формата на разпределението на стойностите на случайната величина „време на работа до отказ“ не зависи от натоварванията, т.е. при всички натоварвания се запазва един и същ закон на разпределение. Вероятностите за възникване на отказ, съобразно двата най-често прилагани закони на разпределение в областта на електронните изделия - експоненциалния и двупараметричния закон на Вейбул, приемат съответните форми:

$$Q^{\text{exp}}(t; \vec{s}) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{\text{exp}}}\right)}, \quad (3)$$

$$Q^{\text{Weib}}(t; \vec{s}) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{\text{Weib}}}\right)^\beta}. \quad (4)$$

В уравненията τ_{exp} и τ_{Weib} са съответно средното време до отказ и характеристикното време, β е параметъра на формата за закона на Вейбул.

Другият подход за изследване на закономерностите при възникването на откази във времето оценява функцията на интензивността на отказите. Интензивността на отказите представлява оценка на скоростта на изменение на вероятността за възникване на отказ. Тъй като последната е функция на времето, интензивността на отказите също е функция на времето. Изследвайки този параметър, може да се определи кои фактори най-силно влияят на вида и честотата на появяване на отказите, и/или при какви обстоятелства факторите въздействат на отказите. Един от най-често прилаганите модели е пропорционалният модел на функцията на интензивността на отказите. При този модел се приема, че прилаганите натоварвания въздействат мултипликативно върху функцията на интензивността на отказите. Най-общо този модел се изразява с израза [9]

$$\lambda(t; \vec{s}) = \lambda_0(t) e^{\vec{s} \cdot \vec{\beta}}, \quad (5)$$

където \vec{s} е вектор на натоварването $\vec{s} = (s_1, s_2, \dots)$, $\vec{\beta}$ е вектор на коефициенти с неизвестни стойности, с размерност, равна на размерността на \vec{s} , а $\lambda_0(t)$ е неизвестна функция, представляваща функцията на интензивността на отказите при стандартна комбинация от условия на натоварване $\vec{s} = 0$. Предимството на този модел е, че могат да се въвеждат елементи на вектора на натоварване, които се изменят с времето. Лесно се забелязва, че при този модел, в момента t , функцията на интензивността на отказите $\lambda(t; \vec{s}_i(t))$ за i -то изпитвано изделие зависи от моментното състояние на натоварванията, без да се повлиява от предходните състояния на факторите на натоварване.

Събраните данни за поведението на изделията, било по експериментален път или чрез потоците информация от гаранционно, извънгаранционно обслужване или техническа поддръжка, подлежат на анализ и математически изчисления, с крайна цел получаване на достоверни оценки на изследваните показатели на надеждност. Халдар и Махадеван [10] изучават и обобщават използваните статистически методи в изследването на надеждността. Основните прилагани методи, при наличие на предварителни данни за вида на закона на разпределение на времето за безотказна работа, са метода на моментите, метода на най-малките квадрати, метода на максималното правдоподобие. При липса на такава априорна информация, се прилагат графични методи за анализ, представляващи последователност от стъпки по обработка на входната информация, графическо представяне на данните, избор на работна хипотеза за типа на закона на разпределение и оценка на нейната валидност, и получаване на точкови оценки на показателите на надеждност. Изборът на най-подходящ метод е от решаващо значение за достоверността на изходните резултати. Много често се използва повече от един метод, за сверяване на изходните резултати, за потвърждаване или отхвърляне на работни хипотези.

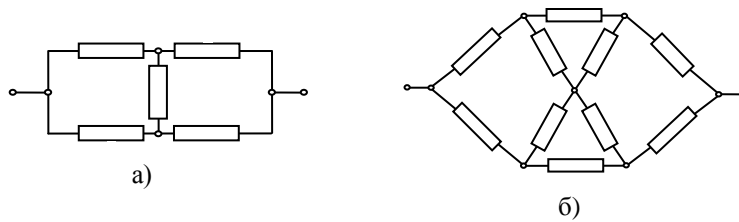
Флигар и колеги [11] представя сравнителни резултати при оценка на параметрите на разпределението по групирани данни, представени като точни в центъра на интервала. Авторите са разгледали частния случай, когато всеки интервал съдържа само един отказ. В действителност при изпитванията на електронни изделия или обработката на натрупана сервизна информация наличието на повече от един отказ в даден интервал е често срещан случай, което налага анализирането на възможностите за замяна на групирани данни с точни по начин, опростяващ изчисленията и ограничаващ допълнителната грешка. Гур [12] изследва точността на методите на максималното правдоподобие и на най-малките квадрати при оценката на параметрите на разпределенията, но отново основното внимание е насочено към цензурираните данни. Не е изяснено как са преобразувани групирани данни при методите на най-малките квадрати.

