



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
МАШИННО – ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ**

маг. инж. Константин Христов Камберов

**МОДЕЛИРАНЕ И ПРОГНОЗИРАНЕ НА
НАДЕЖДНОСТНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ В ЕТАПА НА
ПРОЕКТИРАНЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

**НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНАТА И
НАУЧНА СТЕПЕН**

“ДОКТОР”

Професионално
направление:

5.1 “Машинно инженерство”

Научна специалност:

**“Автоматизация на инженерния труд и
системи за автоматизирано проектиране”**

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Георги Димитров Тодоров

СОФИЯ, 2011

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
МАШИННО – ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ
Катедра: “Технология на машиностроенето и металорежещи машини”

маг. инж. Константин Христов Камберов

МОДЕЛИРАНЕ И ПРОГНОЗИРАНЕ НА НАДЕЖДНОСТНИТЕ
ПОКАЗАТЕЛИ В ЕТАПА НА ПРОЕКТИРАНЕ

АВТОРЕФЕРАТ

НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНАТА И НАУЧНА СТЕПЕН
“ДОКТОР”

Професионално
направление:

5.1 “Машинно инженерство”

Научна специалност:

**“Автоматизация на инженерния труд и
системи за автоматизирано проектиране”**

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Георги Димитров Тодоров

Рецензенти:

проф. д.т.н. инж. Георги Тодоров Попов

чл. кор. проф. д.т.н. инж. Венелин Стоянов Живков

СОФИЯ, 2011

Дисертационния труд е обсъден и насочен за защита от катедра „Технология на машиностроенето и металоурежещи машини“ при Технически Университет – София на заседание на катедрен съвет, състоял се на 16.05.2011 г.

Дисертантът работи като асистент в катедра „Технология на машиностроенето и металоурежещи машини“ при Технически Университет – София, където е разработен дисертационния труд.

Изследванията от дисертационния труд са извършени в лаборатория „CAD/CAM/CAE в Индустрията“ при ТУ-София, както и в изпитателна лаборатория на СПАРКИ ЕЛТОС АД, гр. Ловеч.

Номерата на формулите, фигурите, таблиците и цитираната литература в автореферата съответстват на тези в дисертацията.

Дисертационният труд е в общ обем от 173 страници от които 161 страници основен текст, съдържащ 59 фигури, 8 таблици и списък на използваните 142 литературни източници и 46 страници в 2 приложения.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 27.09.2011 г. от 16 ч. в зала 3201 на Технически Университет – София на открито заседание на журито, определено със Заповед № 1500/03.06.2011 г. на Ректора на ТУ-София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Машинно-технологичен факултет на Технически Университет – София, стая 3230.

Автор: Константин Христов Камберов

Заглавие: Моделиране и прогнозиране на надеждностните показатели в етапа на проектиране

Тираж: 50 бр.

Печатна база на ТУ-София

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Дисертационната работа е в областта на моделирането и прогнозирането на надеждностните показатели на машиностроителните изделия на етапа на тяхното проектиране, чрез прилагане на технологии от виртуалното прототипиране. Създаден е общ функционален структурно-надеждностен модел на машиностроително изделие на база виртуален прототип, с отчитане взаимните въздействия на елементите му. Дефиниран е системен подход за моделиране и оценяване надеждностните показатели на компонентите на машиностроителни изделия в етапа на проектиране. Изготвена е методика за определяне входните въздействия, ползвани за надеждностният модел, основан на симулиране на физиката на отказите им. Направена е класификация на входните въздействия и на самите механични компоненти, според надеждностните им модели, изградени на базата на виртуални прототипи. Създадени са два подхода, ползващи пряко описаните функционален структурно-надеждностен модел, системен подход и методика - за изготвяне на анализ на отказите, техните ефекти и критичност (FMECA) и за извършване на функционално-стойностен анализ на етап на проектиране на изделието. Приложени са функционалният структурно-надеждностен модел, системният подход и методиката за определяне на входните въздействия при индустриални проекти на ръчни електроинструменти, редуктори и компоненти за подемна техника, металорежещи машини и др. Разработена е методика за определителни надеждностни изпитания на ръчни електроинструменти – перфоратори, както и необходимата екипировка за провеждането им.

АКТУАЛНОСТ НА ТЕМАТА

Дисертационният труд е насочен към областта на анализ и определяне надеждностните параметри на машиностроителни изделия, при използване на съвременни технологии за виртуално прототипиране.

Все повече глобализиращата се световна икономика определя засилена конкуренцията на съвременния пазар. Това налага развитието на нови продукти да се осъществява във все по-кратки срокове, при запазено качество и намалена цена. Същевременно, се увеличават изискванията към качествените показатели на изделието, както и към неговата надеждност. Изразено чрез ред нови стандарти, основно в области от конвенционалната техника, оценката на надеждността на едно изделие вече не е приоритет на високотехнологични области като аерокосмическата, военната и автомобилната индустрии. Все повече продукти биват подлагани на анализиране и определяне техните надеждностни показатели във възможно най-ранен етап, с оглед минимизиране на разходите за развитие и внедряване. Това става възможно главно поради развитието на технологиите за виртуално прототипиране, както и на инструментите за извършване на надеждностни анализи – главно в областта на машиностроителните изделия. Възможностите, които дава виртуалното прототипиране, съчетани с познаването на физиката на възникване на отказите, създават предпоставки за достатъчно точно прогнозиране на надеждностните показатели в най-ранните стадии на развитие на машиностроителни изделия, което доскоро беше широко прилагано основно в електронни и електротехнически продукти.

НАУЧНА НОВОСТ

1. Направен е детайлен анализ и съпоставка на възможностите за приложение на виртуални прототипи за моделиране и оценяване на надеждностни показатели на машиностроителни изделия, въз основа на което е създаден системен подход;
2. Създаден е функционален структурно-надеждностен модел на машиностроително изделие на база виртуален прототип, с отчитане взаимните въздействия на елементите му;
3. Разработена е методика за определяне входните въздействия за надеждностен модел на машиностроително изделие, използваща симулиране на физиката на отказите;
4. Предложена е класификация на входните въздействия и на самите механични компоненти, според надеждностните им модели;
5. Създадени са подход за анализ на отказите, техните ефекти и критичност, както и подход за функционално-стойностен анализ при използване на функционален структурно-надеждностен модел.

ПРАКТИЧЕСКА ПРИЛОЖИМОСТ

1. Практически са приложени функционалният структурно-надеждностен модел и системният подход за моделиране и оценяване на надеждностните показатели главен превод на универсална стругова машина – производство на фирма ЗГММ-Перник АД;
2. Развитите системен подход и методика за определяне на входните въздействия са използвани при реализирането на редица индустриални проекти в областта на ръчни електроинструменти;
3. Изготвената методика за определяне входните въздействия, ползвани за надеждностният модел, основан на симулиране на физиката на отказите им при използване на виртуални прототипи, е внедрена във фирма Siguren Ingenierie, Франция;
4. Създадена и внедрена в практиката на фирма СПАРКИ ЕЛТОС АД, гр. Ловеч, е методика за определителни надеждностни изпитания на ръчни електроинструменти – перфоратори, както и необходимата екипировка за провеждането им.

РЕАЛИЗИРАНЕ НА РАБОТАТА

Изследванията по дисертацията са извършени в лаборатория "CAD/CAM/CAE в индустрията" към МТФ на ТУ-София, като част от изследванията са осъществени при работата по съвместни индустриални проекти с фирмите ЗГММ-Перник АД, СПАРКИ ЕЛТОС АД, МАНА GmBh, Германия и Siguren Ingenierie, Франция. Резултатите от изследванията са внедрени и се ползват при развитието на нови продукти на СПАРКИ ЕЛТОС АД, както и в проекти на Siguren Ingenierie, Франция.

ОДОБРЯВАНЕ НА РАБОТАТА

Дисертационната работа е докладвана на частично и цялостно пред катедра "Технология на машиностроенето и металоорежещите машини".

ПУБЛИКУВАНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Съществените резултати получени при разработване на дисертацията са докладвани на следните конференции и семинари:

- Международна конференция Моделиране и Изследване на Жизнения Цикъл на Изделията FEATS, Валансиен, Франция, 2001г.
 - Международна конференция „Техника на задвижванията“, Варна, 2003г.
 - Международна конференция Автоматика и информатика, София, 2008г.
 - 26-та Международна научна конференция МТФ, Созопол, 2010г.
- Част от изследвания и получените резултати са издадени в 8 публикации.

СТРУКТУРА И ОБЕМ

Представеният дисертационен труд е в обем от 173 страници и 2 приложения с обем 46 страници. Работата е разделена на 6 глави, в които се изпълняват формулираните задачи. Съдържа 59 фигури и 8 таблици. Приложен е списък с използваните 142 литературни източника.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Глава1. ЛИТЕРАТУРНО ПРОУЧВАНЕ / СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Отказите в машините, съоръженията и производствените процеси пряко се изразяват в загуба на време и средства. Практическата приложимост на оценката на надеждностните показатели от тази гледна точка, представляват средство за контрол и преодвръщане на отказите за намаляване на стойността на притежаване и подобряване функционирането чрез увеличаване на финансовата ефективност при допустими нива на надеждност.



Фиг. 1.1 Методи за определяне надеждностните показатели

Проведеното литературно проучване даде възможност изложените в литературата описани методи и подходи да бъдат класифицирани съгласно фиг. 1.1. Разгледани са подробно различните методи, като е акцентирано основно върху изчислителните методи, в частност – систематични.

Систематичните методи (детерминистични) се основават главно на познаване на физиката на възникването на отказите. Те целят да пресъздат изчислително процесите, водещи до отказ, при което се ползва виртуален прототип. Анализирани и описани са различните процеси на възникване на отказите при машиностроителните изделия, както и

възможните описания чрез съответни модели – емпирични или симулационни. Посочени са предимствата и недостатъците на тези модели.

Направено е проучване и на съществуващият инструментариум – програмни продукти за реализиране задачите на изчислителните методи за определяне надеждностните параметри. Отчетено е че повечето програмни продукти са ориентирани към определяне надеждностните параметри на електрокомпоненти, но в последно време все повече се налагат и модули за оценка на механични изделия. Всички софтуерни решения ползват виртуален прототип, като позволяват и съставянето на статистически модели за компоненти и изделия.

