

ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИЕТО И АНАЛИЗ НА ПРИЛОЖИМОСТТА НА МЕТОДИКИ MIL-HDBK-217F И FIDES ЗА ПРОГНОЗИРАНЕ НА НАДЕЖНОСТТА НА ЕЛЕКТРОННИ ЕЛЕМЕНТИ

Живко Светославов Велев, Продан Иванов Проданов*

Технически Университет - Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, 5300 Габрово, България
**кореспондиращ автор: pprodanov@tugab.bg*

TRENDS IN THE DEVELOPMENT AND APPLICABILITY ANALYSIS OF MIL-HDBK-217F AND FIDES METHODOLOGIES FOR RELIABILITY PREDICTION OF ELECTRONIC COMPONENTS

Zhivko Svetoslavov VeleV, Prodan Ivanov Prodanov*

¹Technical University of Gabrovo, 4 Hadji Dimitar Str., 5300 Gabrovo, Bulgaria
**Corresponding author: pprodanov@tugab.bg*

Abstract

This paper examines the current trends in the development and applicability of two of the most widely used methodologies for calculating the failure rate of electronic components – MIL-HDBK-217F and FIDES. A critical analysis of their fundamental models, correction factors (multiplicative, additive, and mixed), the need for analytical and statistical data, as well as the fields of applicability and validation under different technological and operational conditions, is presented. Based on recent publications (2020–2025), both quantitative and qualitative differences in failure rate estimation are highlighted, along with trends toward the combined use of FIDES and PoF (Physics of Failure) approaches. Conclusions are drawn regarding the validation of the results obtained by applying both methodologies with respect to modern technologies and their potential implementation in the field of power electronics.

Keywords: MIL-HDBK-217F, FIDES, Reliability of Electronic Components, Failure Rate, Physics of Failure (PoF), Power Electronics.

ВЪВЕДЕНИЕ

Надеждността на електронните елементи е основен показател за качеството и експлоатационните показатели на дадена електронна система, особено в области където се изисква непрекъснат производствен процес. За да се направи количествена оценка на надеждността се използват различни методики за анализ, които обединяват статистически и аналитични зависимости между различните фактори, влияещи върху надеждността, респективно вероятността за отказ. Сред

най-разпространените и утвърдени методики са MIL-HDBK-217F и FIDES, които могат да бъдат наречени основни, що се отнася до анализ и изчисление на интензивността на отказите на даден електронен елементи и от там на цялата електронна система. Въпреки широкото им приложение, двата метода имат редица недостатъци и особености при тяхното приложение и са обект на критически анализ от множество автори [1, 2, 3].

Като цел на настоящия доклад се поставя извършването на анализ на тенден-

циите и приложимостта на методики MIL-HDBK-217F и FIDES, като се оцени тяхната ефективност и валидност при прогнозиране на надеждността на електронни елементи и електронни системи.

ИЗЛОЖЕНИЕ

В инженерната практика съществуват редица методологии за изчисление на интензивността на отказите на електронните елементи. Като първоизточник на всички методики може да бъде посочен MIL-HDBK-217, който е разработен още през 60-те години на XX-ти век. Той е дал основа за разработването на още множество методики, част от които запазват неговата методологичност, а други я развиват. Като такива могат да се посочат RDF2000, IEC60300, GJB200 и други [6, 11]. В своята основа, всички методи показват с колко ще се намали времето за експлоатация при увеличаване на експлоатационното натоварване. От тази гледна точка, методиките биват с: мултипликативни корекционни коефициенти (пи-фактори, наричани заради използването на гръцката буква π в редица методологии); с адитивни корекционни коефициент и със смесени модели. През годините, MIL-HDBK-217e бил развиван и допълван, като след направения преглед се установи, че последната редакция е извършена през 1995 г. и има наименование MIL-HDBK-217F W2. От този момент до наши дни редакция на модела не е правена, но въпреки тази методология все още намира приложение и това е видно от публикациите в последните години [4, 5]. През 2004 г. като алтернатива MIL-HDBK-217F беше представена методология FIDES [2, 3 и 6], с последващи редакции през 2009 г. и през 2014 г., като двете методики започнаха да се използват паралелно и да бъдат обект на публикации на множество автори относно тяхната приложимост и възможностите които дават по-отношение на анализа на интензивността на отказите [1, 2, 3, 5 и 9].

Към настоящия момент, методика MIL-HDBK-217F се основава на остарели статистически модели и не отчита физиката на отказите при съвременните и ново появили се електронни елементи, докато FIDES изисква значителен обем входни данни и данни процеса на производство на даден електронен елемент използван за дадено приложение в индустрията.