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. Те се разделят на последователни, паралелни, смесени и сложни структури. В [13] е

разгледана подробно мостова структурна схема по надеждност и е изследван проблемът с оптимизацията на показателите на надеждност на блоковете в схемата – Фиг.1.2.



Фиг.1.2. Сложни структурни схеми по надеждност: а) мостова структура; б) структура тип „люлка”

Правилата на прилагане на тези подходи за анализ на надеждността са систематизирани в стандарт БДС EN 61078:2006 (IEC 61078:2006) [14]. 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. При тях връзките и зависимостите между отделните блокове по отношение на възникване на отказ или запазване на работоспособно състояние се представят във формата на дървовидна структура, което улеснява локализирането на проблемните точки и извършването на полезните превантивни или корективни действия. В [15] авторите използват Дърво на отказите за анализ на видовете възможни откази в етапа на конструиране на електронни изделия. Подобна структура има анализът посредством Дървото на събитията, при който се представят връзките между проявяващите се събития. Обобщените принципи и основни насоки за прилагането на Дървото на събитията са представени в стандарта БДС EN 62502:2010 (IEC 62502:2010) [16]. В своя доклад Арифуджаман представя комбинираното използване на Дърво на отказите и Дърво на събитията [17], за попълно описание на процесите в изделието и по-достоверна оценка на показателите на надеждност на изследваното изделие. Развитието на горните методи води до модели, които се разработват последните няколко години, като Диаграма на двоичните решения *BDD*, *BDD* с множествени състояния [18], [5], Дърво на динамиката на отказите *DFT* [19] и др. Когато системите и техните блокове подлежат на възстановяване, с или без вграден излишък от структурен или информационен тип, моделирането на надеждността посредством Марковски вериги дава възможност за създаване на цялостна картина на поведението на системата. Създава се описание на състоянията на отделните блокове, на системата като цяло и преходите между различните състояния. Методът позволява обединяване на състояния и преходи, с което се опростява крайната диаграма на състоянията и преходите, а оттам и математическите изрази, чрез които се оценяват показателите на надеждност. Пример за използването на този метод като надграждащ метода на блоковата структурна схема по надеждност представя [20]. В статията авторите използват двата метода за описание на система с възстановяване в два случая - без резервиране и с влагане на хардуерно резервиране. Ясно се изяснява нуждата от използване на Марковския модел във втория случай, когато са налице множество дублиращи връзки между отделните блокове, за извеждане на уравненията за получаване на оценки на изследваните показатели на надеждност.

КОМПЛЕКСНИ МЕТОДИ

Методът „Анализ на типа на отказите и следствията от тях“ *FMEA* има за цел описанието на очакваните откази и вземане на мерки за смекчаване на негативните ефекти преди момента на възникване на отказ. Неговото ранно провеждане е от ключово значение за постигане на икономически ефективни резултати, като се препоръчва използването му

на всеки етап от процеса на проектиране [21]. В извършването на този анализ участват специалисти в различни области - проектиране, производство, поръчки, качество, продажби, и други.

Методът „Анализ на типа на отказите, следствията и критичните състояния“ *FMECA* [22] се използва за изучаване на свойствата на дадена електронна система, за да се определи как системата може да бъде модифицирана, с цел повишаване на надеждността и да избегне отказите. Пример в това отношение е провеждането на прогностичен анализ. Получените данни за интензивностите на отказите на компонентите могат да бъдат използвани направо при извършване на анализ посредством структурни диаграми, или да се приложи *FMECA* за определяне на възможните видове откази и тяхната тежест върху състоянието на изделието. Резултатите от *FMECA* са най-добри, ако анализът се извърши в раните етапи на разработване и се обновява през процеса на проектиране и изработване. Този подход обогатява познанията на инженерния екип за разработваната система. Провеждането на метода в края на процеса на разработване минимизира неговото влияние върху качествата на изделието.