Разгледани са възможностите за приложение на виртуални прототипи при изследване физиката на възникване на отказите, главно по отношение на използването на дискретизирани модели. Направен е преглед на съществуващите числени методи за симулиране на физиката на възникване на отказ, както и техните особености и възможности – анализирани и обобщени в литературното проучване. Различните методи са съотнесени по приложимост за решаването на различни видове физични задачи. Накратко са описани и съвременните средства, базирани на числените методи, позволяващи решаването на голяма част от инженерните проблеми.

Проведеното литературно проучване позволи да се обобщи информацията за наличните методи и подходи за оценка на типовете отказ, риска от възникването им, тяхната критичност, ремонтпригодността и оценка на стойността на изделието в жизнения му цикъл. Основните типове методики, включени в разглеждането и основани на ползването на надеждностни анализи и техните резултати, са: оценка на ремонтпригодността и сервизирането на изделието; анализ на отказите и техните ефекти; анализ на структурата на отказите; функционално-стойностен анализ; определяне стойността на изделието за жизнения му цикъл (Life Cycle Cost Analysis). Разгледана е тяхната приложимост на етап проектиране на машиностроителни изделия, както и ефективността от използването на тези съществуващи съвременни технологии.

1.1. Изводи

- 1. Експерименталните методи за определяне на надеждностните показатели на изделия са добре развити, но се изисква наличието на адекватен физически образец, върху които да бъдат проведени съответните изпитвания, което ги прави слабо приложими на ранните етапи от жизнения цикъл на изделието (концепиране, конструиране);*
- 2. Изчислителните прогностични методи се базират основно на известни данни за компонентите на изделието (от аналози, или библиотеки параметрични модели) и се основават на тяхната интерпретация. Те не са подходящи за общия случай на машиностроително изделие, подложено на специфични работни условия, и имащо свое специфично приложение;*
- 3. От изчислителните симулационни методи, систематичните (детерминистични) са тези, които разглеждат изделието основно в номиналното му работно състояние, а в някои случаи и за екстремни условия. Те са подходящи за определянето на надеждностните му параметри на етапите на концепиране, проектиране и конструиране;*
- 4. В рамките на извършеното литературно проучване не беше намерена приложима методика за изграждане на структурно-надеждностен функционален модел на машиностроителни изделия;*

5. Изчислителните систематични методи при анализиране на изделия и компоненти от електротехниката и електрониката са силно развити поради естеството на изследваните обекти. Съществува богат инструментариум за съставяне и изследване на надеждностни модели, главно в областта на електротехниката, а също и при добре дефинирани входни данни и модели на откази за машиностроителни компоненти;
6. Същевременно, не беше открит системен подход за моделиране и оценяване надеждностните показатели на специфични компоненти на машиностроителни изделия, за разлика от стандартизирани компоненти (лагери, зъбни предавки и др.);
7. Пряка съпоставка между определените при използване на моделирани надеждностни показатели в етапа на проектиране и получените впоследствие експериментални изпитвания данни не бе намерена в разгледаната литература;
8. Основата на изчислителното определяне на надеждностните параметри се гради на познаването и оценяването на физиката на възникването на отказите. При нейната оценка съществуват ред развити емпирични подходи, които обаче не винаги са приложими поради недостатъчни входни параметри;
9. Разгледаните симулационни методи, базирани на виртуален прототип, и развитието им в последните години правят възможно използването им за определяне входни параметри за последващо създаване на надеждностен модел;
10. В разгледаните литературни източници липсва системен и приложим симулационен подход, които да дефинира входните параметри при отчитане на взаимните въздействия на работните натоварвания, при отчитане физиката за възникване на отказите и ползване на виртуален прототип.

1.2. Цел и задачи на разработката

Въз основа на направеният анализ на състоянието на разглежданият проблем и на така описаните по-горе изводи, е формулирана следната цел на дисертационната работа:

ДА СЕ СЪЗДАДЕ СИСТЕМЕН ПОДХОД ЗА МОДЕЛИРАНЕ И ПРОГНОЗИРАНЕ НА НАДЕЖДНОСТНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА МАШИНОСТРОИТЕЛНО ИЗДЕЛИЕ В ЕТАПА НА ПРОЕКТИРАНЕ НА ОСНОВАТА НА ВИРТУАЛЕН ПРОТОТИП.

От така определената цел произтичат следните основни задачи:

Задача #1: Да се разработи функционален структурно-надеждностен модел на машиностроително изделие на база виртуален прототип, с отчитане взаимните въздействия на елементите му;

Задача #2: Да се създаде системен подход за моделиране и оценяване надеждностните показатели на компонентите на машиностроителни изделия в етапа на проектиране;

Задача #3: Да се създаде методика за определяне входните въздействия (включително дефиниране работните натоварвания) на надеждностният модел, основан на физиката на отказите на отделните елементи;

Задача #4: Да се разработи интегрален подход за определяне на функционалните, стойностни и надеждностни параметри;

Задача #5: Да се апробира създаденият системен подход чрез надеждностни модели на примерни реализации на машиностроителни изделия;

Задача #6: Да се проведат експериментални определителни изпитвания на надеждностните показатели на примерните реализации;

Задача #7: *Да се верифицира, валидира и оцени адекватността и приложимостта на създаденият системен подход за моделиране и оценяване надеждностните показатели чрез сравнителен анализ с получените резултати от проведените експериментални изпитвания.*

Глава 2. Функционален структурно-надеждностен модел на база на виртуален прототип

Основен обект в този процес е детерминистичният модел, който се ползва за определяне на тези показатели, като той трябва да е функционално свързан, структурно ориентиран и да позволява определянето на основни надеждностни параметри на машиностроителните изделия. Това е трудно реализируемо и поради това не е задълбочено разработено.

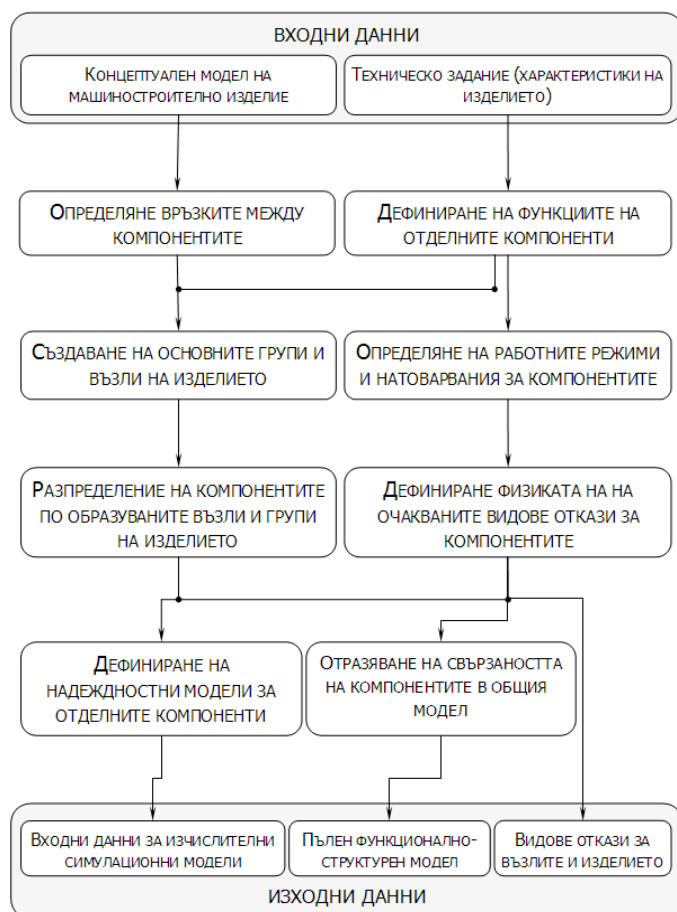
2.1. Особености при моделирането на сложни системи

Прогнозирането на поведението на сложни системи се характеризира с това, че се решава вероятностна задача, като поведението на сложната система в бъдещето се определя с някаква степен на достоверност и вероятно се оценява състоянието, в което тя би се намирала след определен период от време при различни условия на експлоатация. За да може да се прогнозира поведението на една сложна система, е необходимо да се използват методите на математическото моделиране. При изграждането на модела се използват аналитични зависимости, статистическа информация, експертни оценки, методите на аналогията, на логическия анализ и др. Особено важен момент при създаването на математическия модел е проверката на неговата адекватност. Моделът за определяне на надеждностните параметри следва да се структурира съобразно функционалното предназначение на изследваното изделие, неговите елементи и възли, и характерните особености на извършвания анализ на надеждност. За целта е необходимо да се изгради надеждностна блокова диаграма и да се дефинират отделните елементи на изделието, съгласно техните определени натоварвания и условия на работа.

2.2. Последователност на изграждане на функционален структурно-надеждностен модел

Изграждането на функционалния структурно-надеждностен модел първоначално започва като блокова диаграма, която отразява структурата на изделието и функционалните връзки между отделните възли и компоненти. Блоквата диаграма може да бъде от различно ниво на детайлност в зависимост от сложността и необходимостта от подробен анализ на изследваното машиностроително изделие. Най-общо, тя включва основните възли и техните компоненти. Друг съществен елемент е познаването на изчислителните методи за определяне на надеждностни показатели, което спомага за по-коректно обособяване звената на изделието, понякога и различаващо се от заложената в техническите изходни данни структура.

Целият процес на изграждане на функционалния структурно-надеждностен модел на едно машиностроително изделие може да се представи като последователност от отделни задачи и дейности по реализирането им. Предложена е последователност, включваща оформени отделни етапи по изграждане на модела, основана на реализирани в практиката надеждностни анализи и показана на фигура 2.1.



Фиг. 2.1 Етапи на изграждане на функционално-структурен надеждностен модел

2.2.1. Входни данни при съставяне на надеждностния модел

Съществена част от ползваните за входни данни е **концептуалният модел на моделираното машиностроително изделие**. Концептуалният модел съответства на комбинация от параметри и изисквания, моделирани във вид на точна концепция, породено от пазарна нужда или нови идеи. Той определя в голяма степен компонентите на изделието – техният вид, брой и начални параметри. В съвременната практика концептуалният модел най-често се използва във вид на обобщен *виртуален прототип*.

Техническото задание от своя страна определя изискваните показатели и характеристики на изделието, които определят и неговите функции, определят работните режими и натоварвания на съответните компоненти. Така, още с техническото задание се предопределят бъдещите основни възли на машината и най-вече – режимите при които те се очаква да работят. Впоследствие, тези режими рефлектират като натоварвания и дефинират потенциалните откази на компонентите и физиката на тяхното възникване.