Методиката MIL-HDBK-217F продължава да се използва широко поради нейните мултипликативни модели, показващи с колко се намалява времето за експлоатация на даден електронен елементи при увеличаване на неговите: температура, работни напрежение, ток или мощност. Освен това се отчита качество на елемента, условия на експлоатация и приложение, което е лесно за приложение и разбиране както от специалисти, така и от начинаещи изследователи в тази област.

Наред с това, MIL-HDBK-217F предлага унифицирана структура, лесното разбиране и множество данни за около 90% от всички електронни елементи използвани в инженерната практика. Основните недостатъци на тази методика произтичат от предположението за константна интензивност на отказите на елементите, използването на остарели статистически данни и липсата на отражение на физическите механизми на отказите в съвременните елементи, материали и начини на изработка и контрол на качеството.

Методика FIDES, от своя страна, предоставя съвременна методология, която включва актуализирани стойности на базовата интензивност на отказите λ , корекционни пи-фактори, отчитащи процесни и технологични особености както при производството, така и при приложението на елементите, а също така и корекционни коефициенти относно „производствената зрялост“ на процеса или как е усвоена дадена технология на производството да нов електронен еле-

менти и от колко години се намира в производство.

Методика FIDES е разработена основно за нуждите на авиационния и отбранителния сектор и според редица автори [6] показва по-добро съответствие с реалните данни за откази на съвременни електронни елементи. Основните ѝ ограничения обаче са свързани с необходимостта от голям обем входни данни, извършване на одит или данни за направен такъв на производствения процес, точно дефиниране на т. нар. „mission profil“ – условия променливи или повтарящи се циклично във времето, нещо което е много по адекватно от константа интензивност на отказите дефинирани при MIL-HDBK-217.

А. Критичен анализ относно приложението и ограничения

За да бъде направен критичен анализ на приложимостта на посочените методики е необходимо да бъдат разгледани публикации по темата през последните години. Разгледани са публикации, индексирани в бази данни Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect и Elsevier за периода 2020–2025 г., с цел да се установят тенденции, експериментални резултати, приложения и ограничения при двете методики [1-14]. На база на този направен литературен обзор може да бъдат направени следните заключения относно приложението и ограниченията:

1. MIL-HDBK-217F е широко използвана заради предлагането на модели за единично разглеждане на елементи с тяхното натоварване (топлинно, електрическо и експлоатационно) - parts-stress и анализ на интензивността на отказите на група елементи - parts-count, което е улесняваща процедура при множество еднотипни елементи, работещи с ниски коефициенти на натоварване. Особеното и при двата метода е използването на остарели данни за откази на електронни елементи, невъзможност за анализ по надеждност на най-новите предлагани електронни елементи на пазара, както и залагането на константна базова интен-

зивност на отказите λ , което поражда получаването на по-ниска надеждност от действителната [1, 2, 3].

2. При FIDES се въвежда съвременна информация за базовата интензивност на отказите λ получена от данни на съвременни производители, както и процесни/технологични пи-фактори и възможност за изчисление по „mission profile“, което доближава получените по тази методика стойности по-близки до реалните, но прави методиката чувствителна към достоверността на входните данни и затруднява анализа при недостатъчност на данните [1, 6 и 7].

Б. Използвана методика и методи на изследване (Applied Methodology and Methods)

Изследването е базирано на сравнителен анализ на двете разглеждани методики – MIL-HDBK-217F и FIDES Guide 2022, извършен чрез систематична оценка и преглед на литературни източници и изследвания в периода 2020 – 2025 г. [1, 2, 3 и 6].

Във втория етап е изготвен табличен сравнителен модел на основните структурни елементи на MIL-HDBK-217F и FIDES Guide, включващ базови λ -стойности, типове корекционни фактори (температура, качество, процес, околна среда и „mission“ профил), както и обхвата на приложимост по групи електронни елементи [1, 3 и 6].

След това са извършени сравнения на прогнозни стойности за интензивността на отказите на основните типови електронни елементи използвани в силовата електроника – силови транзистори (IGBT, MOSFET, SiC), диоди, кондензатори и резистори – при идентични условия на температура, натоварване и време на експлоатация [4, 5, 7 и 9]. В анализа са включени публикувани експериментални и симулационни резултати от реални системи – DC/DC преобразуватели, инверторни и управляващи модули – с цел да се оцени разликата между теоретичните прогнози и реално наблюдаваните откази [3, 4, 5 и 12].