Когато описанието на функционирането на една електронна система с оглед анализ на нейната надеждност представлява трудна за изпълнение задача, един от удобните варианти е провеждането на симулационни изследвания, наречени „Монте Карло”. Монте Карло симулациите са удобен начин да се изследват сложни системи и процеси, за които е трудно да се създадат достатъчно точни модели. В [23] авторите са използвали такъв тип симулационни изследвания за оценяване на надеждността на сложни електронни системи. 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. Точното описание на процесите в изследваното изделие е решаващо за достоверността на изходните резултати. Съвременните компютърни системи за автоматизирано проектиране имат редица функционални възможности, които могат да бъдат полезни за тази цел. Въпреки че по отношение на симулационния анализ в системите за автоматизирано проектиране има достатъчно информация, не бяха намерени разработки в областта на прогнозирането на надеждността на електронни изделия, в които оценяването на надеждността да включва използването на резултатите от симулационните изследвания на проектираните електронни схеми за електрическите натоварвания на изграждащите ги компоненти, или анализ на влиянието на толерансите на основните показатели на градивните елементи върху надеждността чрез влошаване на работния им режим или изместване на изходните параметри на изделието от номиналната им стойност.

Бейсовският подход се използва успешно при моделирането на надеждността на електронни изделия. Публикациите на А. Георгиев, А. Тошков и Н. Георгиева [24], [25] показват последователността на действия при прилагане на този начин на оценяване. Бейсовският подход предоставя идейна основа за ефективно обединяване на съществуваща предварително информация (прогнози, резултати от изпитвания на подобни изделия, инженерен опит) с актуални, конкретни за изследваните изделия данни, с цел да се направи прогнозна оценка на надеждността на базата на комбинация от всички налични данни. Такъв подход също така позволява прогнозните оценки да се обновяват непрекъснато, с натрупването на нови и нови данни. Бейсовският подход е интуитивно привлекателен за инженерите-дизайнери, защото им позволява да използват инженерната експертиза, основана на предишен опит с подобни конструкции на електронни изделия, при първоначалната оценка на надеждността на ново конструктивно решение. Това е особено полезно за оценка на надеждността на нови системи, за които липсват или са налични малко експлоатационни данни. Пример за прилагането на този подход е доба-

вянето към данните от изпълнени изпитвания по надеждност на информация от предишни изпитвания на продукта, от изпитвания на компоненти и съставни блокове, и дори интуитивни предположения, основани на натрупан от инженерите опит. Теоремата на Бейс може да бъде използвана, за да се съчетаят тези резултати. Така, основната разлика между Бейсовския поход и класическите (без Бейс) подходите е, че първите използват настоящи и предварително налични данни, докато вторите използват само текущи данни. Бейсовският подход е предмет на анализ и разработване на правила за прилагането му в трудовете на учени като Савчук [26], Ушаков [27], Сотирис [28], и в методологически документи като MIL-HDBK-338B [29] и IEC 61710-2013 [30].

ПРОБЛЕМИ ПРИ ОЦЕНЯВАНЕТО НА НАДЕЖДНОСТТА В РАЗЛИЧНИТЕ ЕТАПИ НА ЖИЗНЕНИЯ ЦИКЪЛ НА ЕЛЕКТРОННИТЕ ИЗДЕЛИЯ

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 [31] - “предприемачество, новаторство и конкурентоспособност”, е неразделно свързана с изискване за високото качество и надеждност на създаваните продукти. Отчетените при реализирането на стратегията проблеми са свързани с недостатъчното внимание към надеждността във всички области - от едрото машиностроене до персоналните електронни устройства. В доклад за резултатите от изпълнението на Лисабонската стратегия от 2004 г. се предлага основната цел на Стратегията да бъде превръщането на ЕС в „единна, конкурентна, динамична икономика, базирана на знанието, която да е сред най-добрите в света“ [32]. Една от целите в следващата стратегия за развитие „Европа 2020“ [33] е постигане на растеж, който е „устойчив, благодарение на решителното преминаване към нисковъглеродна икономика и конкурентоспособна промишленост“. Постигането на тази цел е в тясна връзка с повишаването на качеството и надеждността на произвежданата продукция.