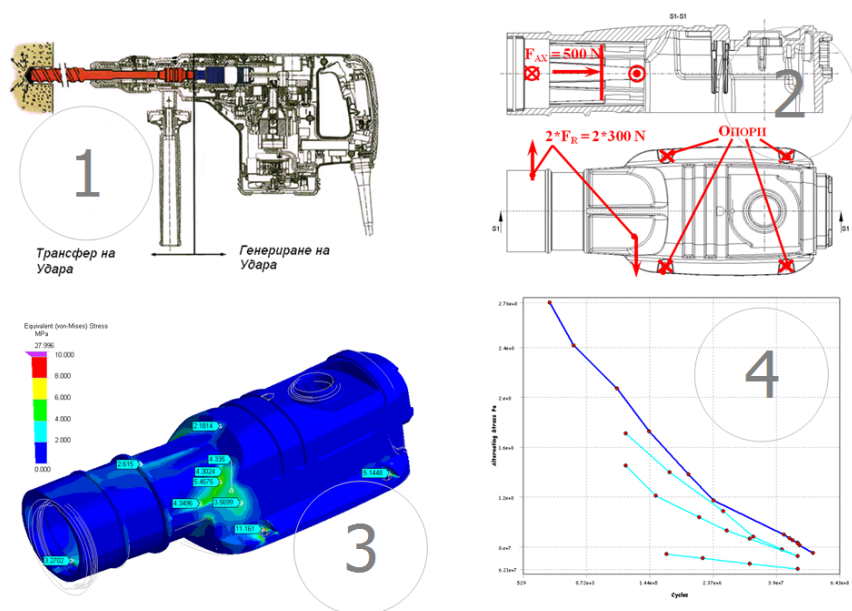
2.2.2. Дефиниране на възли, разпределение на компонентите и връзки между тях

Следващата стъпка по изграждането на надеждностния модел следва да бъде определянето на възлите и съставлящите ги компоненти. Възлите до голяма степен са предопределени от концептуалния модел на изделието, а определянето на съставлящите ги компоненти се влияе и от записаните в техническото задание изисквания към тях. Необходимите функции, предопределят връзките между компонентите и групирането им по

възли. Това помага да се състави първоначална надеждностна блок-схема на изделието, която е възможно да се отличава от структурата му, определена в разработената конструктивна документация. Тази изходна блок-схема трябва изцяло да отговаря на функционалността на изделието, а и на взаимосвързаността на отказите на различните компоненти. Последователността или паралелността на свързване на възлите и компонентите ще имат пряко отражение във видовете откази на изделието и вероятността за поява на всеки един от тях. На практика в тази стъпка от изграждането на надеждностният модел се залага „сценария“ на появата на отказите.

2.2.3. Работни режими и натоварвания, функции на компонентите и физика на възникване на откази

Различните условия на експлоатация и натоварване на изделието могат да доведат до различни модели на отказ дори само за един компонент от изделието. Видовете отказ е възможно да бъдат определени на база аналогия със съществуващи елементи или при анализ на съчетанието работно натоварване/характеристики на компонента.



Фиг. 2.4 Пример: Последователност на определяне физика на отказ за компонент

Важно е да се отбележи че подходът следва да бъде от компонентно ниво по посока на възлите, тъй като това улеснява до голяма степен формирането на видовете откази по възли. Така определените откази по компоненти от своя страна служат за основа при определяне отказите на възлите в които те участват, при отчитане на взаимното влияние на компонентите. Този подход е приложим при предварителна яснота за броя и вида компоненти на възлите, като е илюстриран чрез пример, основан на определянето на надеждностните параметри на редукторна кутия за електроинструмент – фиг.2.4. Изхождайки от работните условия (1), са определени входните въздействия / натоварванията (2), приложени върху виртуален прототип на изделието – в частност числен модел – за симулиране физиката на възникване на отказ. Така са определени резултантните якостни напрежения (3), които съпоставени със съответните криви на умора на материала (4), дават резултат в определен ресурс на разглеждания елемент.

2.2.4. Надеждностни модели на компонентите и взаимосвързаност

Това е съществен етап и съдържа изграждането на отделни математични модели, за описание на вида отказ за компонентите. Според определянето на данните за моделите, те биват основно два вида:

- **Прогностични изчислителни методи:** на основата на *съществуващи експлоатационни данни или данни от тестове* на същите/сходни елементи при същите/сходни работни условия. В този случай надеждностните параметри се пресмятат чрез статистически анализ на информацията за тяхното поведение;
- **Симулационни методи:** в частност при детерминистичните методи - чрез *анализиране на физиката на появата на отказ* и моделирането ѝ:
 - Изграждат се изчислителни модели, отчитащи характера на очаквания отказ на елемента;
 - Пресмятат се работните условия и натоварвания, които се задават като входни данни в надеждностния модел.

Анализът на взаимосвързаността на компонентите позволява и да се извърши анализ на възможните откази на изделието и по-точно начините, по които се стига до тях. Ползването и отчитането на разгледаните по-горе подходи, особености и връзки трябва да даде резултат в коректни надеждностни модели на компонентите на изследваното изделие. Тези надеждностни модели съответно се включват в общия модел на изделието, съобразно свързаността си.

2.2.5. Краен вид на функционалният структурно-надеждностен модел. Резултати

Крайната цел на функционалният структурно-надеждностен модел за едно машиностроително изделие е, да се оценят неговите надеждностни параметри, при отчитане на взаимосвързаността, характера и режимите на натоварване и структурата на компонентите на изделието. Компонентите на машината са групирани по възли, като функционалната и конструктивна връзка между отделните възли е отчетена в надеждностна блокова диаграма.

2.3. Възможности за приложение на съставения функционален структурно-надеждностен модел

Функционалният структурно-надеждностен модел е изчислителен модел, основан върху статистически или пресметнати според физичния модел на отказ надеждностни данни за компонентите на изследваното машиностроително изделие. Той намира приложение за:

1. Определяне надеждностните показатели на изделието посредством надеждностен анализ;
2. Улеснена и бърза оптимизация по надеждност на изделието чрез промени в модела, при използване на виртуалния прототип;
3. Намаляване разходите по етапите от жизнения цикъл на изделието като внедряване, производство и експлоатация;
4. Оптимизиране на себестойността на изделието – моделът може да бъде изграден непосредствено след съставяне на концептуалния модел, и резултатите от него биха позволили да се подобри неговата структура и/или да се подберат достатъчни като надеждност компоненти;

Съставеният надеждностен модел може да се ползва за основа при последващо пресмятане на оптимизирания вариант.

2.4. Изводи

- 1. Анализирани са машиностроителните изделия, с оглед на представянето им чрез надеждностни модели, като е акцентирано върху особеностите при моделиране на сложни системи във виртуална среда;*
- 2. Разработен е подход за създаване на функционален структурно-надеждностен модел на изделието – основа на изчислително определяне на надеждностните параметри на машиностроителни изделия на етапа на проектирането им;*
- 3. Подробно са дефинирани етапите при изграждането на модела на база виртуален прототип, с отчитане взаимните въздействия на елементите му;*
- 4. Анализирана е приложимостта на разработения функционален структурно-надеждностен модел на машиностроително изделие в етапа на проектирането му;*
- 5. Етапите по изграждането на функционален структурно-надеждностен модел са демонстрирани посредством примери от практиката – надеждностни анализи на проектирани ръчни електроинструменти, подемна техника, периферни компютърни устройства.*

Глава 3. СИСТЕМЕН ПОДХОД ЗА МОДЕЛИРАНЕ И ОЦЕНЯВАНЕ НАДЕЖДНОСТНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА КОМПОНЕНТИТЕ В ЕТАПА НА ПРОЕКТИРАНЕ. МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ ВХОДНИТЕ ВЪЗДЕЙСТВИЯ НА НАДЕЖДНОСТНИЯ МОДЕЛ

Сравнително точна оценка на надеждностните параметри на изделието е възможно да се състави при познаване на физиката на възникването на потенциалните му откази. Пряко съответствие между методика/модел и конкретен тип компонент може да се състави при наличие на добра класификация на компонентите и техните откази.

3.1. Класификация на компонентите на машиностроителните изделия според надеждностните им модели

Механичните компоненти могат да се класифицират по множество признаци, основно по техните функции или процес на трансформация на енергия. Такива класификации обаче или изключват статистическата обработка на сервизни данни, като се реферират само към моделиране процеса на отказ, или се основават само на статистически подход при определяне надеждностните показатели. Друг аспект е че тези класификации не определят дефинитивно подходящият надеждностен модел за конкретния компонент.

Прегледа на съществуващите класификации на механични компоненти, разгледаният в предходната глава системен функционално-структурен надеждностен модел и практическият опит при анализиране на надеждностни модели на машиностроителни изделия, дава възможност да се определи и развие нова тяхна класификация. Предложената класификация е показана на фигура 3.2 по-долу.



Фиг. 3.2 Класификация на надеждностните модели за механични компоненти според приложимостта на виртуално прототипиране

3.2. Системен подход за моделиране и оценяване надеждностните показатели

Един системен подход би дал възможност бързо и сравнително точно да се дефинират надеждностни параметри на машиностроителни компоненти на етапа на проектиране на изделието. В следствие на задълбочен анализ на известните практики при решаване на този тип задачи е изведен показаният на фигура 3.4 алгоритъм.

Този системен подход се отнася до определяне на надеждностните параметри, когато компонентите вече са структурирани и са определени техните взаимни връзки. Първата стъпка е да се определи дали съществуват някакви статистически данни за съответния компонент – от сервизната поддръжка за сходно изделие или от експериментални резултати. Следващата стъпка трябва да даде отговор дали може да се ползва подходящ наличен емпиричен модел и дали този емпиричен модел е адекватен спрямо работната среда. Алтернативен, и често ползван по необходимост, път е да се извърши симулация на физичния процес, който се очаква да доведе до отказ в компонента. При комплексен модел, може или да се решат няколко отделни симулационни задачи, чиито резултати да се обединят в последствие, или да се реши мултифизична задача. Крайният резултат от обработката на налични статистически данни, емпиричният модел или симулационното моделиране на протичащите физични процеси, водещи до потенциален отказ, следва да бъде набор от параметри, подходящ за съставяне на надеждностният модел на механичния компонент.



Фиг. 3.4 Алгоритъм при системния подход за моделиране и оценяване на надеждностните параметри

3.3. Методика за определяне входните въздействия за надеждностния модел

3.3.1. Класификация на входните въздействия

Детайлен преглед на различните надеждностни модели и необходимите входни въздействия за тях даде възможност да се състави тяхна класификация. Тя е развита в четири основни групи: външно натоварване, работна среда, конструкция и надеждностни характеристики.