Таблица 1

Група елементи	MIL-HDBK-217F	FIDES 2022	Отношение (MIL/FIDES) източници
Транзистори тип MOSFET (100 V, 10 A)	45 – 60	8 – 12	~5× [3, 4, 5]
Транзистори тип IGBT (600 V, 20 A)	70 – 90	12 – 18	~6× [3, 4]
Мощни Диоди SiC (600 V)	55 – 65	9 – 11	~6× [4, 5]
Кондензатор тип MLCC	30 – 45	20 – 28	~1.5× [1, 8]
Резистор SMD	18 – 25	10 – 15	~1.8× [3, 4]
Оптоелектронни елементи	25 – 30	6 – 9	~4× [4, 5]
Микроконтролери	90 – 110	35 – 45	~2.5× [1, 7]
Силови модули (транзисторни модули за силова електроника)	240 – 300	30 – 50	~7× [3, 5]

Както се вижда от Таблица 1, стойностите на λ , изчислени по MIL-HDBK-217F, са средно (3 – 8) пъти по-високи от тези, получени по FIDES при идентични експлоатационни условия. Разликата е най-изразена при силовите полупроводникови елементи (MOSFET, IGBT, SiC диоди) и интегрални силови модули, където емпиричните модели на MIL-HDBK-217F водят до прекомерно консервативни оценки. При пасивни елементи (резистори, кондензатори) разликите са по-малки, тъй като техните отказови механизми са по-слабо зависими от конкретните технологичните процеси.

За получаване на стойностите в третата колона на таблица 1 е направено съпоставяне на събраните данни от разглежданите и цитирани публикации, като е направено реално сравнение с цитирана литература, от където са взети данните. За всяка група електронни елементи за разгледани два или три независими източника, цитирани в третата колона на таблица 1, като сравнението е извършено чрез наблюдаване и извличане на резултати за различни класове електронни елементи (пасивни, активни, силови модули), при относително еднакви електрически, топлинни и експлоатационни

режими. По този начин е потвърдено, че резултатите на зависят само от самия модел, но и от наличието на информация за производствения и технологичния процес и реални “mission” профили.

При нужда от анализ на новите структури, като SiC и GaN транзистори, както и интегрирани силови модули с висока степен на интеграция, се вижда, че класическите емпирични модели на MIL-HDBK-217F не отразяват реалните механизми на отказ, тъй като в неговите модели не са отразени адекватно енергиите на активация на механизмите за отказ и работата при по-високи температури на структурите. Тези силови елементи работят със значително по-висока температура на прехода, като имат различни термомеханична и термодинамична характеристики обуславящи механизмите на отказ и не могат да отразят реалните механизми водещи до отказ причинен от процеси като електромиграция и термична умора на материалите в SiC и GaN структурите.

В това отношение, методика FIDES показва по-добра адаптивност, тъй като позволява дефиниране на индивидуални „mission profiles“ и пи-фактори, които могат да бъдат адаптирани за тези силови елементи. Някои изследвания (представени в [1, 4 и 8]) предлагат емпирични адаптирани емпирични зависимости за интензивността на отказите за тези силови структури, интегрирани във FIDES, което я прави по-адаптивна в този аспект на приложение.

В таблица 2 е направено обобщение на основните характеристики на разглежданите две методологии MIL-HDBK-217F и FIDES. От направената класификация могат да се обобщат следното: методика MIL-HDBK-217F се характеризира с проста и унифицирана структура, което я прави лесна за прилагане, но тя не отразява реалните физически механизми на деградация и не отчита фактори, свързани с производствения процес.

Таблица 2

Критерий [източници]	MIL-HDBK-217F	FIDES Guide 2022
Базов модел [1, 2 и 6]	Емпиричен, parts-count / parts-stress	Хибриден, статистически + процесни фактори
Тип λ - моделиране [1, 3 и 4]	Константна λ	Варираща λ според мисия и процес
Отразяване на физика на отказите (PoF) [2, 6 и 11]	Не	Частично (частично включване на стресови фактори)
Входни данни [1, 5, 6 и 13]	Минимални, справочни	Обширни – включват данни за производствен и технологичен про- цес
Сравнителна достоверност [3, 4, 5 и 14]	Завишени оценки	По-реалистични, но по-чувствителни към входни данни

При методика FIDES особеностите се изразяват в използването на хибриден модел, който комбинира статистически зависимости с процесно ориентирани множители (П_РМ и П_Process) и включването на параметри на околната среда, но изисква и значително повече входни данни, като е чувствителен към тяхната точност.