При изследванията на надеждността съществува проблем, свързан с наличието на две на пръв поглед противоречиви изисквания. От една страна, за да се постигне най-добър резултат при “вграждането” на достатъчна надеждност като основно качество на изделието, анализите по отношение на надеждността трябва да започнат още с първите стъпки по проектирането на изделията. От друга страна, в тези първи етапи има доста ненапълно уточнени параметри, свързани с различни аспекти от реалната експлоатация на изделията. Тази неизвестност е предпоставка за получаване на резултати с неясна точност. Може да се каже, че в началото на проектирането на едно изделие оценките на показателите на надеждност играят роля най-вече като допълнителен фактор за съпоставяне на различни схемотехнически решения и избор на вариант, удовлетворяващ изискванията по отношение на надеждност. Възможно е на този етап да не са изцяло уточнени напълно всички параметри на условията на експлоатация. В такъв случай, за да се проведе прогнозирането на надеждността, се използват зададените по подразбиране стойности на неизвестните параметри. Постепенно, в процеса на уточняване на реалните експлоатационни условия, стойностите по подразбиране се заместват с действителните.

ИЗВОДИ

Разработени са редица методи за моделиране, 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, Isograph, PTC Windchill Prediction (предишно наименование Relx) и Item Software, 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 конкретните оценки 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. Въпросите за включването на такива системи в процесите на анализ на надеждността и обосноваване на конструктивни решения не са разгледани и анализирани в достатъчен обем от научната общност.

Направените 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 на 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.

References

- [1] MURTHY D., M. RAUSAND, S. VIRTANEN, Investment in new product reliability, Reliability Engineering and System Safety, vol. 94(2009), pp.1593-1600, Elsevier, ISSN 0951-8320
- [2] БДС 27.002-86. Надеждност в техниката. Основни термини и определения, София, 1987
- [3] ГИНДЕВ Е., Изчислителна надеждност в радиоелектрониката, Д. изд. Техника, 1979
- [4] ANDONOVA A., N. ATANASOVA, D. DIMITROV, Reliability Allocation and Optimization of Microsystems in Design Phase, Proceedings of ICEST 2002, Nis, 1-3 oct., Yugoslavia, 2002, pp. 81-84
- [5] ХРИСТОВ Х., В. ТРИФОНОВ, Надеждност и сигурност в комуникациите, Издателство “Нови знания”, София, България, 2005, ISBN 954-9315-43-6
- [6] OHRING M., Reliability and Failure of Electronic Materials and Device, Academic Press, An Imprint of Elsevier, 1998, ISBN: 978-0-12-524985
- [7] ЧЕРНЫШЕВ А., Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, изд. “Радио и связь” 1988, ISBN 5-256-00042-X
- [8] NELSON W., Accelerated Testing, Statistical Models, Plans, and Data Analysis, New Jersey, John Wiley and Sons, Inc., 2004, ISBN: 978-0-471-69736-7
- [9] COX D., Regression Models and Life-Tables, Journal of the Royal Statistical Society, Vol.34, o:2, 1972, pp. 187-220, <http://www.jstor.org/stable/2985181>
- [10] HALDAR A., S. MAHADEVAN, Probability, Reliability and statistical methods in engineering design, John Wiley and Sons Inc., New York, NY, 2000, ISBN: 978-0-471-33119-3
- [11] FLYGARE M., J. AUSTIN, R. BUCKWALTER, Maximum Likelihood Estimation For The 2-Parameter Weibull Distribution Based On Interval-Data, IEEE Transaction on Reliability, vol. R-34, NO. 1, 1985, ISSN 0018-9529
- [12] GOORE C., N. IBRAHIM, M. ADAM, On Partly Censored Data With Weibull Distribution, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol.7, No.10, Oct. 2012, ISSN 1819-6608
- [13] 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.
- [14] БДС EN 61078:2006 (IEC 61078:2006). Методи за анализ на надеждността. Методи на базата на блок-схема на безотказността