Фиг. 3.7 Видове входни въздействия

3.3.2. Източници за определяне на входните въздействия

Основно, те са четири: техническо задание, концептуален модел, физични модели – за симулиране физиката на възникване на отказите (числени или емпирични) и статистически модели – показано в таблица 3.1 по-долу.

Табл. 3.1 Източници за определяне входните въздействия

ТЕХНИЧЕСКО ЗАДАНИЕ	КОНЦЕПТУАЛЕН МОДЕЛ
Брой цикли	Смазване
Механично натоварване	Замърсяване (предпазване от)
Температура	Свойства на материала
Налягане	Геометрични параметри
Замърсяване	Технологични параметри
Агресивност	Свързаност с други елементи
Геометрични параметри	
Значимост на компонента	
ФИЗИЧНИ МОДЕЛИ	СТАТИСТИЧЕСКИ МОДЕЛИ
Механично напрежение	Закон за разпределение на отказите
Механично натоварване	Сервизни данни
Налягане	Замърсяване
Температура	
Инерционно натоварване	

3.3.3. Методика за определяне входните въздействия за надеждността на модел

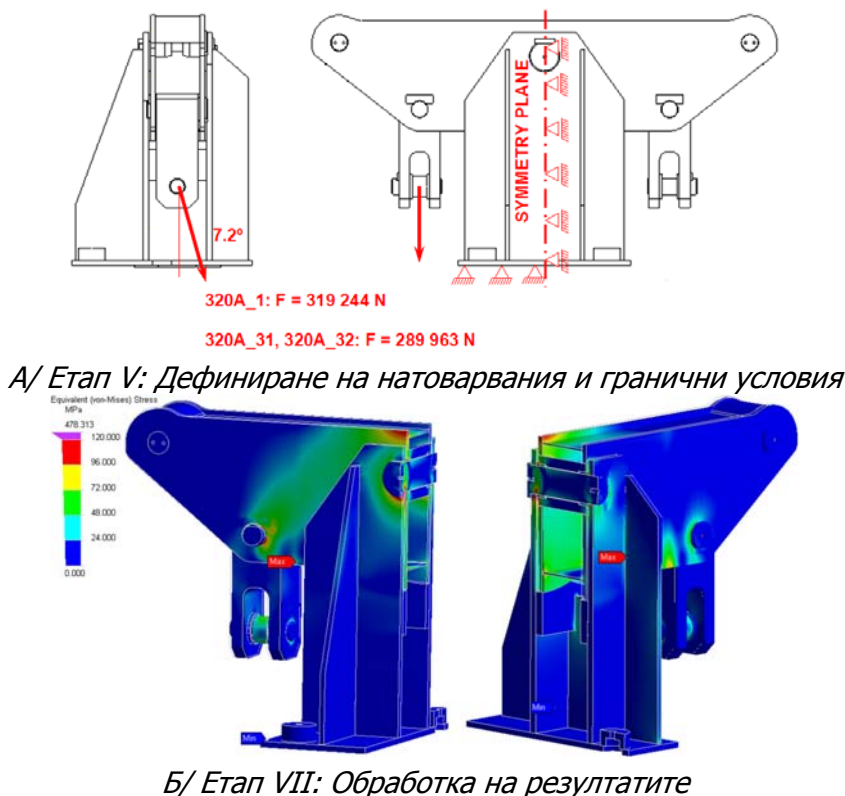
Разработената методика за определяне входните въздействия за надеждността на модел има фокус разглеждането физиката на възникването на отказите, и по-конкретно нейното виртуално моделиране и изследване. Обобщени са стъпките по определяне параметрите на компонентите, при използване на числени методи за симулиране физиката на възникването на съответния отказ. Това е илюстрирано чрез таблица 3.2 по-долу.

Табл. 3.2 Методика за определяне входните въздействия и параметри за надеждностен модел на машиностроително изделие. Етапи

Етап	Действия	Източник
I. Анализ на типа отказ	Преглед на изходните данни и анализ Определяне физиката на отказ	Надеждностен модел Техническо задание Концептуален модел
II. Избор на инструментариум	Съпоставка между определения физичен модел и възможните инструменти	Техническо задание Концептуален модел
III. Дефиниране на геометричен модел	Анализ на изграденият концептуален модел Опростяване на геометрията	Концептуален модел
IV. Генериране на мрежа от елементи	Експертен анализ на комплексния проблем геометричен модел/натоварвания Задаване на параметри на мрежата /Генериране	Геометричен изчислителен модел Техническо задание
V. Дефиниране на натоварвания и гранични условия	Първоначално определяне на параметри на граничните условия Дефиниране на граничните условия в изчислителния модел	Определена физика на възникване на отказа
VI. Числен анализ	Определяне на параметрите на анализа Задаване на параметрите Анализ или итеративно решение	Физика на възникване на отказа / Числен модел / Гранични условия
VII. Обработка на резултатите	Преглед и анализ на получените резултати Определяне търсения надеждностен параметър	Числен модел Решение на модела

Моделиране и прогнозиране на надеждностните показатели в етапа на проектиране

Гореописаната методика е илюстрирана с **примерно решение**, свързано с оценката на надеждностните показатели на товароповдигаща система за ядрената енергетика, разработка на AREVA NP, дивизия FRAMATOME ANP (фигура 3.9).



Фиг. 3.9 Етапи при определяне на входните въздействия за надеждностни модели

3.4. Изводи

1. Развита е нова класификация на механичните компоненти според надеждностните им модели, която отчита ползването на виртуален прототип, илюстрирана с примери;
2. Изграден е системен подход за моделиране и оценяване на надеждностните показатели на механични компоненти, основан на развитата класификация. Съставен бе алгоритъм на подхода, онагледен чрез конкретен пример от практиката;
3. Съставена е класификация на входните въздействия, ползвани при определянето параметрите на надеждностните модели на машиностроителни изделия, вследствие на детайлен анализ, базиран на основните типове въздействия, съобразно надеждностните модели;
4. Тази класификация бе допълнена от определяне на основните източници при дефиниране на входните въздействия, и отношението им към различните видове входни въздействия;
5. Разработена е методика за определяне входните въздействия за надеждностният модел, която представлява нов съществен принос към общия системен подход за моделиране надеждностните показатели на машиностроителни изделия.

Глава 4. РАЗРАБОТВАНЕ НА ИНТЕГРАЛЕН ПОДХОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ФУНКЦИОНАЛНИТЕ, СТОЙНОСТНИ И НАДЕЖНОСТНИ ПАРАМЕТРИ

4.1. Дефиниране на активните взаимовръзки между изследваните видове анализи

Тези, по същество проектни, дейности могат да бъдат развивани на база концептуален модел на изделието, следвайки последователност, която се обуславя от тяхната взаимосвързаност, показано на фигура 4.1. Изграденият функционален структурно-надеждностен модел, се явява основа за последващи анализи и разглеждания. Неговите компоненти и връзки се ползват за моделиране и оценяване на надеждностните параметри чрез развития системен подход, при методиката за определяне на входните въздействия.



Фиг. 4.1 Взаимосвързаност на различните подходи и анализи

Впоследствие, надеждностните параметри – като интензивност на отказите на изделието и неговите компоненти например – както и изготвеният вече функционален структурно-надеждностен модел, служат за основа при анализа на ремонтпригодността на изделието. Следващата група анализи са анализа на отказите и техните ефекти и критичност (FMECA), оценка на риска (Risk Hazard Analysis), анализ на структурата на отказите (Fault tree analysis), се опира основно на функционалния структурно-надеждностен модел. Всъщност, RHA анализът не съдържа количествени оценки, тъй като не се фокусира върху генезиса на даден отказ, а върху последствията от него. Функционално-стойностният анализ се базира изцяло върху изградения модел, ползващ основно описанието на функционалността и взаимовръзките на компонентите. Основно приложение е при съпоставка на различни технически решения – варианти – още на етапа на проектиране на изделието. Една разновидност – анализ за определяне стойността на притежаване на изделието (Life Cycle Cost Analysis – LCCA) – ползва функционално стойностния анализ, данните от анализа на

ремонтпригодност и определените параметри на надеждност, съчетани с финансова оценка на компоненти и функции. Това представлява най-пълният анализ, включващ в себе си голяма част от описаните анализи – комбинирайки ги по начин, който да оцени стойността на притежаване и ползване на дадено изделие.

4.2. Анализи, отнасящи се до безопасност на изделията

Развитите в предходните глави функционален структурно-надеждностен модел и системен подход за оценка надеждностните параметри на машиностроителни изделия дават изходните компоненти за провеждането на FMECA. Това е показано на фигура 4.2.



Фиг.4.2 Приложение на компонентите на функционалния структурно-надеждностен модел и системния подход за определяне надеждностните параметри при изготвяне на FMECA

Следвайки последователността при изготвяне на FMECA, следва да изходим от данните за пълния функционален структурно-надеждностен модел на изделието, съдържащ данни за физиката на откази на компонентите на изделието, видовете техни откази и свързаността на компонентите (разпределяне по функционални блокове и подвъзли). Това се доразвива с по-подробно описание на видовете откази на компонентите, според тяхната физика. Познаването на физиката на отказите, съставеният при приложение на системния подход неин модел – подпомагат описанието на причините за възникване на тези откази и оценка на степента на тяхната важност (severity). Това спомага дефинирането на отказите на ниво изделие, което може да се определи като нов, добавен елемент към съществуващият надеждностен модел. Впоследствие, вече известните откази на компонентите се свързват с отказите на изделието и се извършват корекционни действия при необходимост. Това пък се улеснява от вече дефинираните в съставеният пълнен надеждностен модел връзки между отделните компоненти и възли в изделието. Финалното определяне на ефектите от отказите

на изделието, превантивни и корективни действия, тяхната *критичност* съставлява нов елемент и реално не ползва данни от проведените вече анализи и съставени модели.