В таблица 3 е направено сравнение по отношение на факторите на околна среда и тяхното изменение. Засегнати са температура, влажност и циклична промяна на температурата, като е показана степента на влияние. Резултатите показват, че методика FIDES е по-чувствителна към промени в температурата и натоварването, което се дължи на включването на Arrhenius и Peck модели за деградация на структурите, описващи фактори като температура и влажност на въздуха. Тази повишена чувствителност позволява по-точно моделиране на стойностите отразяващи реалните експлоатационни условия, но изисква прецизно установяване и мониторинг на входните параметри.

Таблица 3

Фактор / Изменение	MIL-HDBK-217F	FIDES Guide 2022	Коментар/ източници
Температура +20 °C	1.5	2.3	FIDES реагира по-силно, поради включване на Arrhenius и Peck модели. [3, 4, 8]
Температура -20 °C	0.7	0.5	При ниски температури FIDES предвижда по-рязко намаление на λ . [4, 7 и 14]
Натоварване +20 %	1.3	1.6	Влиянието на напрежението и тока е по-силно в FIDES. [3, 4]
Натоварване -20 %	0.8	0.7	И двете методики показват симетричен спад, но FIDES е по-чувствителна. [3, 4 и 14]
Промяна на мисионен профил	1.0	2.5	FIDES използва отделни фактори за среда и „mission profile”. [1, 6]
Влажност +10 % RH	1.1	1.3	Само FIDES отчита микрокорозионни ефекти в определени групи елементи. [2, 6]

От гледна точка на практическата приложимост (Таблица 4), MIL-HDBK-217F продължава да бъде основна методология в отбранителни и нормативно регулирани проекти, докато FIDES се налага като стандарт при силова електроника, роботизирани системи, астронавтика и космически системи където са налични процесни данни и “mission” профили. Анализът показва, че FIDES е по-подходяща за съвременни приложения, при които се изисква оценка на надеждността на база физически модели, докато MIL-HDBK-217F запазва ролята си като инструмент за бърза оценка, обучение и нормативно сравнение на база получени статистически данни.

Таблица 4

Област на приложение/ източници	MIL-HDBK-217F	FIDES Guide 2022
Отбранителни и военни системи [6, 11, 12]	✓ (основна)	✓ (допълнителна верификация)
Авиационна техника [3, 5, 7, 9]	✓ (референтен)	✓✓ (основен)
Космически апарати [5, 6]	—	✓✓✓ (основен стандарт ESA)
Силова електроника и индустриални системи [3, 4, 8 и 14]	✓	✓✓
Роботизирани системи и сервозадвижвания [4, 7 и 8]	✓ (базов)	✓✓ (разширен)
Автомобилна индустрия [4, 8 и 10]	✓	✓✓
Академични изследвания и обучение [1, 8]	✓✓	✓✓

Комбинираното използване на двете методики, посредством което да се направи паралелно изчисление и сравнение на интензивността на отказите, позволява да се определят и зададат доверителни граници на прогнозираната надеждност и интензивност на отказите и да се оцени реалната неопределеност на надеждността на модела и се определи степента на приложимост за конкретната електронна апаратура.

Комбинираното прилагане на методики FIDES и метода „PoF“ (Physics of Failure) е възможно да бъде направено и приложено при случаите, когато стандартните статистически модели не осигуряват достатъчна точност или не отразяват реалните физически механизми на отказите (например температурно натоварване или натоварване с циклична промяна на температурата. Това се отнася основно за нови технологии и материали – като SiC и GaN силови елементи, интегрални силови модули за силовата електроника (задвижвания и преобразуватели), както и електромеханични системи и спойки в печатните платки.

При всички изброени няма налична статистическа база, както и достатъчни данни за наблюдавани откази и при които деградацията (стареенето на структурите) се определя от сложни термоелектрични, термохимични и термодинамични процеси. В такива случаи, методика FIDES предоставя модели за емпирично и вероятно моделиране, докато метода PoF добавя физически обоснована връзка между натоварващи (т. нар. „стресовите“ фактори и механизми, водещи до отказ. Комбинацията от двата подхода позволява постигане на по-реалистична и по-лесна за прогнозиране и верифициране оценка на надеждността, особено в силовата електроника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящото изследване е извършен критичен анализ относно приложимостта на двете най-широко използвани методики за определяне на интензивността на отказите на електронните елементи – MIL-HDBK-217F и FIDES. Установено е наличието на съществени различия, както по отношение на концептуалния модел, така и по точността на прогнозните стойности. Методиката FIDES показва по-добро съответствие с реалните експериментални данни, благодарение на включването на технологични и процесни фактори, както и на физически модели на деградация, но изисква по-голям обем информация и висока степен на достоверност на използваните данни.