- [15] ANDONOVA A., N. ATANASOVA, Failure Mode Analysis using Fault Tree for evaluation of System Reliability in Design Phase, Proceedings of the Int. Scientific Conference on Energy and Information Systems and Technologies, Bitola, June, Macedonia, 2001, p. 249-254
- [16] БДС EN 61078:2006 (IEC 61078:2006). Методи за анализ на надеждността. Методи на базата на блок-схема на безотказността и на булевата алгебра.
- [17] ARIFUJJAMAN MD., M.T.IGBAL, J.E. OUAICOE, Reliability analysis of grid connected small wind turbine power electronics, Applied energy 86 (2009), pp. 1617-1623, Elsevier Science Ltd., ISSN 0306-2619
- [18] SRESHTA A., L. XING, Y. DAI, Decision Diagram Based Methods and Complexity Analysis for Multy-State Systems, IEEE Trans. on Reliability, Vol.59, No.1, March 2010, ISSN 0018-9529
- [19] CEPIN M., B. MAVKO, A dynamic fault tree, Elsevier, Reliability Engineering and System Safety, 75 (2002), pp. 83-91, Elsevier, ISSN: 0951-8320
- [20] 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
- [21] ANDONOVA A., N. ATANASOVA, D. DIMITROV, Reliability Allocation and Optimization of Microsystems in Design Phase, Proceedings of ICEST 2002, Nis, , 1-3 Oct., Yugoslavia, 2002, p.81-84
- [22] MIL-STD-1629A. Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, US Department of Defense, 1980
- [23] ANDONOVA A., N. ATANASOVA, Monte Carlo Simulation using Excel Spreadsheet for Predicting Reliability of a Complex System Failure, Proceedings of the Int. Scientific Conference on Energy and Information Systems and Technologies, Bitola, June, Macedonia, 2001, p. 255-259
- [24] GEORGIEV A., A. TOSHKOV, Application of Bayesian techniques to reliability prediction of the structural elements of the electronic apparatus, Conference proceedings of the Tehnonav 2006, Ovidius University Press, pp. 445-449, ISBN 973-614-307-4.
- [25] GEORGIEV A., N. GEORGIEVA, Prior reliability extraction of the electronic apparatus by means of Bayesian techniques prediction, Conference proceedings of the Tehnonav 2006, Ovidius University Press, pp. 445-449, ISBN 973-614-307-4.
- [26] САВЧУК В., Байесовские методы статистического оценивания. Надежность технических объектов, „Наука“, Москва, 1989
- [27] УШАКОВ И.А., Надежность технических систем, Изд. “Радио и связь”, Москва, 1985
- [28] SOTIRIS V., P. TSE, M. PECHT, Anomaly Detection Through a Bayesian Support Vector Mashine, IEEE Trans. Of Reliability, Vol. 59, No.2, June 2010, pp. 277-288, ISSN 0018-9529
- [29] MIL-HDBK-338B. Electronic Reliability Design Handbook, Department of Defence, USA, 1998
- [30] IEC 61710:2013, Power law model - Goodness-of-fit tests and estimation methods
- [31] Европейски съвет от Лисабон, Стратегия за икономическо и социално обновление на Европа, документ, представен от Европейската Комисия на вниманието на извънредния Европейски съвет от Лисабон, 23-24 март 2000 г.
- [32] Facing the challenge The Lisbon strategy for growth and employment, Report from the High Level Group chaired by Wim Kok, November 2004, http://ec.europa.eu/research/evaluations/pdf/archive/fp6-evidence-base/evaluation_studies_and_reports/evaluation_studies_and_reports_2004/the_lisbon_strategy_for_growth_and_employment__report_from_the_high
- [33] Европа 2020 Стратегия за интелигентен, устойчив и приобщаващ растеж, Европейска Комисия, Брюксел, март 2010, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?Uri=COM:2010:2020:FIN:BG:PDF>