Hazard Type	Location	Cause	Operating method	S	F	P	Category	Specific method taken	Standards / Guidelines
Getting caught in, becoming wound up	4	1a/1c/1d/1e	C/FG	1	1	1	1	Clothing, hair, etc. which is getting caught or wound up by carriage. • The carriage movable parts are secured by covers or in manner of small smooth gaps. • Safety measures in the manual: „Before all repairs, maintenance and rust-proofing the main control switch must be turned off and secured/locked from being re-started.“	DIN EN ISO 12100 DIN EN 1485
	3	1a/1c	C/FG	1	1	1	1	Clothing, Hair, etc. which is caught or wound up by the movable part of the hydraulic cylinder. • Hydraulic cylinder rod is covered and secured. • Safety measures in the manual: „Before all repairs, maintenance and rust-proofing the main control switch must be turned off and secured/locked from being re-started.“	DIN EN ISO 12100
Hedge	45/7	1a/1c/1d/1e/FGM/1a/2f	B/C/E/FGM	1	1	2	1	Hedge through a person or the lift column: • Entirely all exposed corners and edges are rounded off; • The column lift moves slower than 0.15 m/s; • Safety measures in the manual: „Do not allow anyone to stay in lift area during raising and lowering motion.“	DIN EN ISO 12100 DIN EN 1485

Hazard Type	Location	Cause	Operating method	S	F	P	Category	Specific method taken	Standards / Guidelines
Getting caught in, becoming wound up	4	1a/1c/1d/1e	C/E/FG	1	1	1	1	Clothing, hair, etc. • The carriage m of small smooth • Safety measure „Before all repairs, maintenance and rust-proofing the main control switch must be turned off and secured/locked from being re-started.“	
	3	1a/1c	C/FG	1	1	1	1	Clothing, Hair, etc. of the hydraulic • Hydraulic cylinder • Safety measure „Before all repairs, maintenance and rust-proofing the main control switch must be turned off and secured/locked from being re-started.“	

Фиг. 4.5 Вид на техническия отчет за извършен анализ на безопасност на подемно съоръжение с артикулираща кинематика

Друг тип анализ, заложен в някои международни стандарти и изисквания за безопасност към ред изделия, не изисква количествена оценка на вероятността от появата на даден вид отказ, а само описание на възможните откази, техните ефекти и риск от настъпване на отказа (критичност). Този тип анализ е известен като анализ на риска (Risk Hazard Analysis – RHA). Комбинирайки работни режими и основните възли на изделието с различните типове риск, категории, изисквания и възможни причини (дефинирани от стандарта) се получават крайните резултати (потенциалните рискове при употреба, предприетите мерки за осигуряване експлоатационната безопасност) и от RHA, във табличен вид, както е показано по-долу, на фигура 4.5. Конкретната разработка е част от индустриален проект за развитие на нов модел подемен крик за компанията МАНА, Германия.

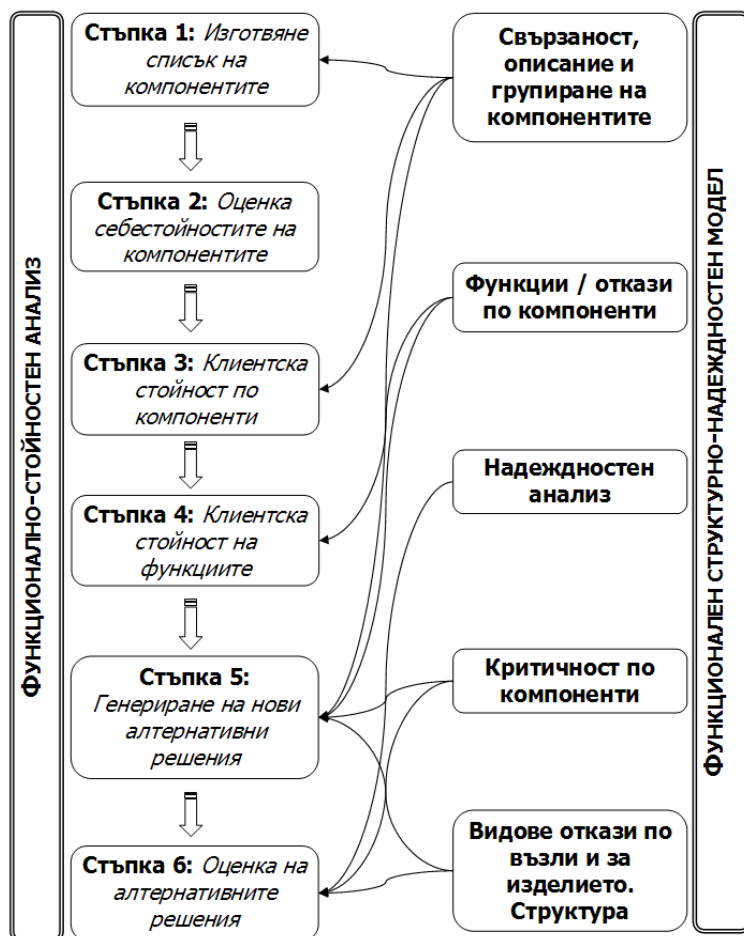
Ефективността на този тип анализи значително се увеличава с по-ранното им провеждане – още на етапа на разработване и проектиране на изделието. Съвременните практики са все повече ориентирани към изготвяне на такъв тип анализи още на етап “концептуален модел”, което намалява дори итерациите при конструирането на изделието, като същевременно осигурява и съответствие на норми и стандарти за безопасност в съответната област на приложение на продукта.

4.3. Функционално-стойностни анализи

Функционално-стойностният анализ (FCA) е числен метод, насочен към увеличаване на разликата между цената и стойността на даден продукт, фокусиран към съкращаване на разходите по реализирането на отделните му функции. Най-общо той се изпълнява в няколко стъпки, които се съчетават с обектите на функционалния структурно-надеждностен анализ, което може да се превърне в съществено предимство при разработването на нови продукти. Такъв подход за извършване на FCA, при ползване на предварително изготвен

Моделиране и прогнозиране на надеждностните показатели в етапа на проектиране

функционален структурно-надеждностен модел, е едно от най-ефикасните средства за оценяване на функционалността и стойността на даден продукт (на фигура 4.6).



Фиг. 4.6 Приложение на функционалния структурно-надеждностен модел при изготвяне на функционално-стойностен анализ

4.4. Изводи

1. Разгледани са взаимовръзките между надеждностния модел и неговите параметри от една страна, и възможните анализи, които могат да се проведат на етап проектиране на изделието, за пълно описание на функционалността, отказите, ефектите и функционално-стойностен анализ. Това позволява да се оформят подходи за ползването им при всеки един от типовете анализи;
2. Направен е анализ на приложението на компонентите на функционалния структурно-надеждностен модел и на системния подход при изготвяне на анализ на отказите, техните ефекти и критичност (FMECA);
3. Приложимостта при този тип анализи е илюстрирана с пример от индустриален проект, по-специално при анализ на риска на подемно съоръжение, изискван като част от техническата документация за сертифициране на изделието;
4. Създаден е подход, използващ функционалния структурно-надеждностен при извършване на функционално-стойностен анализ – пак на етап на проектиране на изделието (виртуално прототипиране). Този подход също е демонстриран чрез пример от индустриален проект.

Моделиране и прогнозиране на надеждностните показатели в етапа на проектиране

Глава 5. ПРИЛОЖИМОСТ НА СЪЗДАДЕНИТЕ ФУНКЦИОНАЛЕН СТРУКТУРНО-НАДЕЖНОСТЕН МОДЕЛ, СИСТЕМЕН ПОДХОД И МЕТОДИКА ЗА ИНДУСТРИАЛНИ ТЕХНИЧЕСКИ СИСТЕМИ

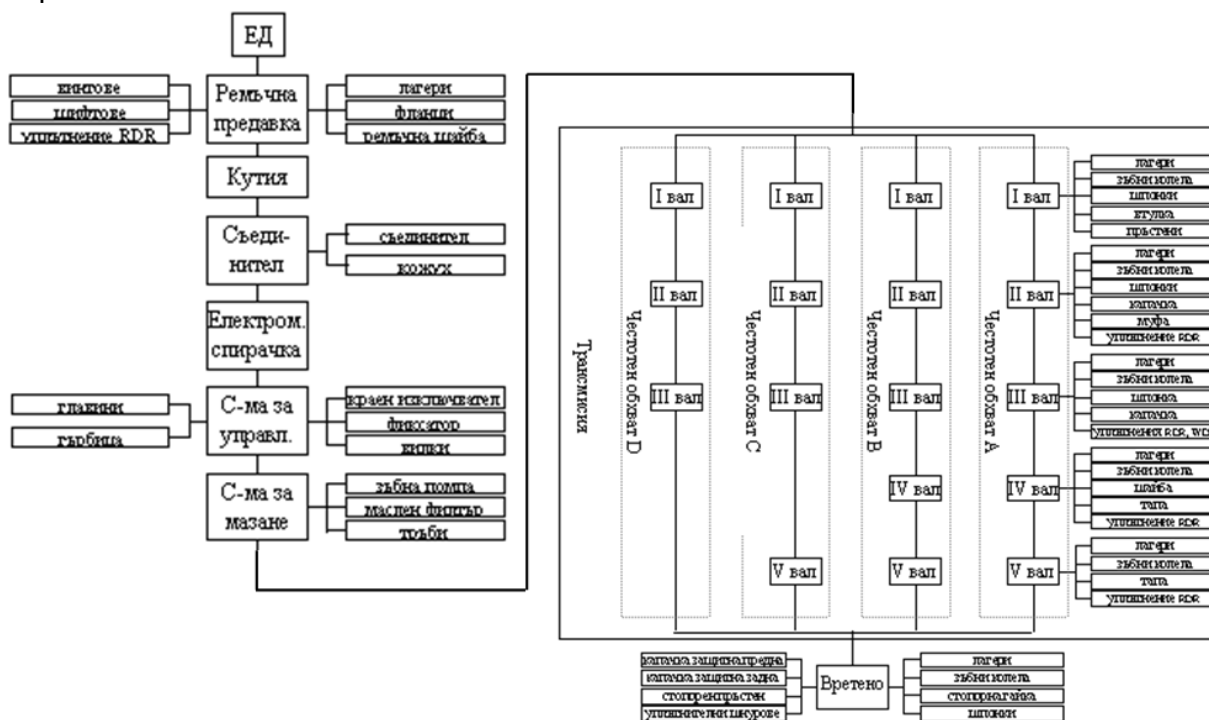
5.1. Пример за изграждане на функционален структурно-надеждностен модел

5.1.1. Входни данни. Техническо задание. Концептуален модел

Приложимостта на функционалният структурно-стойностен модел е илюстрирана чрез примерен модел на основен възел от металоуреждаща машина – част от работната документация на машината (изчислителна записка). Разгледаният основен възел на универсален струг C13S, произвеждан от ЗГММ-Перник – главен превод. Той реализира 24 скорости в обхват $6.3 \div 850 \text{ min}^{-1}$ за вретеното, при максимален въртящ момент на вретеното 3200 Nm. Тези параметри са определени с т.нар. техническо задание за реинженеринг на съществуваща машина, което съвместно с вече изградения концептуален модел на възела, се ползва при изграждането на функционалния структурно-надеждностен модел.