Основното предимство на методика MIL-HDBK-217F остава утвърдената и широкообхватна база данни за основните електронни елементи, обобщените корекционни коефициенти, възможността за адаптивност при използване на „външни“ данни, особено при системи с ограничена наличност на входни данни. Освен това, методика MIL-HDBK-217F може да се разглежда като полезна при анализ по надеждност в ранни етапи на проектиране и получаване на бърза и достоверна оценки при стандартни изчисления по надеждност.

Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

Благодарности: Авторите изказват своята благодарност към рецензентите за насоките и критичните бележки при оформянето на настоящия доклад, както и изказват благодарност към проект BG16RFPR002-1.014-0005.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Gaonkar, C. O'Connor, and M. Pecht, "Assessment of the FIDES Guide 2022: Electrical, Electronic and Electromechanical Reliability Prediction Methodology", *Microelectronics and Reliability Reports*, vol. 3, 2023, pp. 1–9, doi: 10.1016/j.mrr.2023.100043.
- [2] NASA/NEPP & CALCE, „Evaluation and Comparison of FIDES and PoF-Based EEE Parts Reliability Prediction Methods“, NASA Technical Report, 2020.
- [3] M. Ahmadi, A. Boeren, and D. van Harten, "Comparison of Military Handbook and the FIDES Methodology for Failure Rate Estimation of Modular Multilevel Converters", Delft University of Technology Technical Report, 2023.
- [4] Adinolfi G., Candeloro A., Perrone F., "Innovative Method for Reliability Assessment of Power Converters", *Electronics (MDPI)*, vol. 13, no. 7, 2024, pp. 1–17, doi: 10.3390/electronics13071429.
- [5] HIREC/ESA RAMS 2024, "Reliability Prediction of EEE Parts for Space Applications Using FIDES and MIL-HDBK-217", ESA Conference Proceedings, 2024.
- [6] FIDES Group, FIDES Guide 2022 Edition A: Reliability Prediction and Confidence Analysis for Electronic Components, Paris: Groupe des industries électroniques de défense, 2022.
- [7] Kenichi S., Takashi Y., Toru Y., Yasuhiro F., Tomoaki N., „Efforts to improve spacecraft reliability prediction method to evaluate the probability of successful disposal in ISO 24113:2019“, *Journal of Space Safety Engineering*, Vol. 9, Issue 4, 2022, pp. 656-661, ISSN 2468-8967, doi.org/10.1016/j.jsse.2022.10.003.
- [8] D. Navamani and S. Raghavan, "Two Decades of Statistical Approaches in Reliability Prediction of Power Converters," *Microelectronics and Reliability Reports*, vol. 4, 2024, pp. 112–128, doi: 10.1016/j.mrr.2024.100073.
- [9] Prodanov P., D. Dankov, "Comparison of Failure Rates and Reliability of Power Semiconductors in Power Electronic Devices Using Methodologies MIL-HDBK-217F and FIDES", 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 1-4 July 2021, Sofia, Bulgaria, pp. 1-5, ISBN:978-1-6654-1186-8, doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503026.
- [10] M. Sandelić, T. Batić, M. Petrović, "Reliability Aspects in Microgrid Design and Planning", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 157, 2022, art. 112077, doi: 10.1016/j.rser.2021.112077.
- [11] FIDES Consortium, "Methodology Based on Physics of Failure (PoF)," Official FIDES Technical Note, 2023.
- [12] Jang I., Chang Hwoi Kim, "Prediction of Remaining Useful Life (RUL) of Electronic Components in the POSAFE-Q PLC Platform under NPP Dynamic Stress Conditions", *Nuclear Engineering and Technology*, Volume 56, Issue 5, 2024, Pages 1863-1873, ISSN 1738-5733, https://doi.org/10.1016/j.net.2023.12.046.
- [13] D. Butnicu, R. Cismaru, A. Ioniță, "MTBF-PoL Reliability Evaluation and Comparison Using SN 29500 vs MIL-HDBK," *Electronics (MDPI)*, vol. 14, no. 3, 2025.
- [14] R. Darla, C. Annamalai, "A novel reliability prediction with input transients for an LLC converter" *Frontiers in Energy Research*, Vol. 10, 2022, doi.org/10.3389/fenrg.2022.912710.