5.1.2. Структуриране на надеждностния модел: функции, връзки и групиране на компонентите

Анализа с използване на виртуалния прототип на изделието позволява да се определят функциите на всеки един от моделираните компоненти. Впоследствие се определя и свързаността на компонентите.



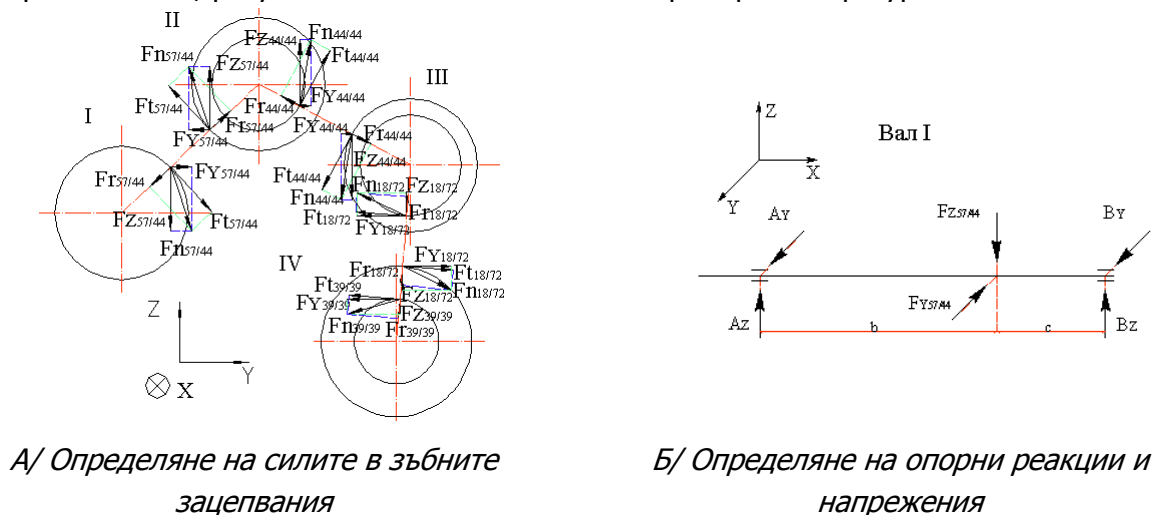
Фиг. 5.2 Структурен модел на изделието

Резултатът от тези дейности дава възможност да се структурира надеждностен модел, съобразно функционалното предназначение на изследваното изделие, неговите елементи и възли, и характерните особености на извършвания анализ на надеждност. Определени са

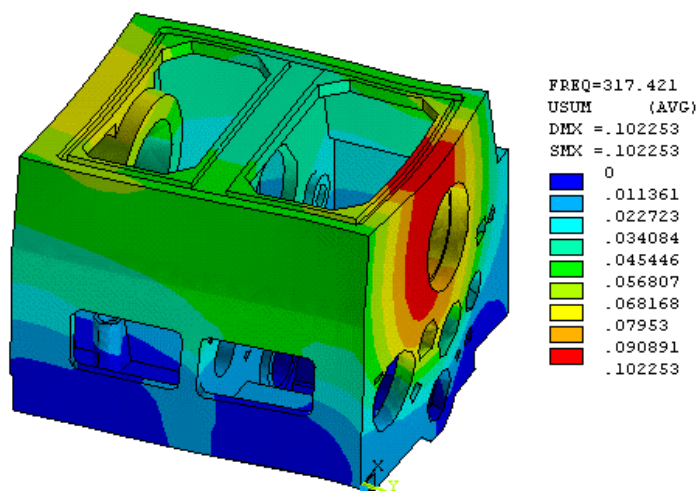
девет основни възела на изделието: електродвигател (ЕД), ремъчна предавка, кутия, съединител, електромагнитна спирачка, система за управление, система за мазане, трансмисия и вretenен възел. По-специален интерес представлява трансмисията, която реализира 24 честоти на въртене на вretenото, групирани за надеждността модел в 4 основни обхвата. Изграденият структурен модел е показан на фигура 5.2.

5.1.3. Определяне на работни режими и натоварвания. Физика на очакваните откази на компонентите

Работните натоварвания се определят съобразно зададените изисквания в техническото задание и наличният концептуален модел, при отчитане на връзките между компонентите. Това е направено за всичките 24 скорости на вretenото, групирани в четири подобхвата за целите на надеждността анализ. Пример за извършените пресмятания е даден на фигура 5.3 – за определяне натоварванията на зъбни зацепвания и валове. При по-сложно натоварване са ползвани числени методи за симулиране на статичното (силово-деформационно) и динамично (модален анализ) поведение на съответният компонент. Така например, поведението на кутията на главния превод при съответните работни режими е симулирано по МКЕ, резултати от което са показани примерно на фигура 5.4.



Фиг. 5.3 Определяне на работни натоварвания - пример



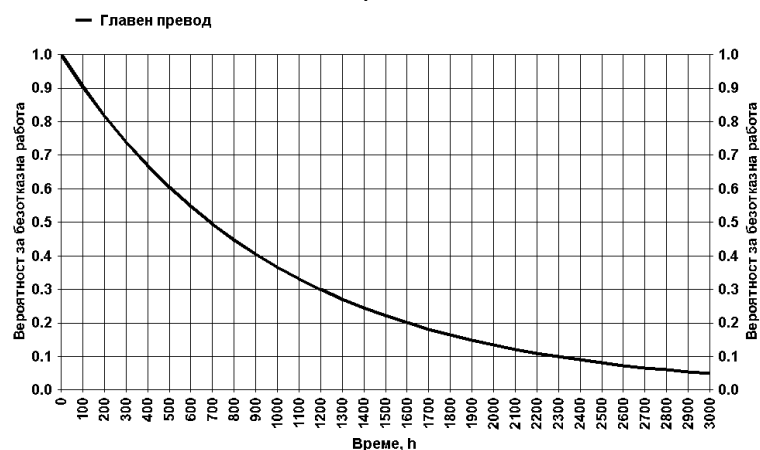
Фиг. 5.4 Симулиране на силово-деформационно поведение на корпусен елемент

5.1.4. Дефиниране на надеждностни модели за компонентите и отразяване на тяхната свързаност

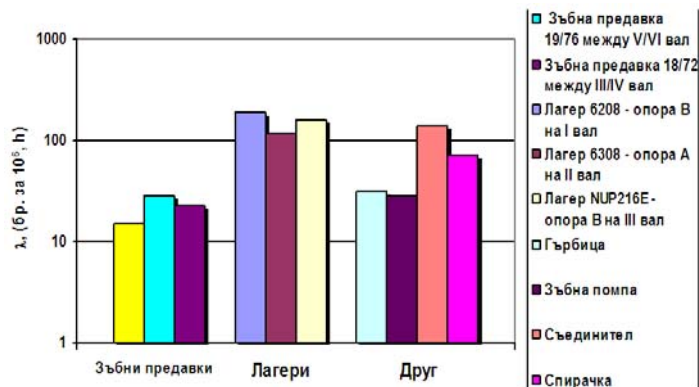
Допълнително са определени и условията на околната среда (температура, мазане на компонентите, замърсеност), необходими за определяне на надеждността. Определени са и работните условия и натоварвания за останалите компоненти на разглеждания възел, като уплътнения, гърбици, елементи на системата за управление, винтове и др. Надеждностен модел е изграден за всеки един от компонентите на дефинирания модел, като са използвани определените по-горе работни натоварвания.

5.1.5. Изходни данни

Съставеният пълен функционално-структурен модел съдържа всички компоненти на изделието, влияещи върху надеждностните му параметри, връзките между тях, видовете им откази, а също така и отказите по възли и за цялото изделие. Този модел позволява да се проведе надеждностен симулационен анализ за оценяване отказите на изделието и неговата функционалност, като това дава възможност числено да се оцени вероятността за безотказна работа $R(t)$ (фиг. 5.5), както и да се проследи разпределението на отказите по функционални блокове, както и определянето на компонентите с най-ниска надеждност (фиг. 5.7), чиято промяна би увеличила надеждността на изделието. Това дава възможност за балансиране на надеждностните показатели на изделието по компоненти, като същевременно се постига и икономически ефект.



Фиг. 5.5 Функция на вероятността за безотказна работа във времето



Фиг. 5.7 Най-натоварени компоненти за изделието

Резултатите за трансмисията сочат, че тя е конструирана правилно от гледна точка на надеждностните изисквания. Получената при анализа стойност на MTBF = 1153 h. Като се сравнят изискванията на стандарт БДС 13050-80 се вижда, че стругът има добри надеждностни показатели. Ремъчната предавка, има голям процент в общия брой откази, тъй като е натоварена през цялото време на работа на струга. Поради честите включвания и изключвания по време на експлоатация и последващото интензивно износване на триещите се повърхнини на дисковете, съединителят също има голям процент от общия брой на отказите.

5.2. Примери за прилагане на развитите системен подход за моделиране и методика за определяне входни въздействия

5.2.1. Корпусен компонент – редукторна кутия

Разгледана е редукторна кутия, компонент от ново изделие – перфоратор, произвеждан от СПАРКИ ЕЛТОС АД – която представлява подходящ обект за илюстриране на системният подход при моделиране надеждностните показатели, както и за методиката за определяне определяне входните въздействия.

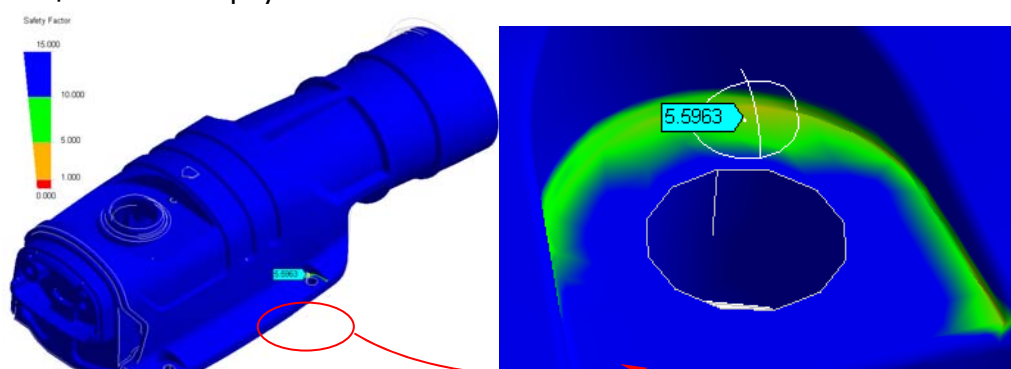
Проверката за налични статистически данни от сервизиране на сходни компоненти показва че няма подходящи компоненти от произвежданите машини, които да се ползват за основа на надеждностен модел за новоразработваната редукторна кутия, поради спецификата на натоварването. Това налага да се извърши **анализ на възможните откази и тяхната физика**, и като основен физичен процес за отказ на компонента е определено загубата на функционалност, породена от умора на материала, вследствие на приложените циклични работни натоварвания. **Наличен емпиричен модел за описание** на този физичен процес не е намерен, главно поради сложната геометрия и натоварване на изследваният компонент. По този начин, се пристъпва към **симулация на физиката на отказ**, чрез която да се определят **входните въздействия и параметри на надеждностния модел** на компонента.

Първи етап, включва подробно разглеждане на физичния модел за настъпване на определен тип отказ (разрушаване от умора). **Типа на входните въздействия** – циклично натоварване в лагерните гнезда, при закрепена към носещия корпусен елемент редукторна кутия – се определя при използване на съществуващия концептуален модел / виртуален прототип (ВП). Предложеният надеждностен модел на корпусен елемент – редукторна кутия от ръчен електроинструмент, демонстрира възможностите за използване на виртуален прототип (ВП) за моделиране на физиката за възникване на отказите.

Следващ етап по определянето на входните въздействия се състои в **избор на числен метод** – методът на крайните елементи (МКЕ). Използваният **геометричен модел**, както бе споменато по-горе, е основан на виртуалния прототип. Изградената **мрежа от крайни елементи** за разглеждания пример и е извършено **дефиниране на натоварванията и граничните условия**. Те са дефинирани според работните натоварвания на изследвания детайл, определени на основа на техническото задание и определената физика на възникване на отказите. **Численият анализ** за определяне на силово-деформационното поведение на моделирания процес (геометрия, натоварвания) изисква задаването някои допълнителни параметри, особено при решаването на нелинейни задачи. Резултатите от

проведения анализ на изградения изчислителен модел включват разпределението на еквивалентните напрежения и деформации, както и оценка на коефициентите на сигурност, определени въз основа на зададените криви на умора на материала – имащи пряко отношение към определяне надеждността на изследвания обект (фиг. 5.10).

Резултатите показват минимален коефициент на сигурност 5.5 при зададен необходим ресурс на изделието от $9 \cdot 10^7$ цикъла (съответства при 500h работа с честота на натоварването 50Hz). Най-критична зона за конструкцията са площадките за присъединяващите я към корпусния елемент винтове.



Фиг. 5.11 Разпределение на коефициентите на сигурност

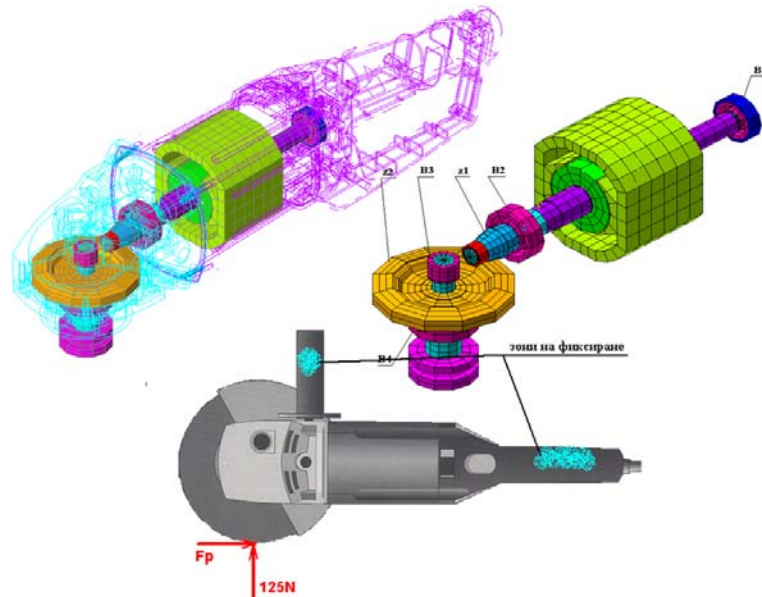
5.2.2. Компонент от кинематиката – конусна зъбна двойка

Показаният пример отново е част от изследване на надеждностните параметри на високонатоварена конструкция на ръчен електроинструмент на СПАРКИ ЕЛТОС АД – ъглошлифовъчна машина – от контекста на която е изваден пример за определяне надеждностните параметри на конусна зъбна двойка. Основната цел тук е да се илюстрира методиката за определяне на входните въздействия, при ясен надеждностен модел. В този смисъл, е избран модел на **типа отказ**, свързан с силовото натоварване на разглеждания компонент на конструкцията. Конусните зъбни предавки са чувствителни към грешки от изработване, монтаж и премествания вследствие на деформации в корпусните елементи и валове на машината под действие на работните натоварвания, водещи до изместване и пресичане на осите. Решаването на тази структурна по същество задача налага **избор на числен метод**, използващ крайни елементи. Изграждането на изчислителния модел, включващ корпусните детайли (редукторна кутия, тяло на електромотора, зъбни колела, котва/статор) е осъществено на основата **геометричен модел на цялата машина**, ползван **за генериране на мрежа от крайни елементи**. Съставеният изчислителен модел включва външните сили (силата на притискане от страна на работещия и силите на рязане) и вътрешните натоварвания от мотора и трансмисията, което **дефинира изцяло натоварванията и граничните условия** – фигура 5.12. Резултатите от извършените пресмятания за двата случая са представени в таблица 5.1.

Табл. 5.1 Резултати от пресмятането на работните натоварвания

Наименование	Пиньон	Корона
Тангенциална сила, F_{Tm} , N	52.5	
Тангенциална сила, F_{Tm} , lb.f	11.8	
Радиална сила, F_{Rm} , N	14.6	41
Аксиална сила, F_{Am} , N	41	14.6

Резултатите от проведения **числен анализ** са допълнително обработени за получаване на ъгъла на кръстосване на осите, тъй като компонентите на разглежданата конусна зъбна двойка всъщност са разположени върху котвения вал и вретеното.



Фиг. 5.12 Изчислителен модел на ъглошлифовъчна машина

5.3. Изводи

1. Прилагането на развития функционален структурно-надеждностен модел дава възможност да се оценят надеждностните параметри на сложно машиностроително изделие – главен превод на универсална стругова машина – още на етап проектиране;
2. Формулираните етапи по изграждането на този модел дават следните предимства при моделирането на механична конструкция като:
 - a. Функционално групиране на компонентите в изделието, при отчитане на характерните връзки между тях;
 - b. Адекватно определяне на работни режими и натоварвания според данните от техническото задание и функциите на компонентите;
 - c. Специфични физични модели, характерни за машиностроителните изделия, имащи често пъти частен характер на натоварвания и/или геометрия;
 - d. Правилно отразяване на взаимовръзките между отделните компоненти;
 - e. Ползването на специфични надеждностни модели;
3. Успешно бе приложена съобразената с развития системен подход класификация на надеждностните модели на механичните компоненти, която отчита приложимостта им при виртуалното прототипиране;
4. Демонстрирано беше приложението на системния подход за моделиране и оценяване на надеждностните параметри, приложен и спрямо корпусен елемент от машиностроително изделие;
5. Последният разгледан пример третира характерен компонент на машиностроителните изделия – зъбна двойка. Прилагането на методиката за определянето на входните въздействия, основана главно на ползването на виртуален прототип показва значителните ѝ предимства.

Глава 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Валидация на основните разработки от дисертационният труд е осъществена чрез практически експериментални определителни изпитвания за определяне надеждностните показатели на примерни реализации на машиностроителните изделия по съвместни проекти с „СПАРКИ-ЕЛТОС“ ЕАД.

6.1. Методика за изпитвания. Екипировка за провеждане на изпитванията

Изготвянето на методиката цели да се ползва и при осъществяване на контрол на производството, както и за основен инструмент за изпитване на бъдещи нови продукти. Тя е изготвена при отчитане работните режими на изследваният перфоратор – „пробиване и къртене“ и само „къртене“. Така е съставен работен цикъл на натоварване на изделието, показан в таблица 6.1 по-долу. В методиката са разграничени тези повреди, които следва да се третират като отказ, от тези които могат да се причислят като разход на консумативи.

Табл. 6.1 *Режими на работа*

Тест	Използван инструмент	Честота на въртене, min^{-1}	Положение на превключвателя	Положение на инструмента	Дълбочина на пробиване, mm	Работен цикъл, min		Брой работни цикли	Време, min
						Работа	Престой		
A	Свредло SDS+ $\varnothing$ 25	245			160	4	2	12	70
B	Свредло SDS+ $\varnothing$ 25					4	2	12	70
C	Лопатка SDS+ 250 x 40mm	Режим "High Power"			-	5	2	14	96



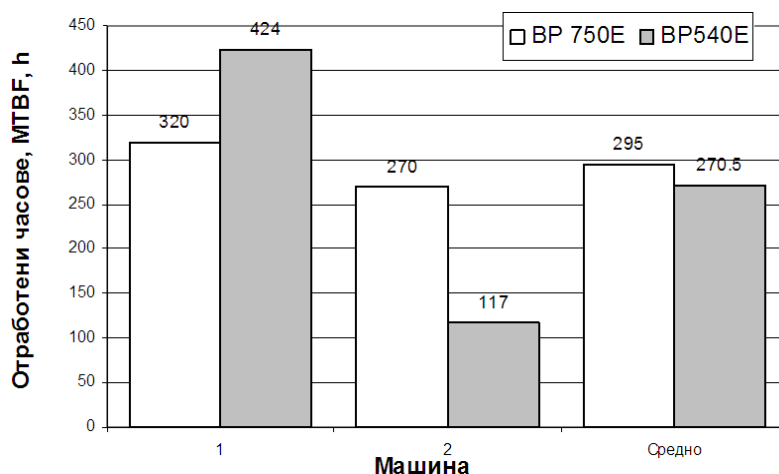
Фиг. 6.3 *Изработени стандове за изпитване на надеждност на перфоратори и къртачи*

Така развитата методика за изпитвания за определяне надеждностните параметри е разширена впоследствие и се ползва и за машини от среден и нисък клас – под 7kg, приета от производителя методика № 152482, включена във фирмена нормала „ФН 182-2 - т.6

Надеждност”. Съобразно нея, както и изискванията, записани в стандарт EN60745-2-6, са разработени и фамилия от стендове за изпитване на надеждност, по съвместен проект „SPARK Hammer – Фамилия ударно-пробивни ръчни електроинструменти с иновативна ударна система с контролиран резонанс”, към ИАНМСП, показани на снимките от фигура 6.3.

6.2. Резултати от проведени изпитвания

Разгледани са два от изпитваните модели машини – петкилограмов перфоратор BP 540CE и седемкилограмов BP 750E. Обобщени, резултатите са представени графично на фигура 6.4 по-долу. Показаните резултати се отнасят до отработките на по две машини от вид. Поради малкия брой изпитвани машини, резултатите не са достатъчни като статистически данни, но са достатъчен индикатив за сравнение с резултатите от проведените надеждностни анализи в проектен етап.



Фиг. 6.3 Резултати от проведени изпитвания



Фиг. 6.4 Изпитване на надеждност на перфоратор BP 330CE

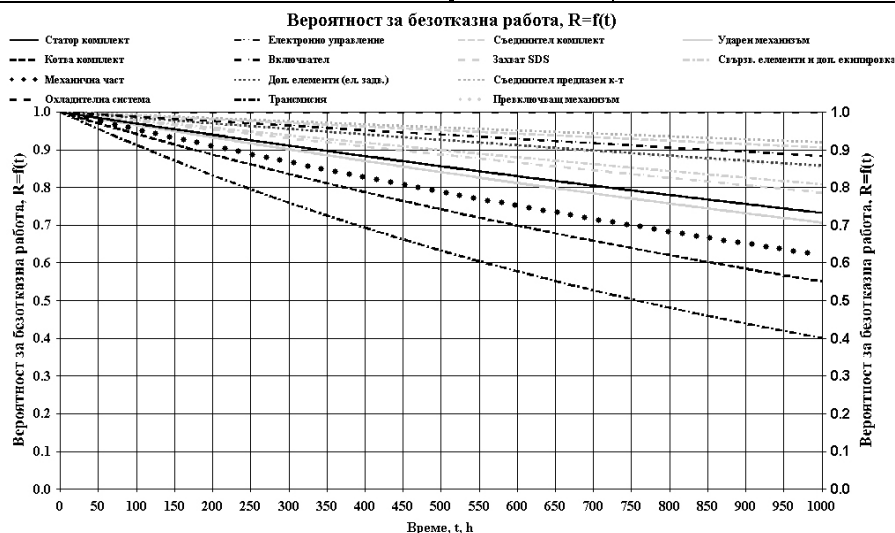
Самите тестове за определяне отработките са илюстрирани допълнително чрез снимка на стенда за изпитвания, с монтирана машина BP 330CE – друг член от фамилията електроинструменти. Протокол от проведените изпитвания за една от машините – BP 750E – е даден в Приложение 2.

6.3. Обобщени резултати от анализа на функционалния структурно-надеждностен модел на етап проектиране

Обобщените резултати от този анализ на етап проектиране са показани в таблица 6.2, а функцията на вероятността за безотказна работа е показана на фиг.6.5.

Табл. 6.2 *Резултати*

Параметър	Ремонт	Пълен отказ
Средно време между два отказа, m, h	57.3	268.4
Интензивност на отказите, λ , бр./10 ⁶ h	17452	3725.5



Фиг. 6.5 *Вероятност за безотказна работа $R=f(t)$*

6.4. Съпоставка на резултатите от изпитванията и аналитично определените стойности на надеждностните параметри.

Изводи

1. Съпоставка на експерименталните данни и изчислителната стойност за средното време между два отказа показва 295h срещу 268.4, което съответства на под 10% разлика;
2. Постигнатата точност на прогнозираната дълготрайност на изделието и измерената върху реалния продукт е достатъчна за нуждите на проектирането;
3. Това показва, че проектната оценка при използване на развитите модел, подход и методика, е достатъчно адекватна и те могат да се ползват при развиването на нови машиностроителни изделия;
4. Детайлна съпоставка на настъпилите откази при изпитваните машини и прогнозираните критични нейни компоненти, в резултат на детерминистичното моделиране надеждностните показатели на изделието, показва също едно добро съвпадение;
5. Трябва да се отбележи че са проведени изпитвания само върху по две машини от тип, което не е достатъчно за пълна статистическа оценка;
6. Като обобщение, може да се посочи доброто съвпадение на теоретично пресметнатите с опитно определените стойности на надеждностните параметри на разглежданото машиностроително изделие – ръчен електроинструмент перфоратор.

Приноси

Научно-приложни приноси

1. Създаден е системен подход за моделиране и оценяване надеждностните показатели на компонентите на машиностроителни изделия в етапа на проектиране, при използване на виртуални прототипи;
2. Изготвена е методика за определяне входните въздействия, ползвани за надеждността модел, основан на симулиране на физиката на отказите им при използване на виртуални прототипи, която е внедрена във фирма Siguren Ingenierie, Франция;
3. Предложена е класификация на входните въздействия и на самите механични компоненти, според надеждностните им модели, изградени на базата на виртуални прототипи;
4. Изградени са два подхода, ползващи пряко описаните функционален структурно-надеждностен модел, системен подход и методика:
 - а. за изготвяне на анализ на отказите, техните ефекти и критичност (FMECA);
 - б. за извършване на функционално-стойностен анализ на етап на проектиране на изделието (виртуално прототипиране);

Приложни приноси

1. Разработен е функционален структурно-надеждностен модел на машиностроително изделие на база виртуален прототип, с отчитане взаимните въздействия на елементите му;
2. Практически са приложени функционалния структурно-надеждностен модел, системният подход и методиката за определяне на входните въздействия при индустриални проекти на ръчни електроинструменти, редуктори и компоненти за подемна техника, металорежещи машини и др.;
3. Разработена е методика за определителни надеждностни изпитания на ръчни електроинструменти – перфоратори, както и необходимата екипировка за провеждането им, внедрени във фирма СПАРКИ ЕЛТОС АД, гр. Ловеч;
4. Адекватността и приложимостта на създадения системен подход за моделиране и оценяване надеждностните показатели е апробирана и валидирана в индустриален проект, чрез сравнителен анализ с получените резултати от проведените експериментални изпитвания. Подходът е внедрен във фирмите СПАРКИ ЕЛТОС АД, гр. Ловеч и ЗГММ-Перник АД.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Todorov G., Todorov N., Kamberov K., Reliability analysis Approach of high loaded power tool construction using Finite Element Analyses. Proceeding of the Feature Modeling and Advanced Design-For-The-Life-Cycle Systems (FEATS) 2001, Valenciennes ,France, pp 321-329, 2001
2. Тодоров Г., Камберов К., Определяне параметрите на надеждност чрез симулационен модел в етапа на проектиране, Машиностроене, 1-2, стр.21-24, 2002
3. Тодоров Г., Камберов К., Надеждностен анализ на възел колектор/четки от високонатоварен електродвигател в етапа на неговото проектиране, Машиностроене, 3, стр.25-28, 2002
4. Kamberov K., Todorov G., Todorov N., Reliability modelling and analysis of an engine lathe headstock gearbox, Proceedings of the International conference of Power Transmissions-Varna'03, Bulgaria, pp 380-383, 2003
5. Камберов К., Г. Тодоров, Б. Димова, М. Спасов, Моделиране на отказите в корпусен елемент с използването на виртуален прототип, сп."Машиностроене", 7-8, стр.23-26, 2006
6. Камберов К., Тодоров Г., Прогнозиране на надеждностните показатели на изделие в етапа на проектиране, сп. „Машиностроене“, 10, стр. 9-11, 2007
7. Todorov G., Kamberov K., Risk Hazard Analysis of a Lifting Equipment with Articulate Kinematics, International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS'08, Bulgaria, Sofia, October 1-4, 2008
8. Тодоров Г., Камберов К., Функционално-структурни модели при определяне надеждностните показатели на машиностроителни изделия, 26 Международна научна конференция, Сборник доклади, Созопол, България, 13-16 Септември 2010, стр.172-177

ABSTRACT

RELIABILITY MODELING AND PREDICTION AT PRODUCT DESIGN STAGE

Presented work is in the field of modeling and prediction of reliability parameters of mechanical products at the stage of their design, by applying the technologies of virtual prototyping. A general structural-functional model of mechanical product reliability is created, based on virtual prototype and taking into account the internal components relationships. A systematic approach for modeling and evaluating reliability parameters of mechanical components in the design stage is defined. A methodology for determining input reliability data is developed and used for reliability models, based on simulating the physics of failures. The various input data are classified, according to their reliability models built on virtual prototypes. Two approaches are created using directly the descriptions in the developed functional structural reliability model: a systematic approach and methodology, used to perform failure modes, effects and criticality analyses (FMECA) and – functional-cost analysis of the product at its early design stage. The developed functional structural reliability model, systems approach and methodology for determining input reliability data are applied in various industrial projects – hand-held power tools, gearboxes and components for lifting equipment, machine tools and more. A test methodology for reliability parameters determination of hand-held power tools – hammers is also developed, as well as necessary equipment for conducting experiments. All developed model, systematic approach and methodology are validated using experiments.

Благодарности:

Исказвам благодарност на научния ми ръководител *доц. д-р Георги Тодоров* за безценните съвети и съдействие, в процеса на оформянето ми като специалист и личност, както и на инициатора проф. д-р Никола Тодоров, без когото тази работа всъщност нямаше да бъде започната.

Благодаря на *екипа на лаборатория "CAD/CAM/CAE в Индустрията"*, за тяхната помощ, сътрудничество в различни проекти и споделянето на инженерен опит. Работата ми през годините, като участник в този екип, позволи да взема участие в редица проекти, част от които са обобщени и ползвани в настоящата разработка. Именно тези проекти ми позволиха като участник да се квалифицирам в тази област.

Благодарности и на *катедра ТМММ*, обучавала ме през годините и предоставила ми възможност чрез преподаваната методологията да израстна като специалист, както и за предоставената организационна помощ при разработването на дисертационния труд.

Особена благодарност бих желал да изкажа на *родителите си*, както и на *цялото ми семейство* за оказаната подкрепа и насърчение за довеждане на дисертационната работа до завършен вид.

От автора